

20.631 /M/104



MILIK PERPUSTAKAAN
INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH - NOPEMBER

TUGAS AKHIR (KP 1701)

KARAKTERISTIK ALIRAN DENGAN ANGKA REYNOLDS RENDAH PADA PENAMPANG LINGKARAN DAN ELLIPS



RSPe
620.106
Wid
K
—
2004

OLEH

HERMAN ANDRI WIDIASTO

NRP : 4199 100 451

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	11-8-2004
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	221201

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

**KARAKTERISTIK ALIRAN DENGAN ANGKA
REYNOLDS RENDAH PADA PENAMPANG
LINGKARAN DAN ELLIPS**

**TUGAS AKHIR
(KP 1701)**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian
Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Perkapalan
Pada
Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Surabaya, 2004

Mengetahui Dan Menyetujui

Dosen Pembimbing



Ir. EKA Pria Utama, MSc., PhD
NIP. 132 007 645

**KARAKTERISTIK ALIRAN DENGAN ANGKA REYNOLDS
RENDAH PADA PENAMPANG LINGKARAN DAN ELLIPS**

TUGAS AKHIR

(KP 1701)

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian
Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Perkapalan
Pada
Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Surabaya, 2004

Mengetahui Dan Menyetujui,

Dosen Pembimbing



NIP. 132 007 645

**KARAKTERISTIK ALIRAN DENGAN ANGKA
REYNOLDS RENDAH PADA PENAMPANG
LINGKARAN DAN ELLIPS**

TUGAS AKHIR

(KP 1701)

Telah Direvisi Sesuai Dengan Hasil Sidang Ujian Tugas Akhir

Pada
Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Surabaya, 2004
Mengetahui Dan Menyetujui,

Dosen Pembimbing

Ir. I.K.A.Pria Utama, MSc., PhD

NIP. 132 007 645

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

ABSTRAK



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER (ITS)
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

**KARAKTERISTIK ALIRAN LAMINAR PADA PENAMPANG LINGKARAN
DAN ELLIPS PADA ANGKA REYNOLDS RENDAH
DENGAN CFD**

Oleh : Herman Andri (4199 100 451)

Dosen Pembimbing : Ir.I.K.A.P.Utama, MSc., PhD

ABSTRAK

Penentuan mengenai pola karakteristik aliran laminar pada penampang ellips dan lingkaran dengan angka Reynolds Number rendah tergantung aliran yang mengalir disekitar dan dibelakang bentuk geometris. Dimana pembahasan untuk menganalisa aliran luar yang bilangan Reynodsnya rendah dengan bentuk model tertentu haruslah ditelaah dengan membuat model numeriknya dengan suatu percobaan / eksperimen. Fenomena aliran ini tampak jelas bila ditunjukkan dengan suatu eksperimen digital komputer yaitu CFD. Hasil eksperimen numerik ini menunjukkan lokasi titik pemisahan pada daerah tertentu yang bergantung dari perkembangan lapisan batasnya. Perubahan bentuk aliran dibelakang penampang model lingkaran maupun ellips terjadi pada angka Reynolds 10 hingga 500 dengan tebal perpindahan lapisannya sebesar 1,45 m dan menimbulkan gejala disebut pemisahan aliran (*flow separation*). Hal ini terjadi dalam aliran di sekitar batas lengkung, menjelang titik stagnasi dan dalam aliran yang meluas. Besar perpindahan (δ^*) dengan η_1 terletak diluar lapisan batas dimana panjang L, diameter d yang terjadi pada permukaan ellips maupun lingkaran dengan angka Reynolds 5 hingga 500, dimana titik pemisahan ini mengawali suatu daerah yang disebut *wake*;

ABSTRACT



SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ITS)
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF NAVAL ARCH. AND SHIP BUILDING

**CHARACTERISTIC OF LAMINAR FLOW AT MODEL OF CIRCLE AND
ELIPS ON THE LOW REYNOLDS NUMBER BY CFD**

By : Herman Andri (4199 100 451)

Supervisor : Ir.I.K.A.P.Utama, MSc., PhD

ABSTRACT

Determination hit stream laminar characteristic pattern at model ellips and circle with depended by low Reynolds Number of stream emitting a stream around and behind geometric form. Where stream solution with low Reynolds Number with certain model form shall be analyzed madely model numeric with an attempt / experiment. This stream phenomenon see clear if shown with a digital experiment of computer that is CFD. Result of this experiment numeric show separation point location of certain area hinging from that boundary layer growth. Stream transformation of behind model circle and also ellips became by Reynolds Number 10 till 500 with displacement thickness coat transfer equal to 1.45 m and generate symptom referred as flow separation. This matter happened in stream around the boundary layer, before stagnation point and in stream which extend. The transfer by η located outside boundary layer where length L, diameter d that happened surface ellips and also circle with Reynolds Number 5 till 500, where this separation point area is called wake

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini pada waktunya tanpa hambatan dan rintangan yang cukup berarti.

Penyelesaian Tugas Akhir ini banyak dibantu oleh berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Ir.I.K.A.Pria Utama, MSc., PhD. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selama ini telah memberikan bimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini dengan penuh dedikasi dan kesabaran.
2. Ir. Koestowo. selaku dosen wali yang banyak memberi dukungan dan nasehat selama menimba ilmu di Jurusan Teknik Perkapalan.
3. Seluruh staf dosen dan karyawan Jurusan Teknik Perkapalan atas bantuannya baik secara langsung maupun tidak langsung.
4. Ayah dan ibuku (Moedijono dan Yustina Astuti) dan adikku (Wawan dan Aris yang tercinta.
5. Nenekku (Mujayanah) dan Kasihku (Vira) atas bantuan doa dan kasih sayangnya.
6. Paman-pamanku (Om Koko, Om Buyung, Mas Andung, Om Tris) dan tante-tanteku (Bude-Vin, Bude-Tuti, Bulik-Tut&Nanik, Bulik-Ning, Mbak-Ririn) serta seluruh keluarga di Sukabumi tidak bisa aku sebutin satu per satu.

7. Teman-teman teknik perkapalan angkatan '94 - '99 (Santoso, Fico, Hendra, Cecep, Jefri, Ustman, Hadi, Joko, Ririk, Karsono, Izzudin, Wahyu, Jufreng) serta teman-teman yang lain yang tidak bisa aku sebutin satu per satu.

Penulis sadar bahwa penyelesaian penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, maka saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan dikembangkan bagi semua pihak.

Surabaya, Agustus 2004

Penulis

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

JUDUL TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
----------------------	---

ABSTRACT	ii
-----------------------	----

KATA PENGANTAR	iii
-----------------------------	-----

DAFTAR ISI	v
-------------------------	---

DAFTAR GAMBAR	vii
----------------------------	-----

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan dasar pemikiran	I - 1
1.2 Perumusan Masalah	I - 3
1.3 Tujuan	I - 3
1.4 Metodologi Penelitian	I - 4

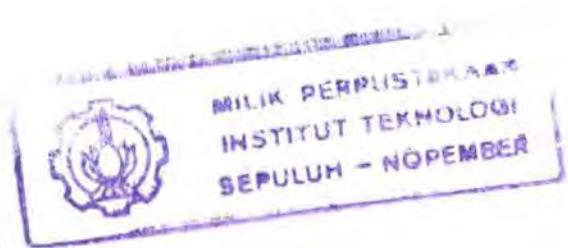
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep dasar karakteristik aliran pada berbagai aspek ratio	2 - 7
2.2. Klasifikasi aliran	2 - 11
2.3. Pembedaan aliran viskos	2 - 13
2.4. Hubungan antara tekanan statis, dinamis, dan stagnasi yang terjadi dalam airan fluida	2 - 14
2.5. Lapisan batas (boundary layer)	2 - 15
2.6. Karakteristik Boundary Layer	2 - 18

1.	Boundary Layer Thickness	2 – 18
2.	Displacement thickness	2 – 19
3.	Momentum thickness	2 – 20
4.	Shape factor	2 – 21
2.7.	Separasi (gangguan) pada aliran dua dimensi	2 – 22
2.8.	Tekanan gradient dan separasi aliran pada permukaan ellips	2 – 23
2.9.	Distribusi aliran fluida yang melewati sebuah silinder atau lingkaran	2 – 26

BAB 3 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

3.1.	Pendahuluan	3 - 29
3.2.	Pembagian proses penggerjaan CFD	3 - 31
3.3.	Proses Validasi	3 - 32
3.4.	Persamaan dasar dinamika dalam CFD	3 - 32
3.5.	Persamaan aliran viskosus (Navier – Stokes).....	3 - 34
3.6.	Proses penggerjaan CFD Ansys 5.4	3 - 45
3.7.	Pemodelan penampang lingkaran dan ellips Untuk formasi tunggal	3 - 47
3.8.	Data geometri	3 - 47



BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa aliran pada angka reynolds	4 – 54
4.2. Analisa koefisien tekanan (Cp).....	4– 87
4.3. Persamaan-persamaan lapisan batas Prandtl	4– 90

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	5 - 1
5.2 Saran	5 - 2

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Aliran fluida fiskous melewati sebuah silinder	[2]
Gambar 1.2 Aliran fluida fiskous melewati sebuah ellips.....	[2]
Gambar 2.1 Sketsa aliran melewati suatu geometris	[8]
Gambar 2.2(a) Aliran melalaui permukaan lengkung	[9]
Gambar 2.2(b) Aliran streamline dan komponen kecepatannya	[11]
Gambar 2.3 Aliran viskous incompresible laminar Melewati sebuah infinite pelat rata	[16]
Gambar 2.4 Aliran incompresible melewati suatu silinder	[16]
Gambar 2.5 Profil kecepatan aliran	[19]
Gambar 2.6 Tebal boundary layer dalam disturbance thickness / tebal perpindahan (δ) dan displacement thickness (δ^*)	[20]
Gambar 2.7 Fenomena aliran Boundary Layer dengan Pressure Gradient Yang merupakan separasi pada aliran	[22]
Gambar 2.8 Perubahan lapis batas pada silinder	[24]
Gambar 2.9 Letak separasi boundary layer	[25]
Gambar 3.1 Desain kerja CFD	[20]
Gambar 3.2 Model aliran	[33]
Gambar 3.3 Model elemen kecil tak-hingga yang tetap dalam ruang	[34]
Gambar 3.4 Gaya-gaya yang bekerja pada sumbu x pada elemen Fluida kecil tak-hingga yang bergerak	[37]
Gambar 3.5 (a) tegangan geser, (b) tegangan normal	[38]
Gambar 3.6 (a) permodelan penampang 2 D lingkaran tunggal	[48]

Gambar 3.7 Karakteristik komponen pada penampang lingkaran.....	[48]
Gambar 3.8 Pemodelan penampang 2D ellips	[49]
Gambar 3.9 Karakteristik komponen pada penampang ellips.....	[49]
Gambar 3.10 Pemodelan penampang lingkaran.....	[50]
Gambar 3.11 Pemodelan penampang ellips.....	[50]
Gambar 3.12 Geometri lingkaran.....	[50]
Gambar 3.13 Geometri ellips.....	[50]
Gambar 3.14 Bentuk pembagian area penampang lingkaran.....	[51]
Gambar 3.14 Bentuk pembagian area penampang ellips.....	[52]
Gambar 4.1 Kecepatan aliran pada angka Rn 5	[56]
Gambar 4.2 Kecepatan aliran pada angka Rn 10	[57]
Gambar 4.3 Kecepatan aliran pada angka Rn 50	[58]
Gambar 4.4 Kecepatan aliran pada angka Rn 100	[59]
Gambar 4.5 Kecepatan aliran pada angka Rn 500	[60]
Gambar 4.6 Kecepatan aliran model ellips pada angka Rn 5	[62]
Gambar 4.7 Kecepatan aliran pada angka Rn 10	[63]
Gambar 4.8 Kecepatan aliran model ellips pada angka Rn 50	[64]
Gambar 4.9 Kecepatan aliran pada angka Rn 100	[65]
Gambar 4.10 Kecepatan aliran model ellips pada angka Rn 500	[66]
Gambar 4.11 Vektor plot kecepatan model ellips pada angka Rn 5	[68]
Gambar 4.12 Flow trace pada angka Rn 5	[68]
Gambar 4.13 Vektor plot kecepatan pada angka Rn 10	[70]
Gambar 4.14 Flow trace pada angka Rn 10	[70]
Gambar 4.15 Vektor plot kecepatan angka Rn 50	[72]

Gambar 4.16 Flow trace pada angka Rn 50	[72]
Gambar 4.17 Vektor plot kecepatan angka Rn 100	[74]
Gambar 4.18 Flow trace pada angka Rn 100	[74]
Gambar 4.19 Vektor plot kecepatan angka Rn 500	[76]
Gambar 4.20 Flow trace pada angka Rn 500	[76]
Gambar 4.21 Vektor plot kecepatan lingkaran pada Rn 5	[78]
Gambar 4.22 Flow trace pada angka Rn 5	[78]
Gambar 4.23 Vektor plot kecepatan pada angka Rn 10	[80]
Gambar 4.24 Flow trace pada angka Rn 10.....	[80]
Gambar 4.25 Vektor plot kecepatan pada angka Rn 50	[82]
Gambar 4.26 Flow trace kecepatan pada angka Rn 50	[82]
Gambar 4.27 Vektor plot kecepatan pada angka Rn 100	[84]
Gambar 4.28 Flow trace kecepatan pada angka Rn 100	[84]
Gambar 4.29 Vektor plot kecepatan pada angka Rn 500	[86]
Gambar 4.30 Flow trace kecepatan pada angka Rn 500	[86]
Gambar 4.31 Terminologi S pada penampang model	[87]
Gambar 4.32 Grafik Cp model lingkaran ada angka Rn 5, 10, 50, 100 dan 500	[88]
Gambar 4.33 Grafik Cp model ellips ada angka Rn 5, 10, 50, 100 dan 500	[89]

BAB 1

PENDAHULUAN

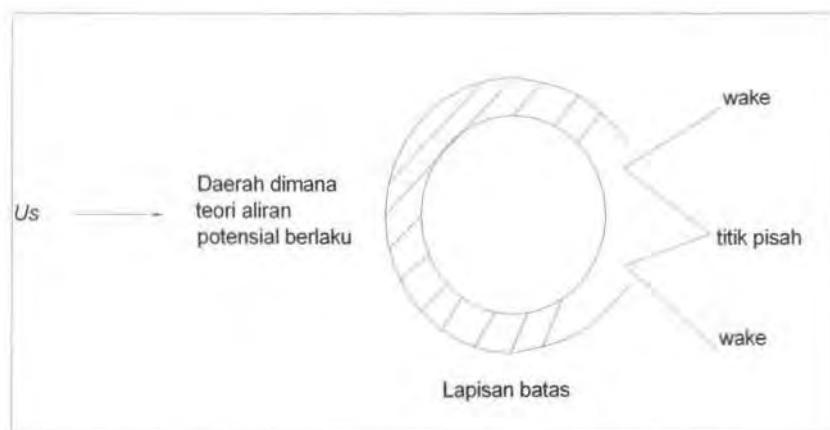
BAB 1

PENDAHULUAN

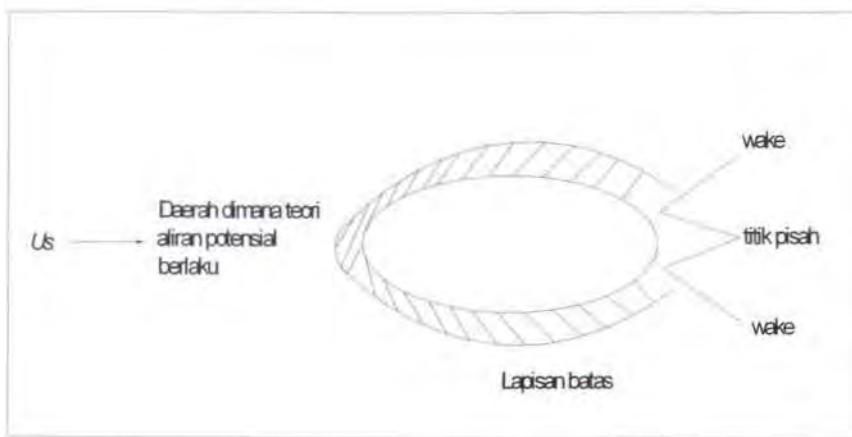
1.1. Latar Belakang dan Dasar Pemikiran

Keadaan transisi dari pola aliran laminar menjadi turbulen untuk penampang lingkaran dan ellips tergantung dari beberapa faktor diantaranya adalah viskositas fluida, kecepatan, tekanan dan harga Reynolds Number yang ditentukan. Bila kecepatan aliran bertambah atau viskositasnya berkurang, gangguan atau perubahan akan terus terlihat dengan jarak hilir (*downstream distance*) yang semakin besar dan akhirnya suatu keadaan peralihan akan tercapai (Reuben, 1993). Keadaan peralihan ini bergantung pada faktor diatas yang menyangkut bentuk geometri aliran, misalnya pada gradien tekanan dengan harga Re 5, 10, 50, 100 dan 500.

Efek viskos yang menimbulkan gejala pemisahan aliran (*flow separation*). Dalam hal ini sebuah garis arus yang semula menempel pada batas padat terlepas dan membentuk sebuah wake besar sedemikian rupa sehingga disebelah hilir titik pemisahan itu aliran netto tidak berkembang (Reuben, 1993). Lokasi titik pemisahan terjadi pada pojok-pojok yang tajam, misalnya : aerofoil, sedangkan pada bentuk geometri lingkaran aliran yang terjadi dimana letak titik terjadi tergantung pada berkembangnya lapisan batas. Dibawah ini tampak gambar penampang lingkaran dengan gejala pemisahan dan dispasi energi di dalam *wake*.



Gambar 1.1 Aliran fluida viscous melewati sebuah silinder

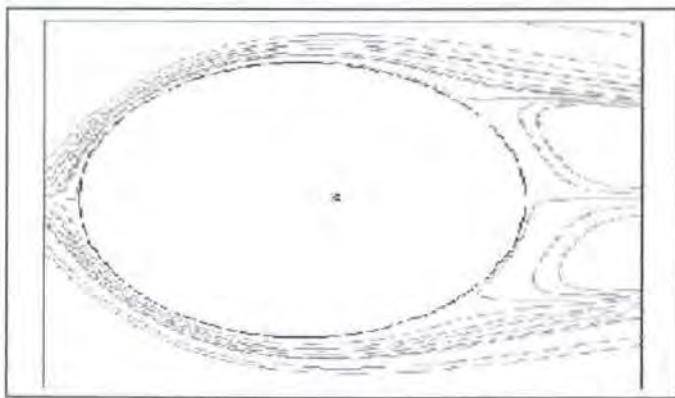


Gambar 1.2 Aliran fluida viscous melewati sebuah ellips (Fox, 1976)

Aliran yang melalui hambatan atau halangan sebuah lingkaran dan silinder merupakan kombinasi antara aliran rektlinier dengan sebuah doublet, apabila doublet ini berharga $C = \mu_s R^2$. Yang diperoleh dengan menetapkan $u = -\partial\phi / \partial x = 0$ pada $x = R$ dan $y = 0$ dalam ekspresi Φ untuk aliran rektlinier dan untuk doublet dari persamaan dibawah ini :

$$\Phi_D = C \frac{\cos \theta}{r} = \frac{Cx}{x^2 + y^2}$$

Dibawah ini ditunjukkan aliran yang melewati lingkaran atau silinder.



Gambar 1.3 Arus aliran fluida melewati sebuah lingkaran
(Duncan, Thomas & Young, 1970)

1.2. Perumusan Masalah

Pengaruh karakteristik yang terjadi pada penampang lingkaran dan ellips pada pola aliran laminar hingga pada titik transisi dengan harga Re rendah yang telah ditentukan sebesar 5, 10, 50, 100 dan 500.

1.3. Tujuan

Mempelajari karakteristik perubahan aliran laminar yang terjadi, yang disebabkan pengaruh wake serta aliran vorteks disekitarnya untuk penampang lingkaran dan ellips dengan berbagai harga Reynolds Number rendah.

- a. Dapat mengetahui letak transisi dan fenomena yang terjadi dengan menentukan harga angka Reynolds antara 5, 10, 50, 100 dan 500 sehingga kita dapat menentukan pula kecepatan yang optimal pada benda dengan bentuk penampang

lingkaran dan ellips yang bergerak dalam fluida dengan memperhatikan gradien tekanan serta efek viskositasnya.

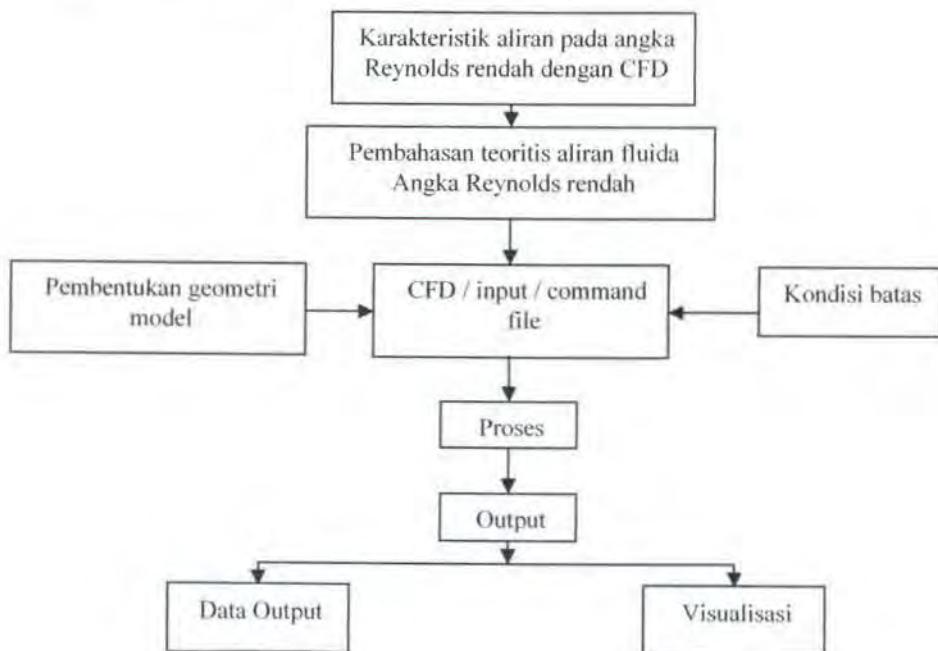
- b. Dapat menentukan perubahan aliran pada lapisan batas yang berupa hambatan hingga terjadinya perubahan gradien kecepatan pada permukaan penampang benda.

1.4. Metodologi Penelitian

Studi Literatur

Dilakukan studi literatur dengan menitikberatkan pada teori yang menjelaskan penelitian yang dilakukan serta acuan umum dan khusus meliputi :

- Prinsip-prinsip dasar aliran fluida.
- Teori mekanika fluida yang membahas masalah aliran yang melewati penampang lingkaran dan ellips.
- Teori boundary-layer.
- Teori Computational Fluid Dynamics (CFD)



Modelling (CFD) Geometri

Pemodelan yang akan digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini adalah model geometri lingkaran dan ellips dengan perubahan yang berbeda pada harga Reynolds Number yang telah ditentukan yaitu : 5, 10, 50, 100 dan 500 sesuai dengan bentuk dari setiap permodelan diatas. Dimana proses penggerjaan analisa data digunakan program *Computational Fluid Dynamic.*(Frank, 1997).

Solusi Permasalahan dengan CFD

Dilakukan suatu penyelesaian bentuk simulasi distribusi kecepatan dan tekanan pada berbagai potongan penampang geometri lingkaran maupun ellips. Perubahan kondisi batas hasil running program CFD tersebut akan tampak perubahan yang harus terjadi sesuai dengan bentuk geometri serta angka Reynolds-nya.

Sintesa dan Analisa

Pada tahap ini akan dilakukan analisa terhadap bentuk distribusi kecepatan, tekanan, boundary layer thickness (δ), dan displasemen thickness (δ^*) dari hasil simulasi CFD dan dibandingkan dengan hasil perhitungan dari rumus empiris yang diperoleh dari teks book.



Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan ini menerangkan isi dari penulisan tugas akhir.

BAB 1 Pendahuluan

Memuat latar belakang dan dasar pemikiran dalam penulisan tugas akhir yang berisi tentang perumusan masalah, tujuan, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB 2 Tinjauan Pustaka

Menerangkan tentang konsep dasar karakteristik aliran pada berbagai aspek ratio, klasifikasi aliran, pembedaan aliran viscous serta hubungan antara tekanan statis, dinamis, lapisan batas, karakteristik boundary layer, separasi, tekanan dan distribusi aliran fluida pada permukaan model.

BAB 3 Computational Fluid Dynamics

Menerangkan proses pengerjaan CFD, persamaan aliran, pemodelan penampang lingkaran dan ellips.

BAB 4 Analisa dan Pembahasan

Pembahasan serta analisa hasil eksperimen aliran angka Reynolds rendah dari proses pengerjaan CFD yang berupa data, grafik serta gambar visualisasi.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Hasil dari eksperimen dilakukan suatu definisi hasil yang menerangkan fenomena aliran pada penulisan tugas akhir dan saran untuk kelanjutannya.

Daftar Pustaka

Lampiran

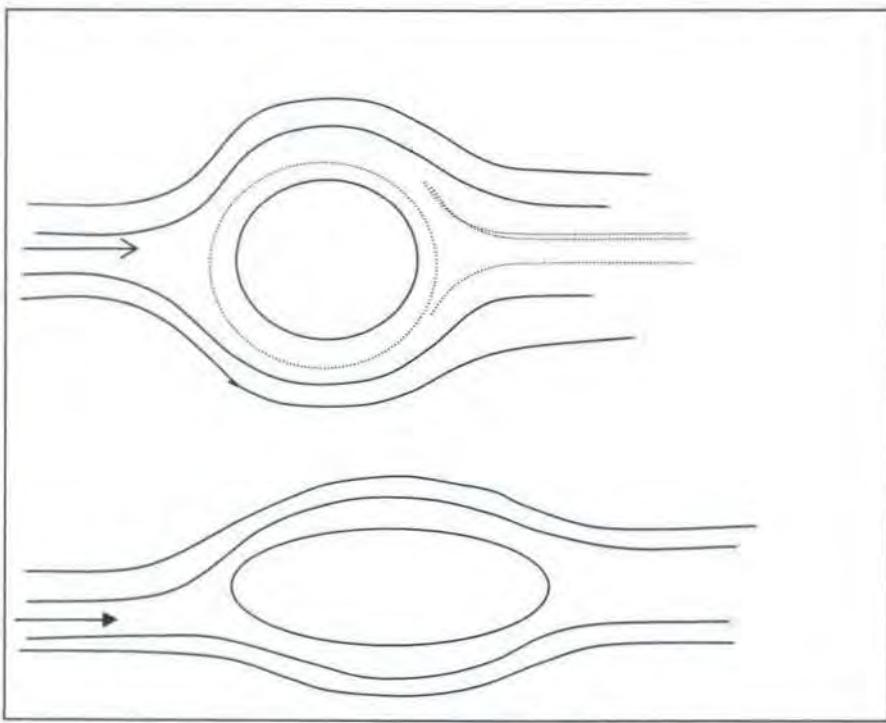
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

BAB 2**TINJAUAN PUSTAKA****2.1. Konsep Dasar Karakteristik Aliran Pada Berbagai Aspek Ratio**

Pembahasan tentang teori sederhana untuk menganalisa aliran luar yang bilangan Reynoldsnya antara 1 sampai kira-kira 1000 masihlah sangat kurang. Aliran lapisan geser tebal semacam itu biasanya ditelaah dengan percobaan atau dengan membuat model numeriknya dengan komputer digital yaitu dengan program CFD. Untuk aliran lewat benda tumpul, bahkan untuk bilangan Reynolds yang tinggi sekalipun, terjadi perbedaan dalam konsep penambalan kental-encer, dimana aliran (*eksternal*) atau aliran tak terbatas bergerak di sekeliling permukaan benda padat (Frank, 1997).

Aliran itu bisa meluas dengan bebas, betapapun tebalnya lapisan kentalnya. Jadi, di tempat agak jauh dari benda tersebut alirannya encer (*inviscid*). Dalam metode analisis yang sangat penting, yang disebut *teori lapisan batas*, yang mana gerak lapisan kental di dekat dinding ditentukan dan kemudian hasilnya ditambahkan pada aliran encer di bagian luar. Untuk aliran yang melalui sebuah permukaan lengkung sedemikian rupa sehingga aliran meluas, profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan kelengkungan) yang dimulai di tempat gradien tekanan menjadi positif (Reuben, 1993). Penambalan itu semakin berhasil apabila bilangan Reynoldsnya semakin besar. Hal ini ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.1. Sketsa aliran melewati suatu geometris

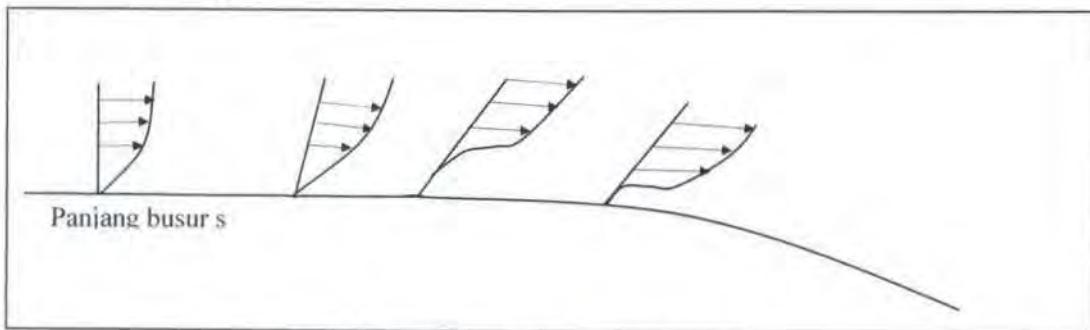
Gambar sketsa diatas menunjukkan dua sketsa aliran yang melalui sebuah benda dua dimensi yang tumpul. Dalam aliran yang tampak diatas lapisan-batasnya tipis di sisi muka benda itu, tempat tekanannya berkurang sepanjang permukaan (gradien tekanan menguntungkan). Tetapi pada bagian belakang lapisan batas itu mengalami tekanan yang semakin besar (gradien tekanan merugikan) dan pecah atau terpisah menjadi ombak buritan (Victor, 1990).

Sebuah benda yang bergerak dalam fluida yang sama (*fluida dalam keadaan diam*), ada dua macam gaya bekerja dipermukaan benda itu. Yang menyebabkan gaya-gaya dipermukaan benda ini adalah tekanan dan geseran viscous. Untuk bagian permukaan benda yang luasnya sangat kecil (*infinitesimal area*), gaya tekanan mempunyai arah normal terhadap bagian itu sedangkan gaya geseran viscous sejajar atau menyinggung bagian tersebut. Komponen gaya-gaya yang searah dengan

arah gerak benda (atau arah gerak fluida terhadap benda) apabila dijumlahkan untuk keseluruhan permukaan benda akan menghasilkan hambatan profil atau hambatan bentuk (*form drag*). Pada aerofoil, gaya angkat ini menimbulkan gaya hambatan yang disebut *hambatan terinduksi (induced drag)*, (Reuben, 1993).

Hambatan profil bisa terjadi karena geseran viskos, tekanan atau kombinasi keduanya. Proses pembentukan lapisan batas divisualisasikan dengan membayangkan aliran sepanjang sebuah pelat rata. Dengan kecepatan arus bebas u_s ketika fluida mencapai tepi sebelah depan, tegangan geser yang besar terbentuk dekat permukaan pelat karena partikel-partikel fluida yang tiba terpaksa berhenti dan partikel normal terhadap pelat dihambat oleh geseran viskos. Daerah tempat aliran mengalami hambatan ini disebut *lapisan batas*, dan ketebalannya dinyatakan dengan δ . Laju perubahan kecepatan menentukan gradien kecepatan dipermukaan pelat maka tegangan geser untuk lapisan batas laminar adalah :

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} \quad [2-1]$$



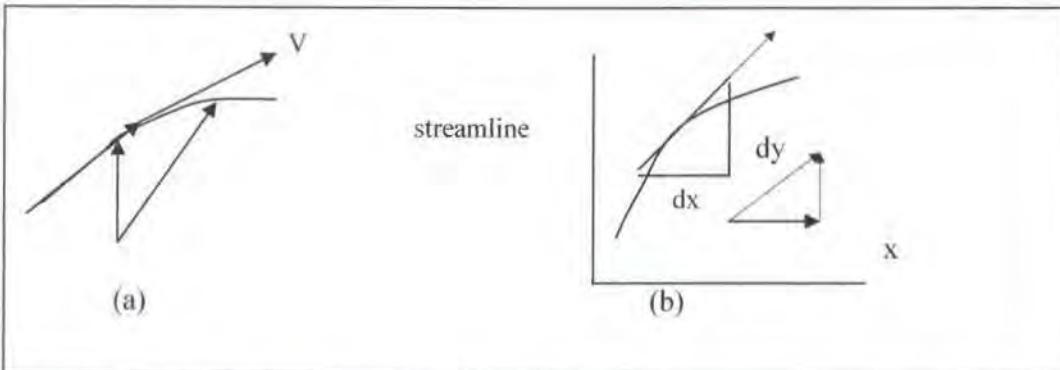
Gambar 2.2. Aliran melalui permukaan lengkung

Garis arus atau *stream line* adalah garis yang menjadi tempat singgungan vektor-vektor kecepatan. Dimana setiap saat $V = V(x, y, z)$ yang tampak pada gambar 2 tampak bahwa V sejajar dengan dr , sebuah segmen streamline sehingga $V_x dr = 0$, dengan V dan r dimana V adalah vektor kecepatan yang diuraikan dalam 3 komponen

kecepatan u , v dan w dalam arah x , y dan z sebagai $\mathbf{V} = iu + jv + kw$. Kalau diuraikan perkalian silang diatas menunjukkan streamline :

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w}$$

[2-2]



Gambar 2.3. Streamline dan komponen kecepatannya (a) Segmen pada streamline (b) komponen kecepatan

Dalam aliran 2 dimensi, persamaan untuk streamline bisa dijelaskan dalam fungsi-fungsi arus, dimana harga fungsi arus ψ yang berbeda menyatakan streamline yang berbeda pula. Komponen x dan y dari kecepatan (u dan v) didapatkan dari fungsi sebagai berikut :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad [2-3]$$

dan

$$u = + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad [2-4]$$

karena $\psi = \psi(x, y)$, total diferensial terhadap ψ adalah :

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy$$

dari persamaan [2-3] diferensial ini adalah $d\psi = vdx - udy$

Streamline dari persamaan diatas adalah garis fungsi arus yang berharga konstan atau sama dengan nol. Dalam sistem koordinat polar (r, θ) dengan komponen kecepatan v_r positif dengan arah radial keluar dan v_θ dengan arah tangensial yang berlawanan arah jarum jam.

$$v_r = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad [2-5]$$

dan

$$v_\theta = + \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad [2-6]$$

karena $\psi = \psi(x, y)$, total diferensial terhadap ψ adalah :

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy$$

dari persamaan [2-4] diferensial ini adalah $d\psi = vdx - udy$

Streamline dari persamaan diatas adalah garis fungsi arus yang berharga konstan atau sama dengan nol. Dalam system koordinat polar (r, θ) dengan komponen kecepatan v_r positif dengan arah radial keluar dan v_θ dengan arah tangensial yang berlawanan arah jarum jam (Schetz, 1996).

2.2. Klasifikasi Aliran

Banyak kriteria yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan fluida. Sebagai contoh, aliran dapat digolongkan sebagai aliran *steady* atau *unsteady*, satu-, dua-, atau tiga dimensi, seragam atau tidak seragam, laminar atau turbulen, dan dapat mampat atau tidak dapat mampat. Aliran disebut *steady* bila kondisi-kondisi dalam aliran tidak bervariasi terhadap waktu; aliran yang tidak demikian tentu saja disebut *unsteady* (Reuben, 1993).

Sehingga definisi dari aliran satu dimensi adalah aliran dimana satu parameter fluida dan aliran (kecepatan, tekanan dan temperatur, kerapatan serta viskositas) dimana aliran fluida sejati tidak bisa sepenuhnya satu-dimensi karena kecepatan di permukaan batas dan terhadap permukaan batas harus nol (Duncan, Thomas & Young, 1970). Aliran *dua-dimensi* adalah aliran yang sama dalam bidang sejajarnya dan tidak satu dimensi atau aliran yang parameter-parameter fluida dan alirannya dinyatakan dengan harga rata-rata dari harga dalam suatu dimensi ruang. Sedangkan aliran tiga-dimensi adalah aliran dimana parameter-parameter fluida atau alirannya bervariasi dalam arah-arah x, y, dan z dalam koordinat cartesius (Fox, 1976).

Dalam mekanika fluida aliran viskos dibedakan menjadi 2 aliran yaitu aliran laminar dan turbulen. Dimana aliran laminar merupakan aliran yang struktur alirannya ditunjukkan dengan perubahan gerak halus di dalam aliran/struktur yang berupa gerakan partikel-partikel fluida berlapis-lapis. Sedangkan untuk jenis struktur dari aliran turbulen merupakan suatu gerakan partikel-partikel fluida yang acak (random), tiga dimensi. Dimana partikel yang bergerak tersebut saling mengisi pada badan aliran.

Gerakan acak yang ditimbulkan oleh aliran turbulen serta fluktuasi kecepatan tiga dimensi menyebabkan terjadinya momentum melintasi aliran utama dapat meningkatkan gaya geser efektif. Sehingga pada aliran turbulen tidak terdapat korelasi yang universal antara medan tekanan dan medan kecepatan rata-rata. Hal ini

menyebabkan analisa aliran turbulen hanya dapat dilakukan dengan setengah teori empiris dan data- data hasil percobaan.

Parameter yang mempengaruhi terjadinya aliran laminar atau turbulen adalah sebagai berikut :

1. Ukuran panjang medan aliran seperti ketebalan lapisan batas atau diameter pipa.
2. Kecepatan aliran
3. Viskositas fluida.

Ketiga parameter diatas dapat dikombinasikan menjadi satu parameter yang dikenal dengan bilangan Reynolds (Fox, 1976).

2.3. Pembedaan Aliran Viskos

Aliran fluida baik fluida *incompressible* maupun fluida *compressible*, jika dilihat atau dikaji dari pengaruh viskositasnya, dapat dibedakan menjadi dua aliran yaitu aliran viskos (*viscous flow*) dan aliran non viskos (*non viscous flow*). Apabila suatu aliran fluida dimana efek dari viskositasnya diabaikan maka aliran fluida tersebut merupakan aliran non viskos. Pada aliran non viskos (*inviscid flow*) tersebut, viskositas dari fluida tersebut, μ , diasumsikan nol atau diabaikan harganya, walaupun pada kenyataannya fluida dengan viskositas yang nol atau diabaikan itu tidak ada di dunia ini (Reuben, 1993).

Namun, sebagian besar analisa terhadap aliran fluida dilakukan dengan mengabaikan gaya viskos atau gaya geser dan hal ini akan mempermudah perhitungan dan analisa serta membawa ke hasil yang bermakna untuk keilmuan atau suatu proyek keilmuan atau dengan kata lain hasil yang diperoleh tersebut masih bisa diterima dan mempunyai dasar yang cukup kuat.

Pada aliran viskos tidak terdapat slip yang terjadi pada *boundary*. Di dalam aliran viskos, viskositas fluida terpengaruhi secara langsung oleh gradien dari kecepatan dan *shear stress* yang ada di dalam aliran fluida tersebut. Hal ini dirumuskan dalam perumusan sebagai berikut :

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}$$

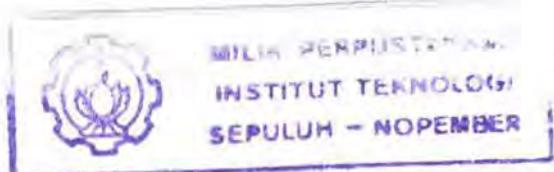
Dimensi τ adalah $[F/L^2]$, dimensi du/dy adalah $[1/t]$, sehingga μ mempunyai dimensi $[Ft/L^2]$. Bila dinyatakan dengan hukum kedua Newton tentang gerak, μ , berdimensi $[M/L.t]$ (Frank, 1997).

2.4. Hubungan Antara Tekanan Statis, Dinamis, dan Stagnasi Yang Terjadi Dalam Aliran Fluida

Perlakuan yang terjadi pada aliran fluida *steady* dan *incompressible* akan berlaku dalam persamaan Bernoulli untuk menyatakan hubungan antara kecepatan dan tekanan di sepanjang aliran yang terjadi.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{konstan} \quad [2-7]$$

Dalam suatu aliran fluida membagi dua macam tekanan yang dapat dinyatakan sebagai karakteristik aliran yaitu tekanan statis dan tekanan stagnasi. Dimana tekanan statis merupakan tekanan aliran fluida yang diukur dengan menggunakan suatu parameter yang bergerak bersamaan dengan aliran.



Sedangkan Tekanan stagnasi adalah tekanan yang diukur dengan cara melakukan perlambatan aliran sehingga kecepatannya sama dengan nol dengan proses tanpa gesekan.

Jika tekanan statis adalah P , kecepatan fluida pada titik itu adalah V , dan jika tekanan stagnasi adalah $P_{stagnasi} = P_0$, kecepatan fluida pada titik tersebut adalah V_0 , maka :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 \quad [2.8]$$

dengan menggunakan asumsi bahwa tidak terdapat perbedaan ketinggian ($z = z_0$), maka :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} \quad [2.9]$$

Karena kecepatan di titik stagnasi adalah sama dengan nol ($V_0 = 0$), maka:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{P_0}{\rho}$$

sehingga,

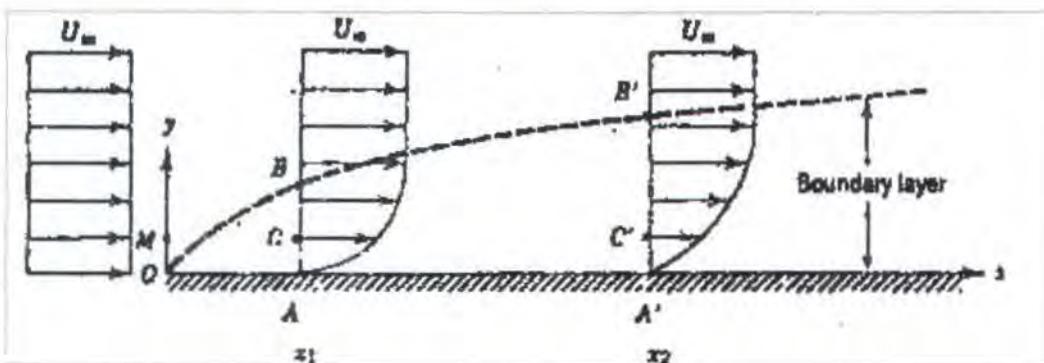
$$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad [2.10]$$

dimana $\frac{1}{2} \rho V^2$ = tekanan dinamis. [Schetz, 1996]

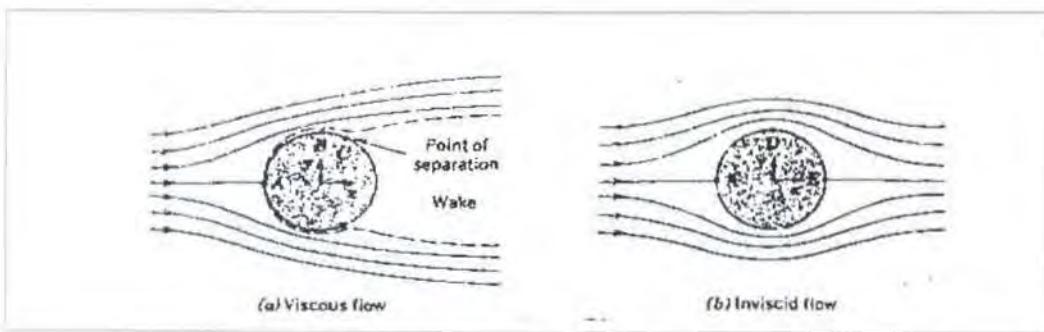
2.5. Lapisan Batas (Boundary Layer)

Pada aliran eksternal, yaitu aliran fluida yang melewati suatu *body* atau *solid* yang berada pada suatu ruang lingkup yang tanpa batas, apabila aliran fluida tersebut melewati suatu *solid surface*, maka akan membentuk suatu lapisan tipis di sekitar *solid surface* tersebut dimana terjadi distribusi kecepatan (*velocity distribution*) karena

terpengaruh oleh kontur permukaan *body* yang dilewati oleh aliran tersebut. Menurut daerahnya, lapisan tipis (lapisan batas) yang terjadi di *solid surface*, oleh L.Prandtl 1904 (didasarkan dari Schlichting 1979) dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah di dalam *boundary layer* dan daerah di luar *boundary layer*). Dibawah ini tampak perubahan lapisan tipis pada aliran *incompressible* yang melewati suatu *semi-infinite flat plate* dan aliran yang melewati suatu silinder.



Gambar. 2.3 Incompressible laminar viscous flow melewati sebuah infinite flat plate.



Gambar.2.4. (a) Aliran Viskous (b) Aliran invsid
Incompressible flow melewati suatu silinder

Permulaan aliran suatu fluida itu bergerak dengan distribusi kecepatan yang sama atau *uniform* (U_0) ketika melewati suatu *solid surface* aliran tersebut mengalami distribusi kecepatan yang berbeda yang dipengaruhi oleh kontur dari *solid surface* tersebut. Distribusi suatu kecepatan ini dimulai dari titik di *solid surface* tersebut yang

berupa lingkaran (silinder) dimana aliran fluida tersebut memiliki kecepatan nol kemudian semakin besar ketika menjauhi permukaan dari *body* tersebut. Harga kecepatan ini semakin besar sampai mencapai suatu harga dimana sama dengan harga kecepatan awal yaitu *free stream* (U_∞) atau $0,99 U_\infty$ [3] (Schliting, 1979).

Sebagai penjelasan singkat tentang lapisan tipis yang biasa disebut *boundary layer* tersebut dapat digambarkan sebagai berikut. Suatu aliran fluida yang memiliki *properties* tertentu mengalir dalam suatu ruang yang tanpa batas (aliran eksternal). Aliran tersebut masih dalam kondisi yang tidak berubah atau masih *uniform* (seragam) untuk semua titik pada aliran fluida tersebut dimana tidak terdapat efek friksi dari permukaan *solid* apapun dan efek viskositas (dimana efek viskositas diabaikan). Kondisi tersebut diatas terjadi di luar *boundary layer*. Pada kondisi ini partikel-partikel fluida yang ada pada aliran tersebut tidak mengalami gerakan rotasi (*irrotational*) hanyalah gerakan translasi (Reuben, 1993).

Perubahan terjadi aliran fluida ketika menerima suatu gangguan berupa suatu benda *solid*, partikel-partikel tersebut mulai mengalami gerakan yang bukan translasi murni lagi yang terjadi mulai dari suatu titik pada permukaan *solid* tersebut. Hal ini terjadi di dalam daerah *boundary layer*. Pada kondisi ini, partikel-partikel fluida yang mengalir mengalami gerakan rotasi yang disebabkan oleh efek friksi dari permukaan solid dan efek viskositas yang ada. Hal ini biasa disebut aliran *rotational*. Pada permukaan solid aliran fluida berharga nol karena efek friksi yang terjadi pada permukaan tersebut (Schetz, 1996).

Kemudian terjadi perubahan lagi ketika menjauhi permukaan. Hal ini dikenal dengan adanya *velocity gradient* pada aliran fluida yang melewati kontur dari permukaan *solid* tersebut. Distribusi kecepatan ini akan semakin besar dengan

semakin ke belakang menurut kontur dari permukaan tersebut. Dengan demikian tebal dari *boundary layer* yang terbentuk atau yang berkembang akan semakin besar sampai ke belakang dari benda tersebut (permukaannya). Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.3 untuk penunjukkan berkembangnya *boundary layer* pada permukaan pelat. Hal diatas akan sama terjadi dengan berkembangnya *boundary layer* yang terjadi pada silinder atau ellips.

2.6. Karakteristik Boundary Layer

Boundary layer merupakan suatu lapisan tipis pada *solid surface* tempat fluida mengalir dimana efek dari friksi dan gaya inersia sangat berpengaruh. *Boundary layer* mempunyai beberapa karakteristik yang akan dijelaskan berikut ini :

1. *Boundary layer thickness (δ).*

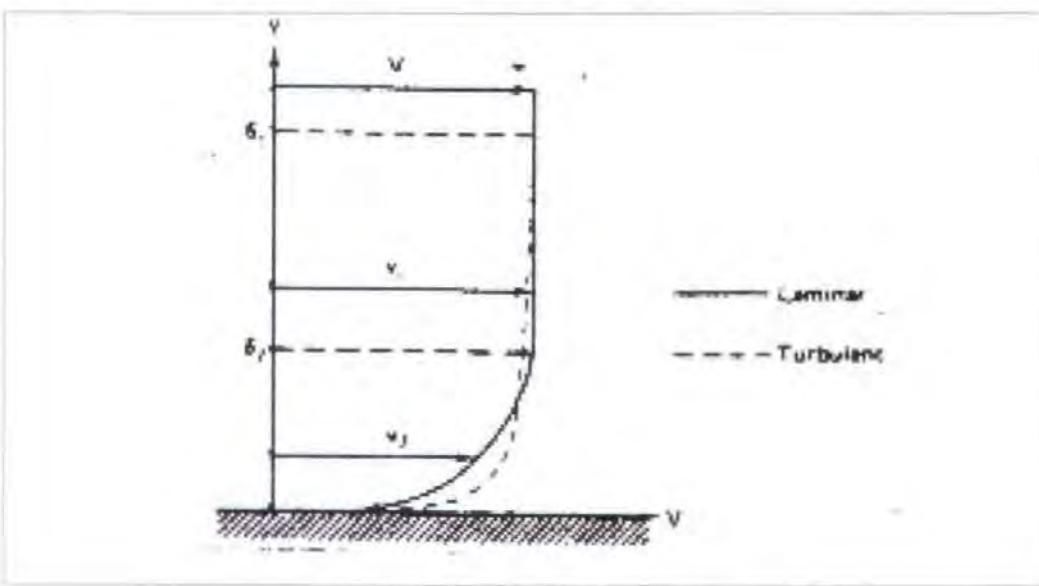
Ketebalan lapis batas yang terbentuk pada permukaan *solid body* yang dialiri fluida disebut *boundary layer thickness*. Diukur dari permukaan *solid body* ke arah normal sampai pada titik dimana kecepatannya mencapai harga 99% dari kecepatan aliran bebas ($u = 0.99U$). Besarnya tebal *boundary Layer*nya (δ) ini tidak sama untuk aliran laminar dan turbulen *Boundary Layer*.

$$\text{Untuk aliran laminar } \textit{boundary layer} = \frac{\delta}{x} = \frac{C}{\sqrt{\text{Re}_x}}$$

$$\text{Untuk aliran turbulent } \textit{boundary layer} = \frac{\delta}{x} = \frac{C}{[\text{Re}_x]^{0.2}}$$

Pada tiap titik disepanjang sumbu x harga kecepatan fluida di dalam lapis batas bervariasi, yaitu pada jarak $y = 0$ sampai $y = \delta$, sehingga dapat dikatakan kecepatannya sebagai fungsi y ($u = u(y)$). Hal inilah yang nantinya dikenal dengan profil kecepatan (*velocity profile*). Profil kecepatan ini akan mempunyai bentuk yang

berbeda untuk harga x yang berbeda, sehingga untuk aliran turbulen profil kecepatannya lebih gemuk jika dibandingkan dengan profil kecepatan aliran laminar. Hal ini disebabkan oleh adanya tambahan momentum akibat pecahnya *turbulent spot* yang terbentuk sepanjang daerah transisi (Schetz, 1996)



Gambar 2.5. Profil kecepatan aliran

2. Displacement thickness (δ^*)

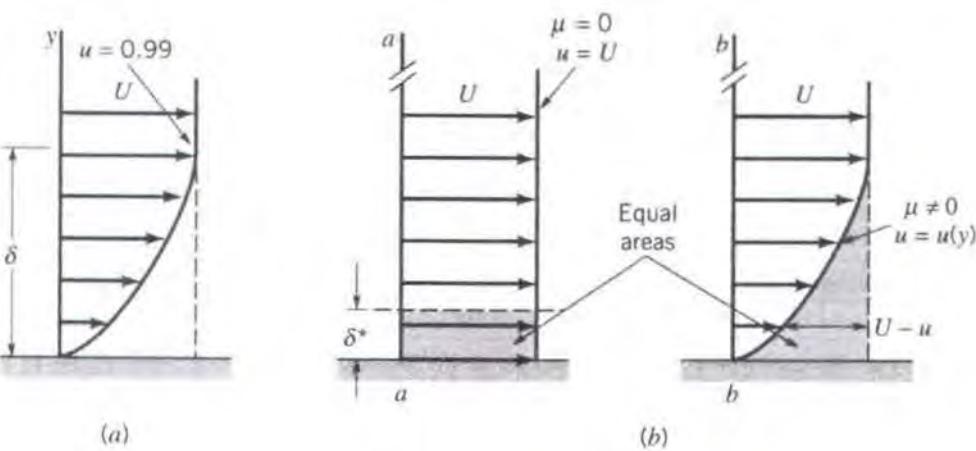
Menunjukkan adanya defisit massa sebesar $\int_0^\infty \rho(U-u)dy$ didekat *solid surface*

karena pengaruh gaya viskos. Didefinisikan sebagai jarak sejauh mana *solid surface* dipindahkan agar laju alir massa sesungguhnya tetap sama dengan di dalam aliran hipotesis tanpa gesekan.

Persamaannya dituliskan sebagai:

$$\rho U \delta^* = \int_0^\infty \rho(U-u)dy$$

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad [2.11]$$



Gambar 2.6. (a) Tebal boundary layer dalam disturbance thickness (δ)
(b) displacement thickness (δ^*).

3. Momentum thickness (θ).

Didefinisikan sebagai ketebalan lapisan fluida dengan kecepatan (u), dimana flux momentumnya sama dengan defisit momentum pada *boundary layer* (Duncan, Thomas & Young, 1970).

Penurunan momentum atau momentum yang hilang adalah :

$$\rho u(U - u)dy \quad [2.12]$$

Total kehilangan momentum pada *boundary layer* dihitung dari $y = 0$ sampai $y = y_1$ adalah :

$$\int_0^{y_1} \rho u(U - u)dy \quad [2.13]$$

Dengan mengasumsikan kehilangan massa aliran sebesar $\rho_e U^2$ dan ketebalan Θ , maka :

$$\text{Kehilangan monentum aliran} \approx \rho_e U^2 \theta \quad [2.14]$$

Dengan mensubtitusikan kedua persamaan diatas, akan diperoleh :

$$\rho_e U^2 \theta = \int_0^{y_1} \rho u (U - u) dy$$

$$\theta = \int_0^{y_1} \frac{\rho u}{\rho_e U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad [2.15]$$

karena massa jenis fluida tidak berubah ($\rho = \rho_e$), sehingga diperoleh persamaan :

$$\theta = \int_0^{y_1} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad [2.16]$$

4. Shape factor (H)

Perbandingan antara *displacement thickness* (δ^*) dan *momentum thickness* (θ) merupakan faktor bentuk (*shape factor* (H)) dari profil kecepatan yang terbentuk pada permukaan kontur saat dialiri oleh fluida.

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad [2.17]$$

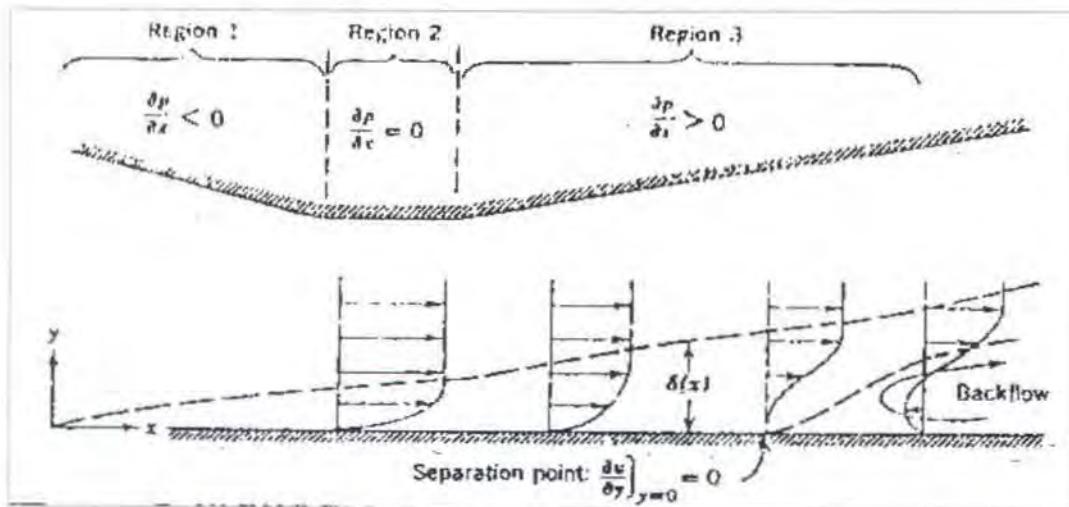
Untuk aliran dengan *zero pressure gradient*, harga *shape factornya* :

- Untuk aliran laminar, $H = 2.6$, dan separasi terjadi pada $H = 3.5$.
- Untuk aliran turbulen, $H = 1.3$, dan separasi terjadi pada $H = 2.5$.

2.7. Separasi (gangguan) pada aliran dua dimensi

Setiap aliran fluida untuk aliran viskos yang melewati suatu gangguan berupa benda atau suatu *solid surface*, alirannya akan mengalami separasi karena *vorticity* yang terjadi besar sehingga energi yang ada atau momentum yang ada tidak bisa mengatasi *adverse pressure gradient* dan efek friksi yang terjadi pada *solid surface* tersebut. Dibandingkan pada aliran fluida yang melewati *flat plate*. Seberapapun panjang dari *flat plate*, tidak akan terjadi separasi aliran karena tidak ada *pressure gradient* ($\frac{\partial p}{\partial x} = 0$).

Aliran dua dimensi yang laminar tersebut akan berubah oleh efek friksi yang ada pada permukaan dari *solid*. Selain itu, aliran laminar tersebut juga dirusak oleh adanya tekanan balik yang terjadi di permukaan solidnya. Separasi ini terjadi dimulai pada titik dimana perubahan kecepatan ke arah y tidak ada atau nol. Hal ini dapat dilihat di dalam gambar 2.7 di bawah ini (Reuben, 1993)



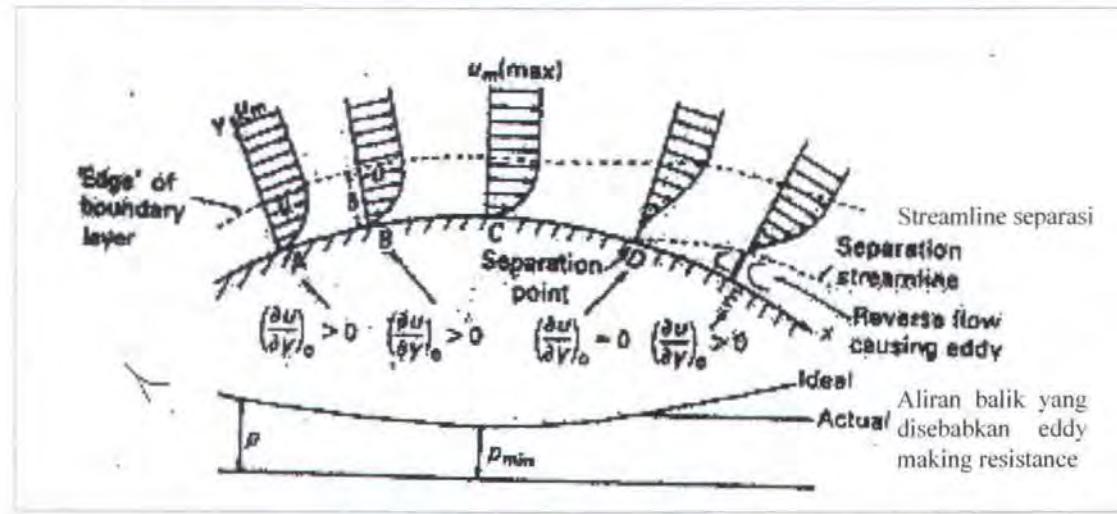
Gambar 2.7. Fenomena aliran Boundary Layer dengan Pressure Gradient yang merupakan separasi pada aliran

Vorticity yang terjadi pada titik ini sangat besar sehingga momentum yang ada mulai dirusak oleh *vorticity* tersebut dan terjadilah *vortex*. Kemudian *vortex* tersebut semakin besar dan terjadilah separasi. Ada dua daerah yang ada pada daerah separasi ini yaitu daerah laminar yang terseparasi dan daerah resirkulasi. Daerah separasi tersebut semakin ke belakang semakin besar sampai pada suatu titik di belakang tersebut dimana alirannya sudah sehat kembali atau sudah kembali ke kondisi paralel (alirannya sudah paralel), dan hal ini dikenal dengan *reattachment* (Reuben, 1993).

Titik *reattachment* ini energi yang terdapat di dalam aliran fluida ini sudah dapat mengatasi *adverse pressure gradient* yang terjadi sebelumnya atau dengan kata lain, energi atau momentumnya sudah mendapatkan tambahan kembali dari kondisi *free stream*-nya. Namun, aliran ini sudah berubah menjadi aliran yang turbulen karena penambahan momentum yang ada tersebut melebihi dari kondisi laminarnya. Aliran yang turbulen ini baik sekali untuk mengatasi *adverse pressure gradient* (Fox, 1976).

2.8. Tekanan gradient dan separasi aliran pada permukaan ellips

Pada aliran fluida yang melalui suatu permukaan, bila tekanan di luar lapisan batas tetap konstan, maka tidak ada pengaruh yang ditimbulkan pada lapisan batas tersebut. Tetapi bila tekanan berubah dengan bertambahnya jarak maka akan memperngaruhi kondisi lapis batas.



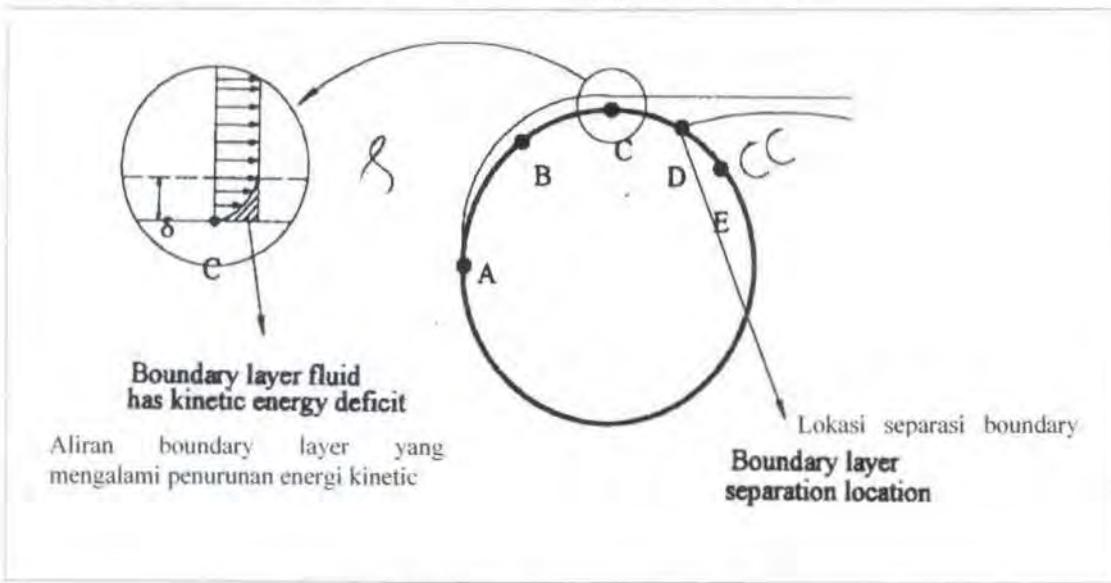
Gambar 2.8. Perubahan lapis batas pada silinder

Diupamakan aliran fluida melewati suatu permukaan lengkung atau ellips, seperti pada gambar diatas, dimana jari-jari kelengkungan jauh lebih besar daripada ketebalan lapis batas maka kecepatannya akan dipercepat hingga mencapai harga kecepatan maksimum di titik C, dimana pada titik ini tekanannya berharga minimum. Dari titik A ke titik C gradien tekanannya berharga negatif dan gaya tekan yang bekerja pada elemen fluida di dalam lapis batas bekerja searah aliran. Pada permukaan lengkung sumbu x adalah sumbu sepanjang permukaan lengkung sedangkan sumbu y adalah sumbu yang tegak lurus sumbu x (Schetz, 1996).

Ketika mencapai titik C, tekanan akan naik dan gaya tekan pada elemen dalam lapis batas mulai bekerja melawan arah aliran. Perbedaan tekanan ($\frac{\partial p}{\partial x}$) yang terjadi sangat berpengaruh terhadap fluida yang berada di dekat permukaan karena pada daerah ini fluida memiliki momentum yang lebih rendah dibandingkan fluida diatasnya, sehingga ketika momentum aliran berkurang terus untuk mengatasi gaya tekan, fluida di dekat permukaan menjadi diam. Harga dari $\frac{\partial u}{\partial y}$ pada permukaan di titik D adalah nol. Semakin jauh lagi yaitu dititik E aliran di dekat permukaan sudah

benar-benar berbalik dan fluida sudah tidak mampu mengikuti kontur permukaan bahkan cenderung menjauh. Peristiwa pemisahan aliran sebelum mencapai *aft edge* disebut dengan separasi dimana $\frac{\partial U}{\partial Y} = 0$. Hal ini terjadi karena pengurangan kecepatan di lapisan batas dan juga dengan adanya *adverse pressure gradient*. Garis dari kecepatan nol terpisah kedepan dan aliran balik meninggalkan permukaan titik separasi disebut dengan *streamline separasi* (Schetz,1996)

Pada gambar dibawah ini, terlihat bahwa setelah melampaui titik C aliran fluida diperlambat dan gradien tekanannya bertambah. Momentum aliran akan semakin berkurang, dimana pada titik D harga $\frac{\partial U}{\partial Y}$ menjadi nol sehingga tidak mampu lagi melawan gradien tekanan yang semakin besar dan aliran fluida akan terpisah dari permukaan lengkung. Titik tempat terjadinya pemisahan aliran fluida tersebut dikenal dengan titik separasi dimana $\frac{\partial U}{\partial Y} = 0$ dan $\tau = 0$



Gambar 2.9. Letak separasi boundary layer

2.9. Distribusi Aliran Fluida yang Melewati Sebuah Silinder atau Lingkaran

Seperti terlihat pada Gambar. 2.7 diatas, bisa dilihat bahwa ada beberapa hal yang menarik untuk dikaji atau dilihat terutama untuk pengembangan *boundary layer* dan fenomena separasi yang terjadi di silinder. Dari gambar tersebut terlihat ada perbedaan antara kondisi aliran fluida yang viskos dan non viskos ketika melewati suatu silinder. Dari gambar tersebut terlihat bahwa *streamline* dari aliran simetris terhadap sumbu x. Fluida yang mengalir di bagian tengah dari *streamline* mengenai silinder pada titik A, kemudian terbagi menjadi dua, dan mengalir mengelilingi silinder.

Titik A adalah titik stagnasi. Seperti fluida yang mengalir melewati pelat datar, *boundary layer* berkembang pada seluruh permukaan *solid*. Distribusi dari kecepatan di luar *boundary layer* bisa ditunjukkan secara kualitatif dari spasi dari *streamline-streamline*. Selama tidak ada aliran melintasi sebuah *streamline*, kita bisa mengira kecepatan aliran tersebut bertambah di dalam *region* dimana jarak antar *streamline* berkurang. Sebaliknya, pertambahan pada jarak *streamline* akan mengurangi kecepatan aliran.

Pada *inviscid flow* kecepatan fluida yang mengalir di sekitar silinder akan bertambah sampai titik maksimum, titik D. dan kemudian berkurang setelah melewati titik D tersebut. Kecepatan yang berkurang tersebut akan mengakibatkan bertambahnya tekanan. Tekanan akan berkurang ketika aliran fluida melewati titik A sampai titik D dan kemudian bertambah dari titik D sampai titik E. Selama aliran tersebut simetris terhadap sumbu x dan y, maka dapat dianggap bahwa distribusi dari tekanan juga simetris. Hal ini berbeda dengan kondisi pada aliran viskos, dimana kondisi ini adalah kondisi yang sebenarnya ada (Schetz, 1996).

Pada aliran viskos, eksperimen menunjukkan bahwa *boundary layer* tipis di antara titik A dan C. Selama *boundary layer* tersebut tipis, ini beralasan untuk mengasumsikan bahwa tekanan secara kualitatif sama dengan yang terjadi pada aliran non viskos. Selama tekanan bertambah secara kontinyu di antara titik A dan B, elemen dari fluida di dalam *boundary layer* mengalami sejumlah gaya penekanan pada arah aliran tersebut.

Di daerah ini, gaya penekanan ini baik sekali untuk mengatasi gaya *shear* yang muncul. Dan pergerakan dari elemen pada arah aliran tersebut dapat dijaga konstan. Setelah titik B, selama tekanan bertambah, elemen dari fluida tersebut mengalami gaya penekanan yang berkebalikan dari arah aliran fluida tersebut.

Layer dari fluida yang berdekatan dengan *solid surface* terbawa untuk berhenti atau perlambatan dan aliran tersebut terseparasi dari permukaan. Daerah separasi dari *boundary layer* yang merupakan hasil dari pembentukan daerah yang tekanannya rendah di belakang silinder, dimana momentumnya tidak sempurna, ini disebut dengan daerah *wake*. Untuk aliran yang terseparasi pada *body*, terdapat sejumlah gaya penekanan yang tidak seimbang pada arah alirannya, ini mengakibatkan *pressure drag* pada *body*.

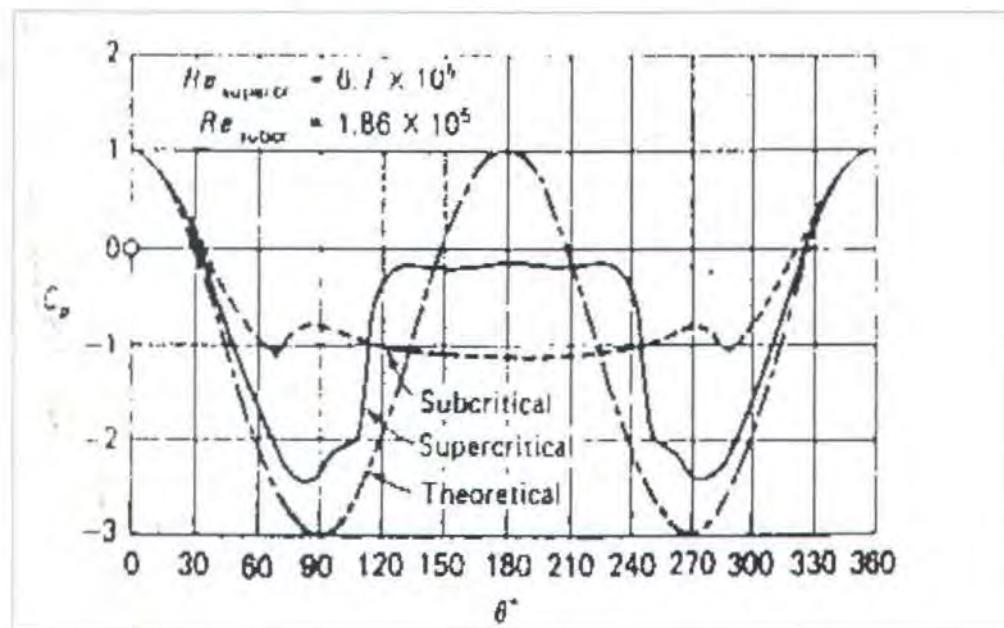
Besarnya daerah *wake* menyebabkan besarnya *pressure drag*. Distribusi dari tekanan pada permukaan silinder didapatkan dari persamaan Bernoulli, $p + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{const}$, dimana ρ adalah densitas dari fluida. Hasilnya adalah :

$$p_s = p_\infty + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 (1 - 4\sin^2\theta)$$

atau

$$C_p = \frac{p_s - p_\infty}{1/2 \rho U_\infty^2} = 1 - 4 \sin^2 \theta$$

Distribusi dari tekanan ini oleh ditunjukkan ke dalam suatu grafik seperti terlihat pada Grafik. 2.1 di bawah ini. Distribusi tekanan ini dieksperimenkan pada dua Reynold Number yaitu $Re_{supercritical} = 6.7 \times 10^5$ dan $Re_{subcritical} = 1.86 \times 10^5$ (Schetz, 1996). Hal ini untuk membandingkan antara *perfect-fluid theory* dan eksperimentalnya.



Grafik. 2.1 Perbandingan dari perfect-fluid theory dan eksperimental dari pressure distribution pada sebuah silinder

BAB 3

COMPUTATIONAL FLUIDA DYNAMICS

BAB 3

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

3.1. Pendahuluan

Penyelesaian permasalahan mengenai dinamika fluida dengan fenomena sekarang ini menggunakan suatu penyelesaian komputasi yang terus dikembangkan untuk mendapatkan suatu proses yang hampir sama dengan keadaan aslinya. Tetapi tidak semua permasalahan dinamika fluida tersebut dapat diselesaikan karena bentuk geometri yang kompleks dan kondisi batas masih merupakan permasalahan yang belum dapat dipecahkan. Pengembangan penyelesaian fenomena fluida dengan komputasi ini dikenal dengan CFD (*Computational Fluid Dynamic*) yang merupakan suatu metode analisa fluida dengan menggunakan penyelesaian numerik dan didasarkan atas *finite element* pada geometri yang akan diuji.

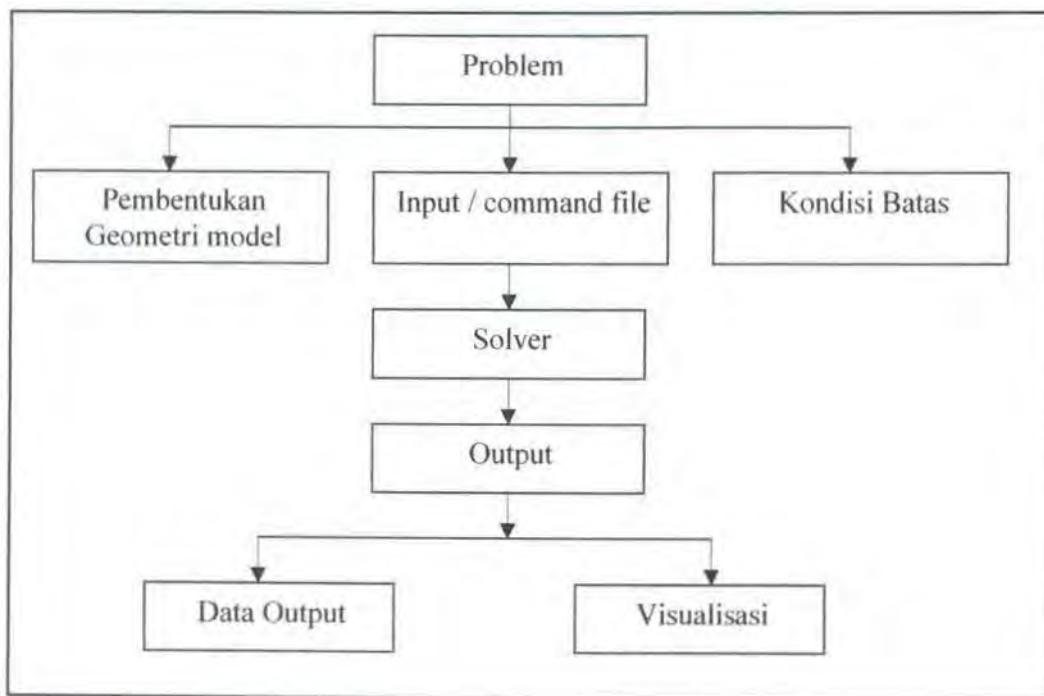
Program CFD ini dimungkinkan untuk memprediksi fenomena aliran yang lebih akurat dan kompleks sesuai dengan bentuk geometri serta fenomena yang terjadi. Proses penggerjaan CFD didasarkan atas problem yang digambarkan dengan model yang akan dianalisa, serta kondisi batas yang dihitung dengan penyelesaian persamaan Novier-Stokes.

Beberapa keuntungan yang diperoleh dengan menggunakan program CFD antara lain :

- Mempunyai waktu yang lebih efisien dan biaya dalam mendesain suatu benda / produk dengan tingkat akurasi yang tinggi.

- Mempunyai nilai tambah kemampuan studi untuk melaksanakan suatu eksperimen yang sulit atau terlalu berbahaya.
- Keakuratannya prosesnya dapat terkontrol dalam proses desain (Versteeg & Malalasekera, 1995).

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 penentuan kondisi batasnya. Dimana solver problem akan dihitung dengan pendekatan persamaan Navier-Stokes, dari hasil perhitungan didapatkan output dari running program CFD. Desain kerja program CFD ditunjukkan seperti dibawah ini :



Gambar 3.1. Desain kerja CFD

3.2. Pembagian Proses Pengeraaan CFD

Pelaksanaan penyelesaian CFD didasarkan atas pemasukan data input serta pengamatan fenomena dari hasil running sesuai dengan kondisi batas dan bentuk geometri. CFD merupakan program yang terstruktur terbagi atas :

1. Pre Processor
2. Flow Solver
3. Post Processor

Pre-processor

Pada bagian ini input masalah aliran program CFD melalui suatu interface kemudian merubahnya menjadi bentuk yang sesuai dengan format yang dikehendaki oleh bagian Flow Solver.

Flow Solver

Berupa pendekatan variable dari aliran yang tidak ketahui dengan fungsi yang sederhana, diskritasi pergantian fungsi tersebut menjadi persamaan aliran kemudian dilanjutkan dengan persamaan matematis.

Post-processor

Tahap ini menampilkan hasil perhitungan yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya. Dimana hasilnya ditampilkan seperti berikut ini ;

- Gambaran geometri model
- Tampilan vector kecepatan
- Hasil tampilan koefesien-koefesien yang diinginkan
- Arah aliran disekitar bentuk geometri

- Hard copy output ke file.

3.3. Proses Validasi

Beberapa tahap perhitungan dengan pendekatan program CFD, antara lain

1. Convergence

Proses iterasi pada tahap ini perhitungan 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 digunakan dalam bentuk perhitungan menentukan keteletian hasil yang didapat.

3. Verifikasi dengan teori dan data

Ketelitian hasil perhitungan dengan pendekatan CFD perlu dibandingkan dengan teori atau data yang sudah ada, sehingga kevalidan hasil tidak disangskakan.

3.4. Persamaan Dasar Dinamika Fluida Dalam CFD

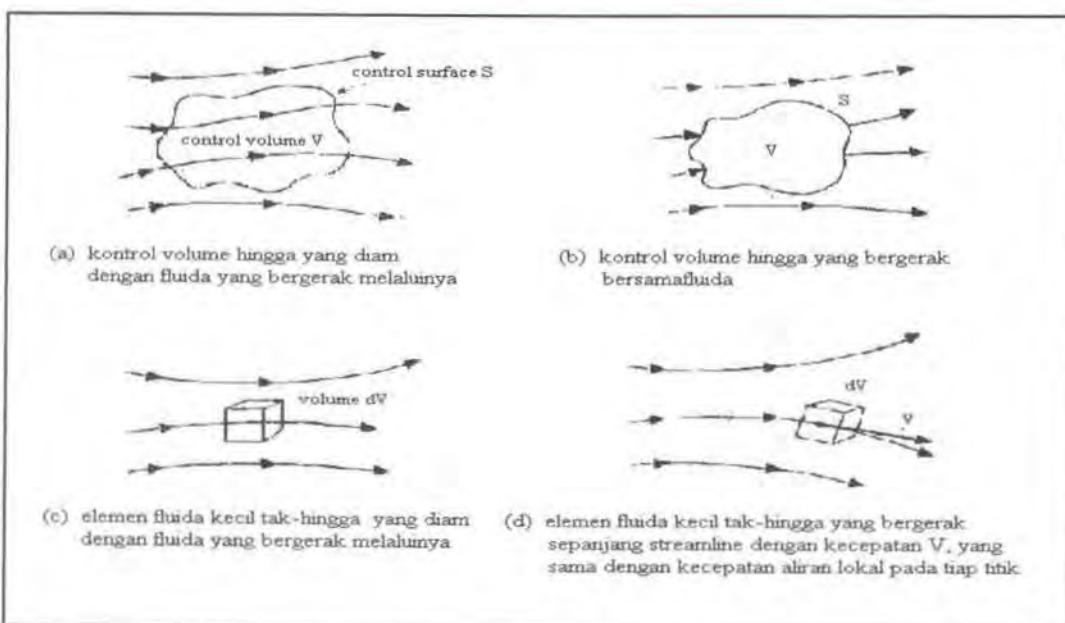
Pada dasarnya *CFD* didasarkan pada persamaan dasar (*governing equations*) dinamika fluida, yaitu persamaan kontinuitas, momentum, dan energi. Persamaan-persamaan ini merupakan pernyataan matematis untuk tiga prinsip dasar fisika :

1. Hukum kekekalan massa.
2. Hukum kedua Newton, $\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$
3. Hukum kekekalan energi.

Dalam mendapatkan persamaan dasar gerak fluida, filosofi berikut ini selalu diikuti:

1. Memilih prinsip fisika dasar dari hukum-hukum fisika (hukum kekekalan massa, hukum kedua Newton, dan hukum kekekalan energi).
2. Menerapkan prinsip-prinsip fisika ini dalam model aliran.
3. Dari penerapan ini, diuraikan persamaan matematis yang meliputi prinsip-prinsip fisika.

Untuk menghasilkan model aliran dapat digunakan metode kontrol volume dan metode elemen fluida seperti pada Gambar. 3.1. Dari penurunan model (a) dan (c) akan didapatkan persamaan yang disebut *conservation form*, sedangkan dari penurunan model (b) dan (d) akan didapatkan persamaan yang disebut *nonconservation form*. Hasil penurunan dari keempat model ini pada dasarnya akan menghasilkan persamaan yang sama, hanya dalam bentuk manipulasi matematis yang berbeda.



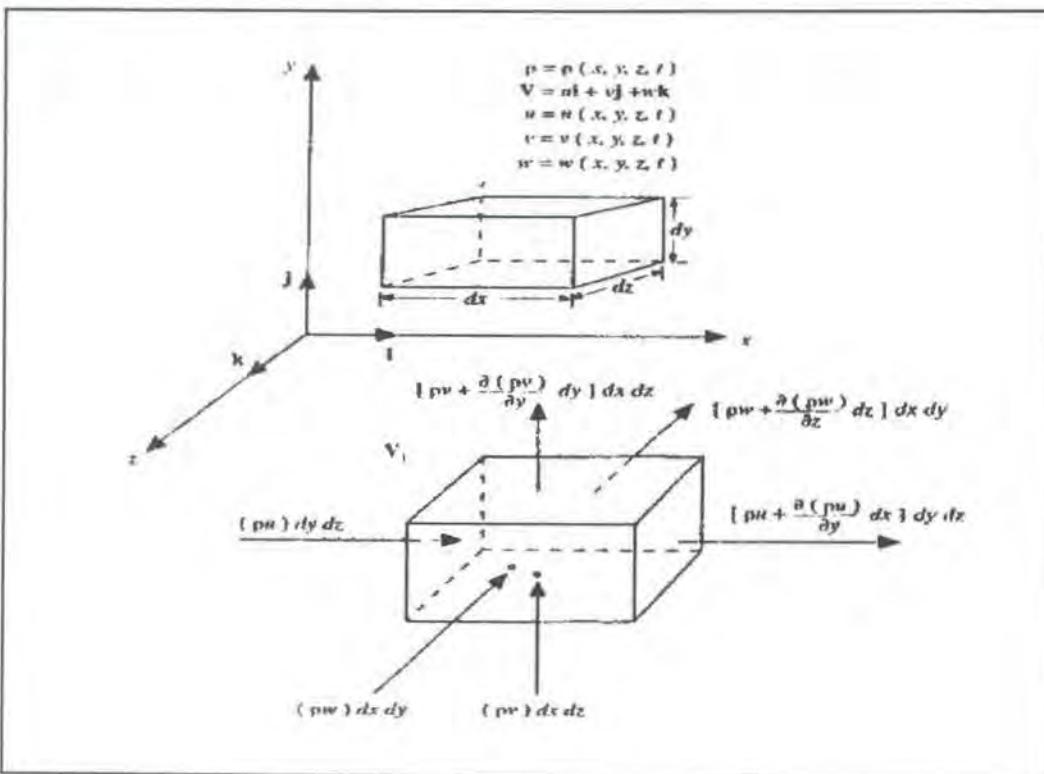
Gambar 3.2. Model-model aliran. (a & b) pendekatan kontrol volume-hingga, (c & d) pendekatan elemen fluida kecil tak-hingga.

3.5. Persamaan Aliran Viscous (Navier~Stokes)

Aliran *viscous* merupakan persamaan aliran yang mengikuti fenomena pemindahan gesekan/*friction*, konduksi/ hantaran panas, dan/ atau difusi/ penyebaran massa.

A.. Persamaan Kontinuitas

Pada Gambar 3.2c ditunjukkan elemen kecil tak-hingga (*infinitesimal fluid element*) yang tetap-dalam-ruang dengan fluida yang bergerak disekitarnya. Model aliran ini secara detail terlihat pada Gambar 3.3. Dalam hal ini digunakan sistem koordinat Cartesian, dengan kecepatan dan densitas merupakan fungsi dari bidang (x, y, z) dan waktu t . Elemen ini mempunyai sisi-sisi dx , dy , dan dz (Reuben, 1993).



Gambar 3.3. Model elemen kecil tak-hingga yang tetap-dalam-ruang

Gambar 3.3. menunjukkan aliran massa yang melalui elemen-tetap ini. Pada permukaan kiri dan kanan (elemen yang tegak lurus terhadap sumbu x) luasan pada

permukaan ini adalah $dy dz$. Aliran massa melalui permukaan kiri adalah $(\rho u) dy dz$. Karena kecepatan dan densitas merupakan fungsi dari lokasinya di dalam ruang, maka nilai aliran massa yang melewati permukaan kanan akan berbeda dari nilai besaran massa yang melalui permukaan kiri dengan perbedaan aliran massa sebesar $[\partial(\rho u)/\partial x] dx$. Karenanya, aliran massa melalui permukaan kanan dapat dinyatakan sebagai $\{\rho u + [\partial(\rho u)/\partial x] dx\} dy dz$.

Dengan cara yang sama, aliran massa yang melalui permukaan bawah dan atas, yang tegak lurus terhadap sumbu y , adalah $(\rho v) dx dz$ dan $\{\rho v + [\partial(\rho v)/\partial y] dy\} dx dz$. Sedangkan aliran massa yang melalui permukaan depan dan belakang, yang tegak lurus terhadap sumbu z , adalah $(\rho w) dx dy$ dan $\{\rho w + [\partial(\rho w)/\partial z] dz\} dx dy$.

Sesuai konvensi bahwa u , v , dan w bernilai positif pada arah sumbu x , y , dan z . Maka, arah panah pada Gambar 3.3 menunjukkan kontribusi aliran massa masuk dan keluar melalui sisi-sisi elemen-tetap. Aliran keluar massa dengan nilai positif akan didapatkan sebagai:

Aliran keluar-bersih (net outflow) dalam arah sumbu x :

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy dz - (\rho u) dy dz = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz \quad [3.1]$$

Aliran keluar-bersih dalam arah sumbu y :

$$\left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx dz - (\rho v) dx dz = \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz \quad [3.2]$$

Aliran keluar-bersih dalam arah sumbu z :

$$\left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right] dx dy - (\rho w) dx dy = \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx dy dz \quad [3.3]$$

Maka aliran massa-bersih yang keluar dari elemen adalah:

$$\text{Aliran massa-bersih} = \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz \quad [3.4]$$

Massa total fluida elemen kecil tak-hingga adalah $\rho (dx dy dz)$, maka peningkatan massa dalam ukuran waktu (*time rate*) tertentu di dalam elemen adalah:

$$\text{Peningkatan massa terhadap waktu} = \frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz) \quad [3.5]$$

Prinsip fisika menyatakan bahwa massa adalah kekal (*mass is conserve*), saat diterapkan untuk elemen-tetap dalam Gambar 3.2, bisa diekspresikan dalam pernyataan berikut: aliran massa-bersih yang keluar dari elemen harus sama dengan pengurangan massa dalam elemen dalam ukuran waktu tersebut.

Menandai pengurangan massa dengan besaran negatif, pernyataan ini bisa dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz = - \frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz) \quad [3.6]$$

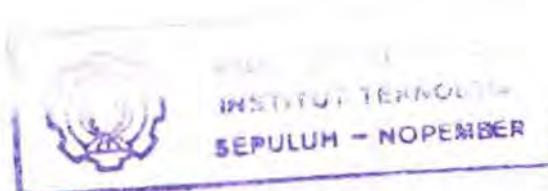
atau

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad [3.7]$$

Pada persamaan 3.7, variabel dalam kurung merupakan $\nabla \cdot (\rho V)$, maka persamaan 3.7 menjadi :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad [3.8]$$

Dalam koordinat Cartesian, operator vektor ∇ didefinisikan sebagai :



$$\nabla \equiv \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

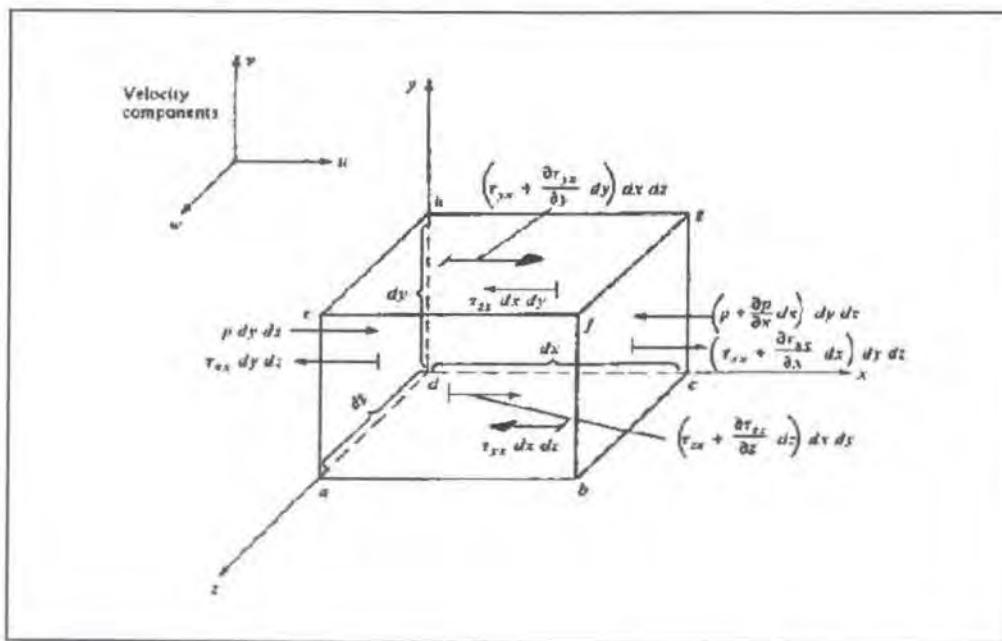
∇ adalah vektor kecepatan dalam koordinat Cartesian.

$$\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$$

$\nabla \cdot \mathbf{V}$ disebut sebagai *convective derivative*, yang secara fisik merupakan ukuran waktu terjadinya perubahan karena pergerakan elemen fluida dari satu lokasi ke lokasi lainnya dalam bidang aliran, yang kondisinya relatif berbeda (Reuben, 1993).

B. Persamaan Momentum

Dalam bagian ini, diterapkan prinsip fisika dasar yang lain ke dalam model aliran, yaitu hukum Newton kedua. Seperti pada bagian A, di sini digunakan model elemen fluida kecil tak-hingga dengan fluida bergerak di sekelilingnya. Model ini diperlihatkan dengan lebih jelas pada gambar berikut:



Gambar 3.4. Gaya-gaya yang bekerja pada sumbu x pada elemen fluida kecil tak-hingga yang bergerak.

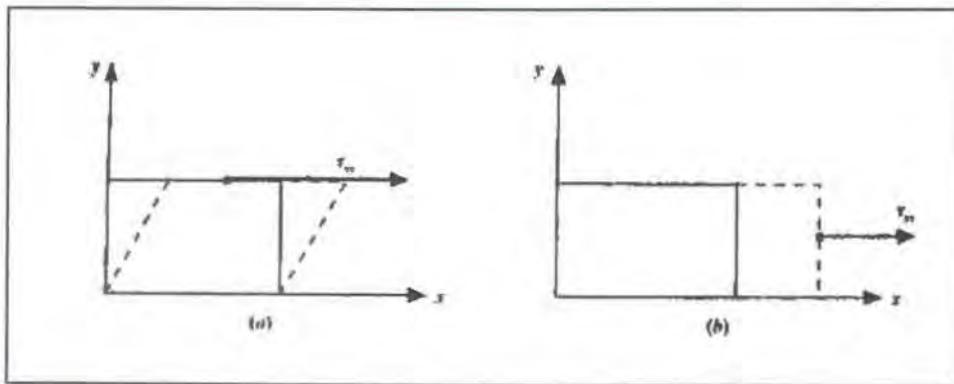
Hukum kedua Newton dalam arah x dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_x = m a_x \quad [3.9]$$

F_x dan a_x adalah komponen skalar arah x untuk gaya dan percepatan (Schliting, 1979).

Pada elemen fluida yang bergerak akan timbul gaya, dimana sumber gaya tersebut adalah:

1. Gaya badan (*body force*), yang berlaku langsung pada volume massa dari elemen fluida. Gaya-gaya ini “berlaku pada jarak tertentu”; contohnya adalah gaya gravitasi, listrik, dan magnetik.
2. Gaya permukaan, yang berlaku langsung pada permukaan elemen fluida. Gaya permukaan timbul karena adanya distribusi tekanan yang berlaku pada permukaan, disebabkan oleh fluida luar yang mengelilingi elemen fluida, dan distribusi tegangan geser dan normal yang berlaku pada permukaan, juga disebabkan oleh fluida luar yang “mendorong” permukaan dalam bentuk gesekan.



Gambar 3.5. (a) tegangan geser (berkaitan dengan tingkat perubahan deformasi pergeseran), dan (b) tegangan normal (berkaitan dengan tingkat perubahan volume).

Gaya badan per-unit massa pada elemen fluida ditandai sebagai f , dan f_x sebagai komponen gaya badan per-unit massa yang searah sumbu x . Volume fluida adalah $(dx dy dz)$, sehingga:

$$\text{Gaya badan pada elemen fluida searah sumbu } x = \rho f_x (dx dy dz) \quad [3.10]$$

Tegangan normal dan geser dalam fluida terkait dengan tingkat perubahan (terhadap waktu) dari deformasi elemen fluida, seperti terlihat dalam Gambar. 3.5 (hanya untuk bidang xy). Tegangan geser, ditandai dengan τ_{xy} , berkaitan dengan deformasi-pergeseran, sedangkan tegangan normal (τ_{xx}) berkaitan dengan tingkat perubahan volume dari elemen fluida. Sebagai hasilnya, baik tegangan geser maupun normal tergantung pada tingkat perubahan kecepatan dalam aliran.

Dalam kebanyakan aliran *viscous*, tegangan normal (seperti τ_{xx}) jauh lebih kecil daripada tegangan geser dan sering kali diabaikan. Tegangan normal menjadi penting saat gradien kecepatan normal (misalnya $\partial x / \partial y$) nilainya sangat besar, seperti di dalam gelombang kejut. Gaya-gaya permukaan dalam arah- x diperlihatkan dalam gambar 3.5. Di sini diberlakukan konvensi bahwa τ_{ij} menandai tegangan dalam arah j dan berlaku dalam bidang tegak lurus terhadap sumbu i . Pada permukaan $abcd$, gaya satu-satunya dalam arah- x berhubungan dengan tegangan geser, yaitu $\tau_{yz} dx dz$. Permukaan $efgh$ merupakan jarak dy di atas permukaan $abcd$, sehingga gaya geser pada arah x di permukaan $efgh$ adalah $[\tau_{yx} + (\partial \tau_{yx} / \partial y) dy] dx dz$ dengan arah ke kanan (positif terhadap arah- x).

Perlu ditekankan bahwa arah tegangan geser pada permukaan *abcd* dan *efgh* di permukaan bawah, yaitu τ_{yx} arahnya ke kiri (negatif sumbu *x*), sedangkan pada permukaan atas, $\tau_{yz} + (\partial\tau_{yx}/\partial y) dy$ arahnya ke kanan. Arah-arah ini konsisten dengan konvensi bahwa nilai-nilai positif meningkat pada keseluruhan tiga komponen kecepatan, *u*, *v*, dan *w*, terjadi pada arah positif sumbu. Sebagai contoh, dalam gambar 3.5, *u* meningkat dalam arah *y*-positif. Kemudian, pada permukaan *efgh*, *u* sedikit lebih tinggi di atas permukaan dari pada di permukaan, hal ini menyebabkan aksi “penarikan” (*tugging*) yang mencoba untuk mendorong elemen fluida ke arah *x*-positif.

Sebaliknya, pada permukaan *abcd*, *u* sedikit di bawah permukaan daripada di permukaan, hal ini menyebabkan aksi pergeseran pada elemen fluida, yang terjadi pada arah *x*-negatif. Arah-arah dari seluruh tegangan *viscous* diperlihatkan dalam Gambar 3.5, termasuk τ_{xx} , bisa disusun dengan cara yang sama. Khusus di permukaan *dcgh*, τ_{zx} berlaku pada arah *x*-negatif, sedangkan pada permukaan *abfe*, $\tau_{zx} + (\partial\tau_{zx}/\partial z) dz$ berlaku pada arah *x*-positif. Di permukaan *adhe*, yang tegak lurus terhadap sumbu-*x*, gaya satu-satunya pada arah-*x* adalah gaya tekan *p dy dz*, yang selalu beraksi pada arah *ke dalam* elemen fluida, dan $\tau_{xx} dy dz$, yang menuju ke arah *x*-negatif. Pada gambar 3.5, alasan kenapa τ_{xx} berada dalam permukaan *adhe* adalah sebagai “engsel-kiri” (*left hinges*) pada konvensi yang telah disepakati sebelumnya sebagai arah penambahan kecepatan.

Di sini, sesuai konvensi, peningkatan positif dalam *u* adalah menuju ke arah *x*-positif. Oleh sebab itu, nilai *u* pada permukaan kiri *adhe* lebih kecil daripada nilai *u* pada permukaan itu sendiri. Sebagai hasilnya, aksi *viscous* pada tegangan normal

berlaku sebagai suatu "hisapan" pada permukaan *adhe*, yaitu, ada aksi penggeseran ke arah kiri yang ingin memperlambat gerak elemen fluida. Kebalikannya, pada permukaan *bcfg*, gaya tekan $[p + (\partial p / \partial x) dx] dy dz$ ditekan ke dalam pada elemen fluida (dalam arah *x*-negatif), dan karena nilai *u* pada sisi kanan permukaan *bcfg* lebih besar daripada nilai *u* di permukaan, terjadi "penghisapan" karena tegangan normal *viscous* yang mencoba untuk mendorong elemen ke kanan (dalam arah *x*-positif) dengan gaya setara dengan $[\tau_{xx} + (\partial \tau_{xx} / \partial x) dx] dy dz$. Dengan kerangka pikir seperti di atas, untuk elemen fluida yang bergerak bisa ditulis:

Gaya permukaan bersih dalam arah *x* =

$$\begin{aligned} & \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dy dz + \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dy dz + \\ & + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \end{aligned} \quad [3.11]$$

Gaya total dalam arah *x*, F_x , diberikan oleh penjumlahan persamaan 3.10 dan 3.11, didapatkan :

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \quad [3.12]$$

Massa elemen fluida yaitu :

$$m = \rho dx dy dz \quad [3.13]$$

Percepatan elemen fluida adalah tingkat perubahan waktu dari kecepatan. Karenanya, komponen percepatan dalam arah-*x* (a_x), secara sederhana merupakan tingkat

perubahan u terhadap waktu sejak kita mengikuti elemen fluida yang bergerak. Tingkat perubahan terhadap waktu ini diberikan oleh *derivative* dasar sebagai berikut:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad [3.14]$$

Dengan menggabungkan persamaan 3.9, 3.12, 3.13, dan 3.14, maka didapatkan :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad [3.15]$$

yang merupakan komponen x dari persamaan momentum untuk aliran *viscous*.

Dengan cara yang sama, komponen y dan z bisa didapatkan sebagai berikut :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad [3.16]$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad [3.17]$$

Persamaan 3.15, 3.16, dan 3.17 merupakan persamaan *partial differential* yang didapatkan langsung dari penerapan prinsip fisika dasar terhadap elemen fluida kecil tak-hingga. Karena elemen fluida ini bergerak dengan fluida, maka persamaan 3.15 sampai 3.17 merupakan bentuk *nonconservation*. Persamaan-persamaan ini merupakan persamaan skalar dan disebut sebagai persamaan *Navier-Stokes*.

Persamaan Navier-Stokes bisa didapatkan dalam bentuk *conservation* sebagai berikut. Sisi kiri persamaan 3.15 ditulis dalam bentuk *derivative* dasar :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \cdot \nabla u \quad [3.18]$$

Juga diketahui bentuk *derivative* berikut : $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t}$, maka

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad [3.19]$$

Menggunakan identitas vektor untuk men-divergen-kan hasil skalar dikalikan dengan vektor, didapatkan $\nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = u \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) + (\rho \mathbf{V}) \cdot \nabla u$ atau dapat ditulis sebagai :

$$\rho \mathbf{V} \cdot \nabla u = \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) - u \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \quad [3.20]$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 3.19 dan 3.20 ke dalam persamaan 3.18, didapatkan :

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) \\ \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \right] + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) \end{aligned} \quad [3.21]$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 3.8 ke dalam persamaan 3.21, didapatkan :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) \quad [3.22]$$

Substitusi persamaan 3.22 ke 3.15 menghasilkan :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad [3.23]$$

dengan cara yang sama persamaan 3.16 dan 3.17 menjadi :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad [3.24]$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_z \quad [3.25]$$

Persamaan 3.23 sampai 3.25 adalah persamaan Navier-Stokes dalam bentuk *conservation* (Fox, 1976)

Isaac Newton menyatakan bahwa tegangan geser pada fluida adalah proporsional terhadap tingkat waktu regangan (*strain*), yaitu gradien kecepatan. Beberapa fluida disebut fluida *newtonian* (fluida yang nilai τ -nya tidak proporsional terhadap gradien kecepatan adalah fluida *non-newtonian*, salah contohnya). Dalam kebanyakan praktik aerodinamika, fluida bisa diasumsikan sebagai *newtonian*. Untuk fluida ini, Stokes mendapatkan :

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad [3.26]$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad [3.27]$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad [3.28]$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad [3.29]$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad [3.30]$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad [3.31]$$

dengan μ adalah koefisien viskositas molekul dan λ adalah koefisien viskositas kedua. Stokes membuat hipotesis bahwa $\lambda = -(2/3)\mu$, yang seringkali digunakan tapi belum didefinisikan dengan jelas hingga sekarang.

Substitusi persamaan 3.26~3.31 ke persamaan 3.23~3.25 didapatkan persamaan lengkap Navier-Stokes sebagai berikut :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + \rho f_x \quad [3.32]$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)\right] + \rho f_y \quad [3.33]$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \rho f_z \quad [3.34]$$

3.6. Proses Penggerjaan CFD ANSYS 5.4

Dalam penyelesaian tugas akhir ini menggunakan *Flotran CFD ANSYS 5.4* yang terdiri dari tiga tahap, yaitu *Preprocessor*, *Solution (Flow Solver)*, dan *General Postproc (Post Processor)*. Pembagian tahap-tahap diatas dijelaskan seperti dibawah ini :

A. Preprocessor

Pada tahapan ini dilakukan beberapa langkah utama sebagai berikut :

1. *Element type* : pemilihan tipe elemen fluida yang akan digunakan, yaitu elemen *FLUID 141* untuk permasalahan yang diselesaikan dengan pendekatan dua dimensi atau *FLUID 142* untuk aliran tiga dimensi.
2. *Modeling* : pendefinisian geometri dari model yang dibuat dengan domain yang sesuai dengan kebutuhan.
3. *Meshing* : Membagai model yang telah dibuat menjadi sejumlah elemen, penentuan tingkat kerapatannya, dan penentuan bentuk elemen serta sifat *meshing*.

B. Solution

Pada tahap solusi terdiri dari dua masukan (*input*) utama yaitu masukan untuk kondisi batas (*loads*) dan masukan untuk *Flotran Set up*.

1. *Loads*

Menentukan harga kecepatan dan tekanan pada batas-batas (domain) model yang telah dibuat.

2. *Flotran Set up*

- a. *Solution options* :
 - *steady state* atau *transient*
 - *adiabatic* atau *thermal*
 - *laminer* atau *turbulent*
 - *incompressible* atau *compressible*

b. *Execution control* : penentuan jumlah iterasi dan tingkat kesalahan iterasi.

c. *Additional out* : hasil tambahan yang ingin diketahui seperti tegangan geser dan koefisien tekanan.

d. Penentuan sifat-sifat fluida yaitu densitas dan viskositas.

e. *Flow environment* : penentuan acuan tekanan.

3. Run Flotran

Setelah semua *input* dimasukkan, maka pemodelan untuk simulasi ini dijalankan (proses *running*). Selama proses *running* berlangsung semua informasi iterasi ditampilkan oleh ANSYS *output* secara kontinyu. Iterasi akan berhenti sampai mencapai jumlah iterasi yang ditentukan atau sampai mencapai kesalahan iterasi yang telah ditentukan.

C. General Postproc

Hasil dari proses *running* merupakan data-data numerik dari kecepatan dan tekanan pada tiap-tiap nodal. Hasil-hasil tersebut bisa ditampilkan dalam bentuk visualisasi dan animasi. *Additional out* (hasil tambahan) juga bisa didapatkan sesuai dengan yang diminta pada tahap *solution* (Anderson, 1995).

3.7. Pemodelan Penampang Lingkaran dan Ellips untuk Formasi Tunggal

Proses analisa ini digunakan pendekatan dua dimensi untuk penampang dan domainnya. Langkah-langkah pembuatan model yaitu:

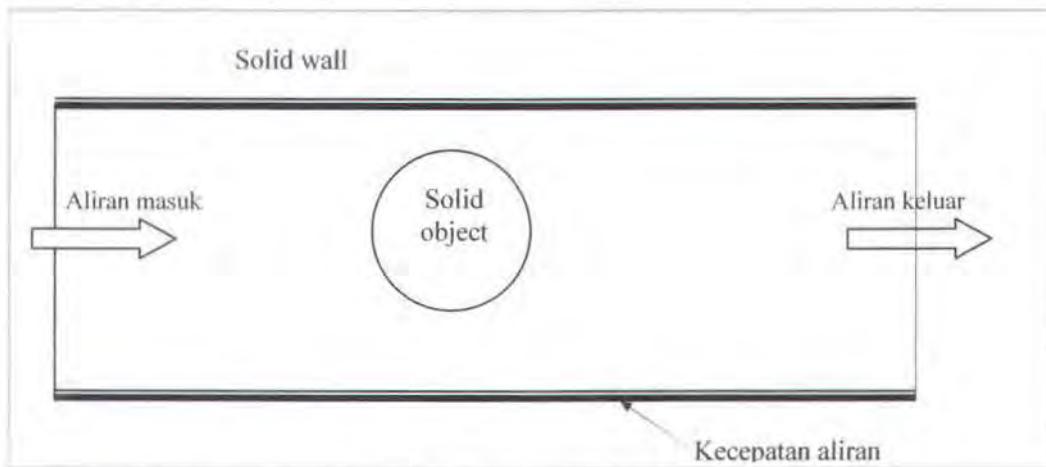
1. Tahap Preprocessor
 - Type element: FLUID 141
 - Geometri:

Penampang yang dimodelkan adalah Lingkaran dan Ellips. Dimana dari masing-masing model tersebut dianalisa untuk Reynold Number 5, 10, 50, 100 dan 500. Sehingga jumlah seluruhnya terdapat 10 model.

Penampang Lingkaran.

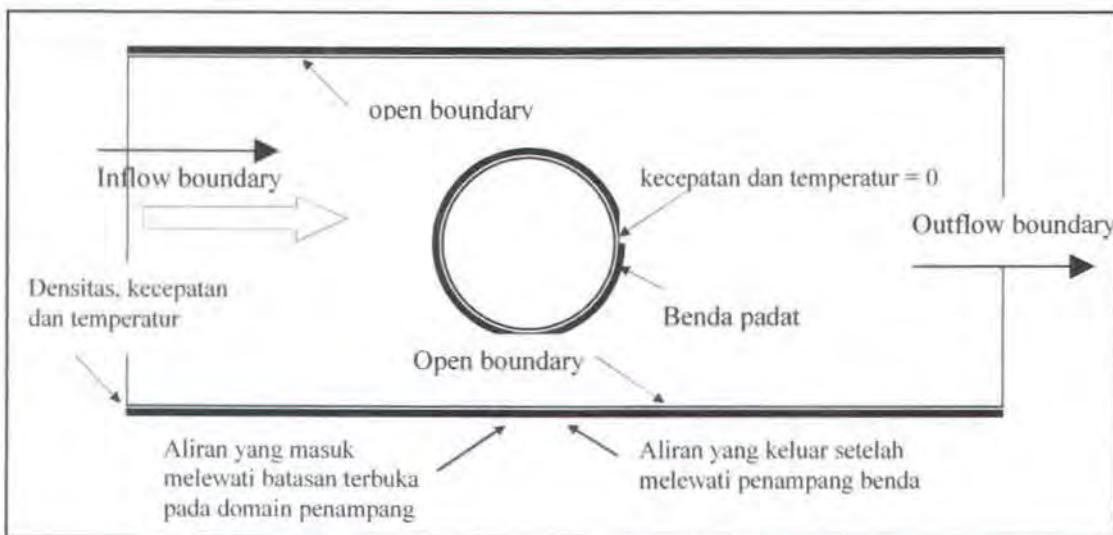
Penampang Lingkaran yang dimodelkan mempunyai diameter = $D = 2 \text{ m}$.

(Keterangan : Lihat Lampiran C Visualisasi)

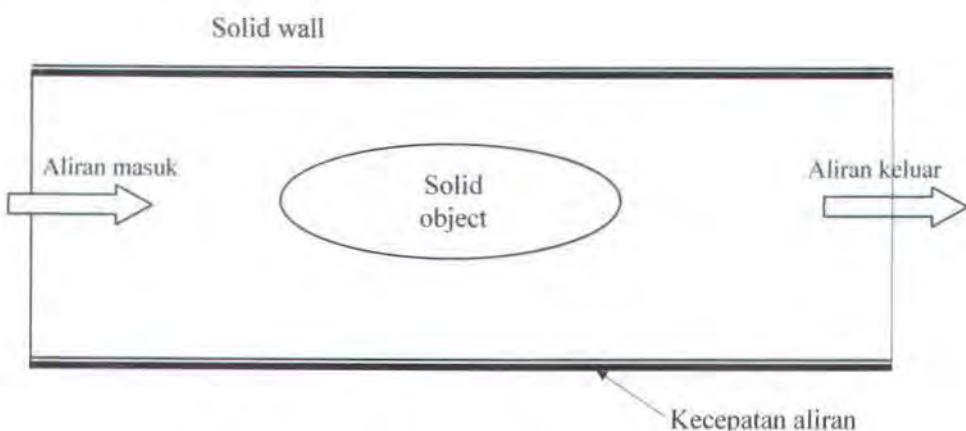
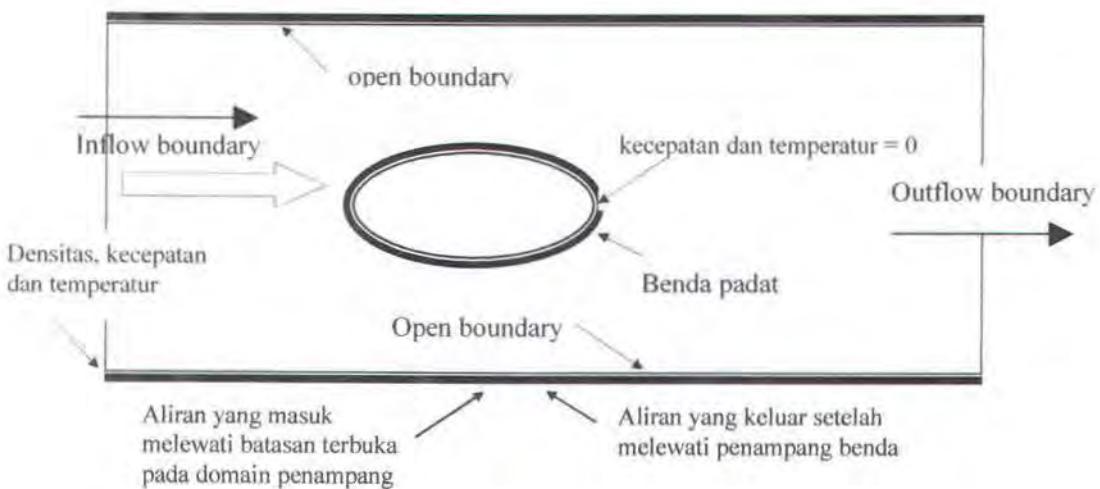


Gambar 3.6 (a). Pemodelan Penampang 2D Lingkaran Tunggal

Pada penampang diatas densitas, kecepatan dan temperatur diberikan pada arah aliran yang akan melewati benda solid lingkaran. Penampang lingkaran tersebut mempunyai kecepatan dan tekanannya adalah 0, dimana temperatur yang diberikan adalah 15° C (suhu standar untuk viskositas fluida) seperti ditunjukkan gambar dibawah ini : (Versteeg & Malalasekera, 1995)

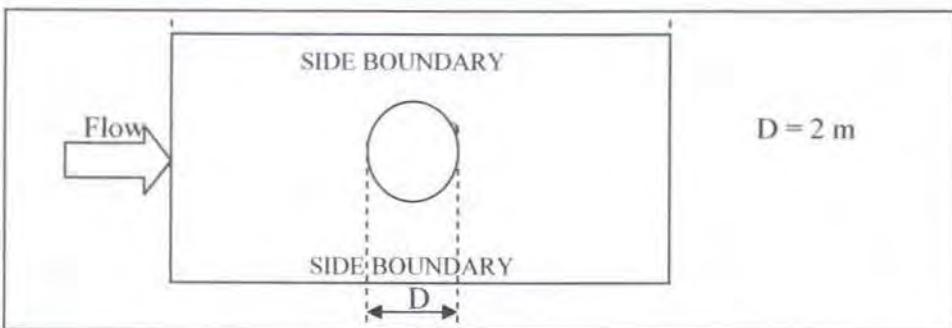


Gambar 3.7. Karakteristik komponen pada penampang lingkaran

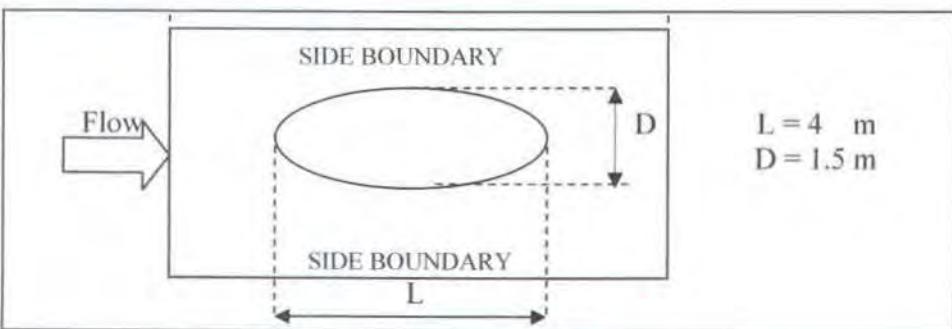
Penampang ellips**Gambar 3.8.** Pemodelan Penampang 2D Ellips**Gambar 3.9.** Karakteristik komponen pada penampang ellips

- Meshing, yaitu membagi geometri model dengan elemen-elemen seperti pada metode elemen hingga. Bentuk elemen yang digunakan adalah elemen segi empat (lihat lampiran). Pembagian area yang membatasi bentuk penampang selalu berbeda sesuai dengan bentuk model dan kondisi batasnya.
- Dalam penulisan tugas akhir bentuk batasan area pada model lingkaran dan ellips ditunjukkan seperti dibawah ini :

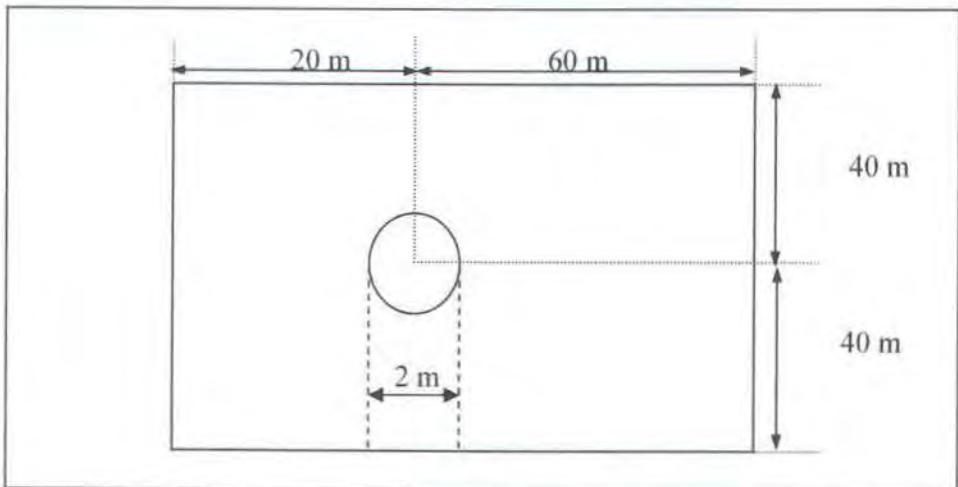
3.8. Data Geometri



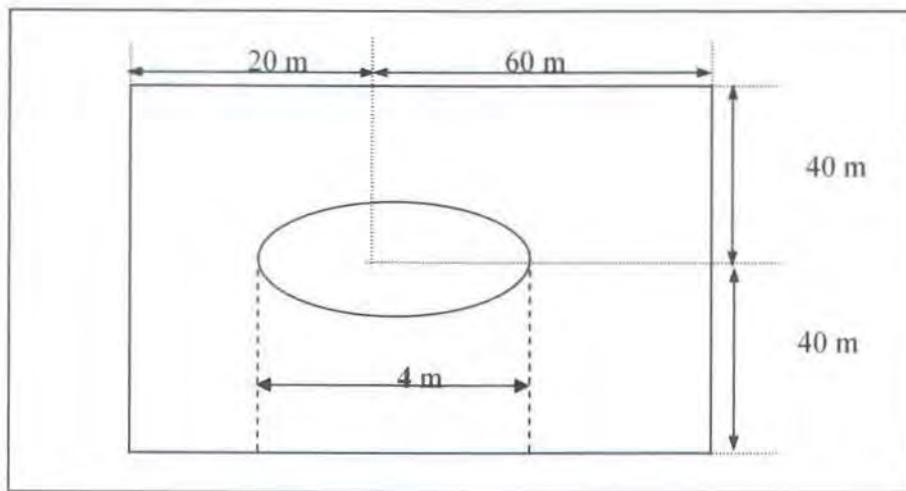
Gambar 3.10. Pemodelan Penampang Lingkaran



Gambar 3.11. Pemodelan Penampang Ellips

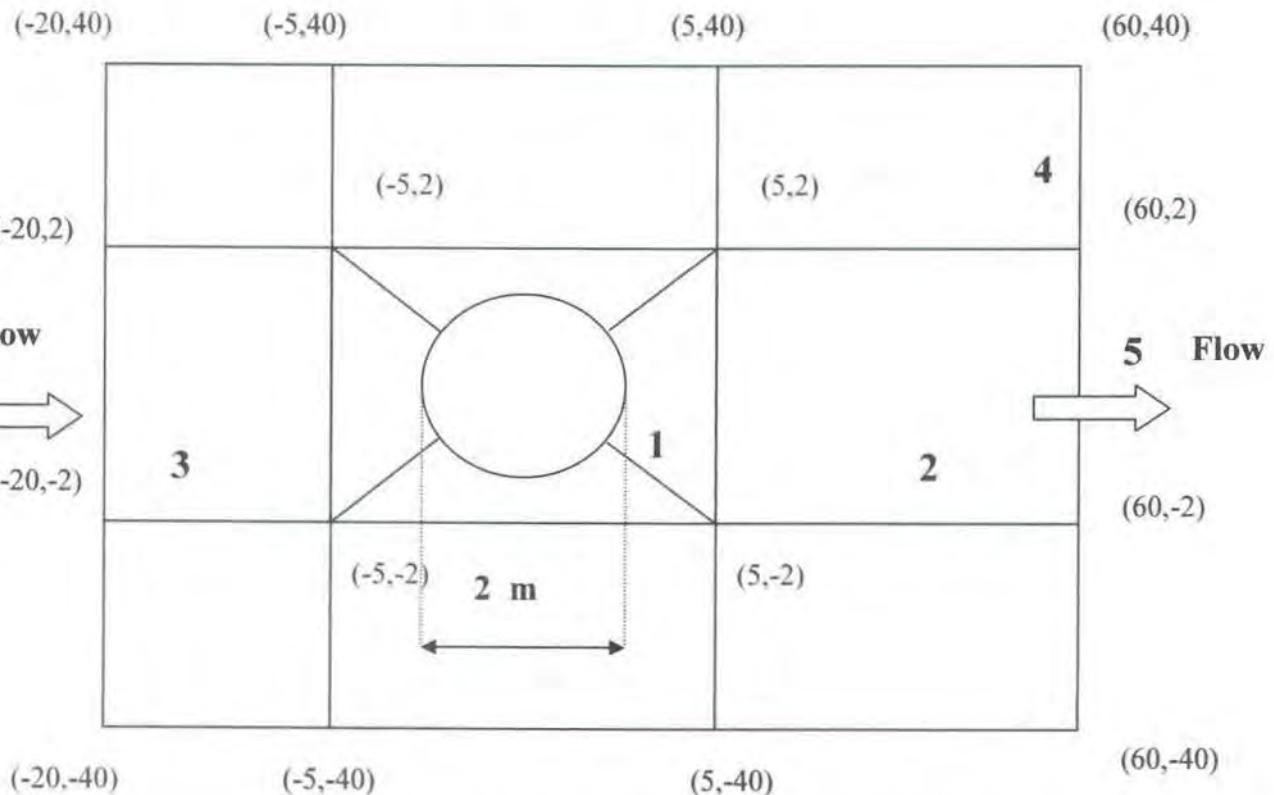


Gambar 3.12. Geometri Lingkaran



Gambar 3.13. Geometri Ellips

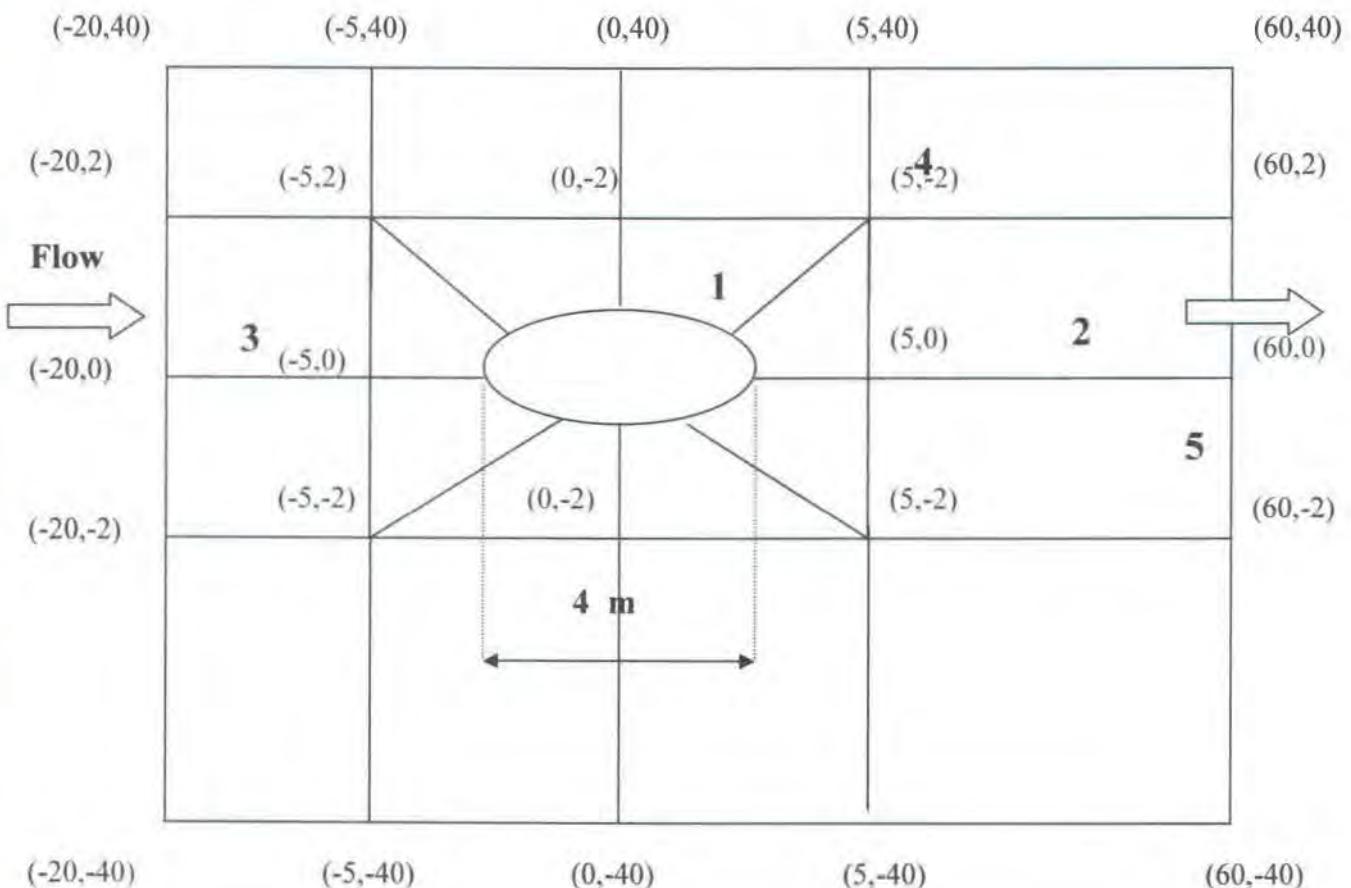
Bentuk meshing penampang lingkaran



Gambar 3.14. Bentuk pembagian area penampang lingkaran

Aliran yang akan melewati sebuah penampang benda solid berbentuk lingkaran, pada angka 1, 2, 3 hingga 5 menunjukkan ukuran perbandingan elemen yang akan dilewati oleh aliran. Proses pengerjaan bentuk penampang diatas dapat dilihat pada lampiran C visualisasi.

Bentuk meshing permukaan penampang ellips



Gambar 3.15. Bentuk pembagian area penampang ellips

2. Tahap solution

- Loads, pemberian kondisi batas dengan harga tertentu yaitu untuk harga kecepatan atau tekanan pada batas-batas geometri.

- Pada batas inflow dan side sesuai dengan angka Reynold untuk masing-masing model, yaitu :

Untuk $Re = 5$, maka $Vx = 2,84755 \times 10^{-6}$ m/dt ; $Vy = 0$ m/dt

Untuk $Re = 10$, maka $Vx = 5,6951 \times 10^{-6}$ m/dt ; $Vy = 0$ m/dt

Untuk $Re = 50$, maka $Vx = 2,84755 \times 10^{-5}$ m/dt ; $Vy = 0$ m/dt

Untuk $Re = 100$, maka $Vx = 5,6951 \times 10^{-5}$ m/dt ; $Vy = 0$ m/dt

Untuk $Re = 500$, maka $Vx = 2,84755 \times 10^{-4}$ m/dt ; $Vy = 0$ m/dt

- Pada batas outflow, tekanan = 0 Pa.
- Pada permukaan penampang (lingkaran dan persegi), $Vx = Vy = 0$ m/dt.
- Flotran Set-Up
 - Solution options: Steady state, Adiabatik, Laminar, Incompressible
 - Execution control: $P = 10^{-3}$
 - Fluid properties:

Dipilih fluida air tawar standard dengan kadar garam 0 dan pada suhu 15^0C . Dimana :

densitas = 999 kg/m^3 (Liquid)

viskositas = $0,00113788098 \text{ kg/dt.m}$ (Liquid)

- Flow environment: tekanan = 1 atm
- RUN, model yang sudah di *set* tersebut di *run* untuk mendapatkan hasil
- (*output* berupa data-data numerik dan grafis, untuk *kecepatan, tekanan, dan drag*).

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

BAB 4

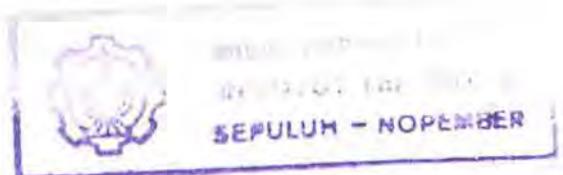
ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Aliran pada Angka Reynolds

Pada penulisan tugas akhir ini penulis menampilkan suatu fenomena yang terjadi pada setiap aliran, dimana aliran tersebut terkonsentrasi dengan bentuk ellips dan lingkaran. Keadaan yang terjadi dilakukan analisa untuk menunjukkan bahwa bentuk-bentuk aliran yang melewati benda / model pada angka Reynolds Number rendah dapat terlihat dengan bantuan program komputer ANSYS 5.4 atau 5.7.

Aliran luar (external) atau aliran tak terbatas yang bergerak di sekeliling permukaan benda padat. Aliran itu bisa meluas dengan bebas, betapapun tebalnya lapisan kentalnya. Jadi, di tempat agak jauh dari benda tersebut alirannya kental (inviscid) dimana dalam metode analisis yang sangat penting, disebut dengan *teori lapisan-batas*, dimana gerak lapisan kental di dekat dinding ditentukan, dan kemudian hasilnya ditambahkan pada aliran encer di bagian luar. Untuk aliran lewat benda tumpul, bahkan untuk bilangan Reynolds yang tinggi sekalipun, terjadi perbedaan konsep penambalan kental-encer. Gradien tekanan selalu nol; harga ini diperoleh melalui solusi aliran potensial untuk geometri tertentu (Reuben, 1993).

Apabila medan kecepatan untuk aliran non rotasi telah ditentukan, medan tekanan dapat diketahui melalui penerapan persamaan Bernoulli. Sebagai contoh, didaerah aliran yang menyempit (*converging*), penambahan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan sedangkan aliran yang meluas (*diverging*), tekanan meningkat sesuai dengan arah aliran. Aliran yang searah dengan arah peningkatan tekanan



disebut aliran dengan gradien positif (*adverse*) dan ini terjadi dalam aliran di sekitar batas lengkung, menjelang titik stagnasi dan dalam aliran yang meluas. Apabila ini terjadi, lapisan batas memisahkan diri dari permukaan, dan gejala tersebut dikenal sebagai *pemisahan lapisan batas*. Titik pemisahan ini mengawali suatu daerah yang disebut *wake*; didaerah ini terjadi kisaran yang kuat disertai peningkatan gaya hambat atau disipasi energi.

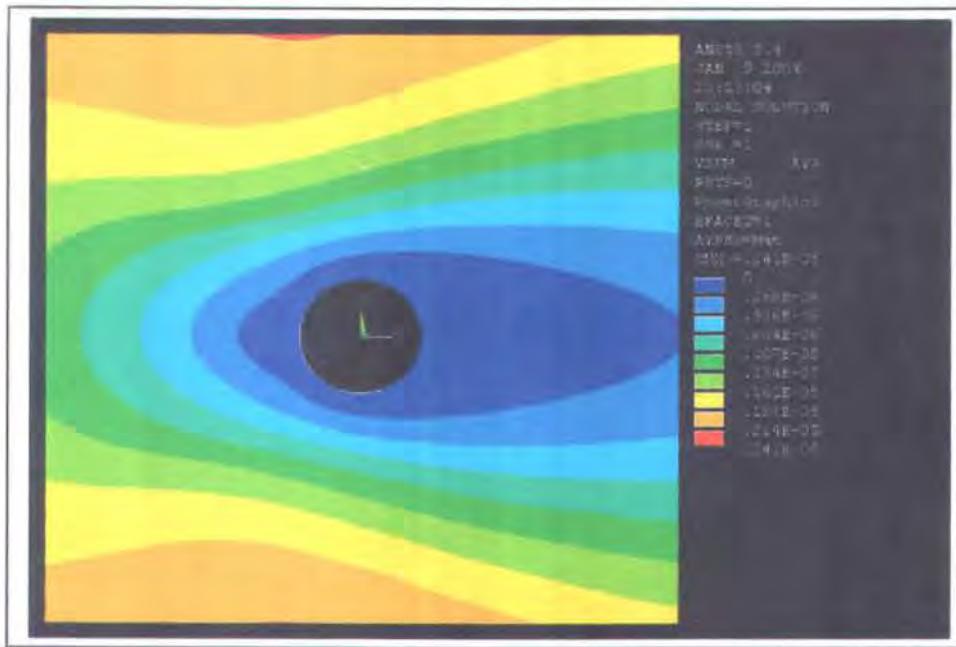
Bentuk Aliran kecepatan yang terjadi dari hasil running ANSYS 5.4

Analisa Kecepatan pada Pemodelan Lingkaran

1. Analisa Kecepatan pada Pemodelan Lingkaran Rn 5

Fenomena perubahan aliran kecepatan yang terjadi pada angka Reynolds Number 5 tampak seperti aliran laminar. Aliran laminar ini mengalir melewati geometri berbentuk lingkaran yang berdiameter 2 m, keadaan ditunjukkan dengan hasil running kecepatan (V Sum) dibawah ini. Dimana perubahan warna yang terjadi menandakan adanya suatu fenomena aliran yang melewati geometri tersebut.

Aliran yang melewati penampang model ini merupakan aliran ideal, dimana aliran menggambarkan karakteristik aliran yang sebenarnya saat melewati model dimana tidak terjadi separasi disekitar model penampang tersebut. Aliran luar (eksternal) atau aliran tak terbatas yang bergerak di sekeliling permukaan benda padat. Aliran itu bisa meluas dengan bebas, betapapun tebalnya lapisan kentalnya. Jadi, di tempat agak jauh dari benda tersebut alirannya kental (inviscid), seperti gambar dibawah ini.



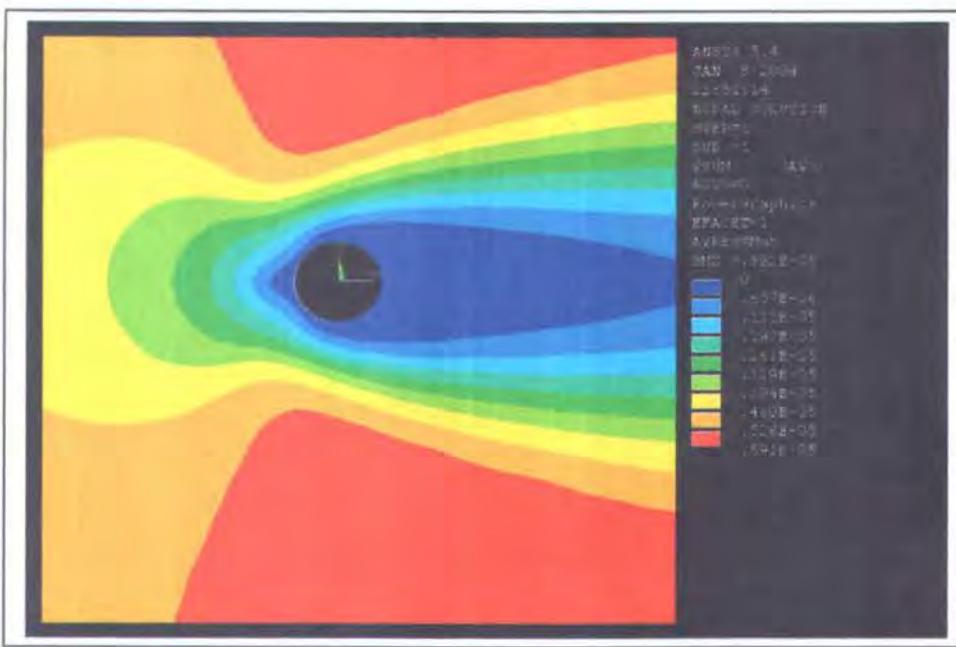
Gambar 4.1. Kecepatan Aliran pada Angka Reynolds (Rn 5)

Perubahan aliran fluida yang terjadi pada angka Reynold (kecepatan) yang rendah mempunyai perbedaan signifikan melintasi suatu profil pada setiap penampang model. Dimana daerah aliran yang menyempit (*converging*), penambahan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan sedangkan aliran yang meluas (*diverging*), tekanan meningkat sesuai dengan arah aliran (Reuben, 1993).

Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 5 adalah 28300 dengan Cp 1.07 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 990 yaitu 2 jam 45 menit.

2. Analisa Kecepatan pada Pemodelan Lingkaran Rn 10

Terjadinya perubahan aliran disekitar geometri yang sama tampak terjadi pada aliran kecepatan di angka Reynolds Number 10. Perubahan aliran warna merah yang terlihat menekan aliran pada warna coklat terekam oleh jumlah nilai yang tampak disamping gambar tersebut. Seperti ditunjukkan dibawah ini :

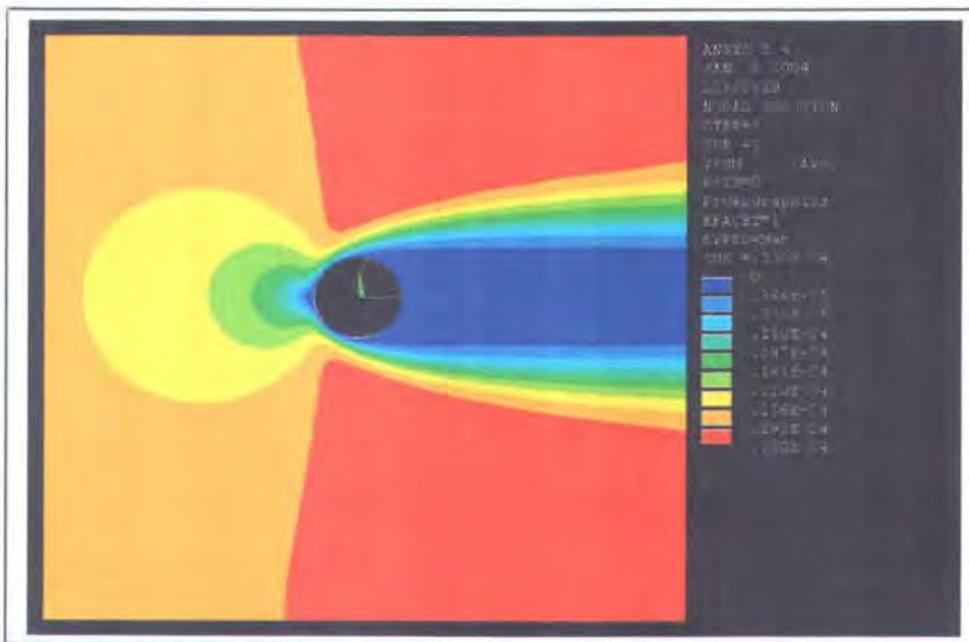


Gambar 4.2. Kecepatan aliran pada angka Reynolds 10

Daerah aliran yang menyempit (*converging*), penambahan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan sedangkan aliran yang meluas (*diverging*), tekanan meningkat sesuai dengan arah aliran. Fenomena penekanan warna biru disekitar model lingkaran dengan kecepatan yang rendah membuat bentuk kerucut pada bagian depan model, dimana perubahan warna yang lainnya tampak menekan kearah model dengan kecepatan yang bervariasi pula. Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 10 adalah 25600 dengan Cp 1.15 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 830 yaitu 2 jam 21 menit.

3. Analisa Kecepatan pada permodelan lingkaran Rn 50

Perubahan fenomenal aliran juga terjadi pada kecepatan dengan angka Reynolds 50 dimana perubahan penekanan warna merah yang terlihat seperti garis batas, perubahan terjadi juga warna kuning yang semua itu merupakan aliran yang akan melewati bentuk geometri tersebut.



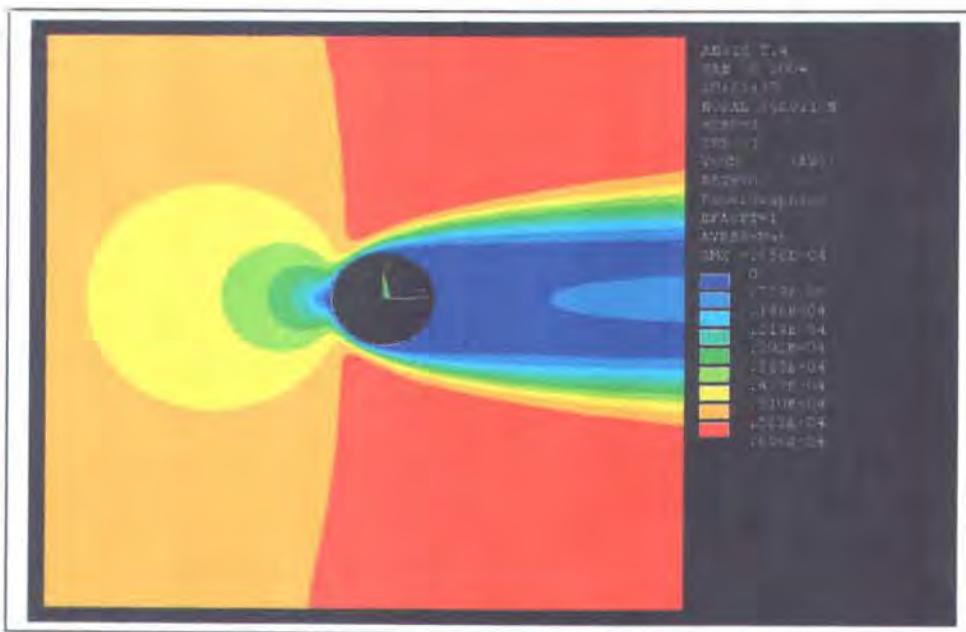
Gambar 4.3. Kecepatan Aliran pada Angka Reynolds 50

Pada Gambar 4.3 bentuk aliran warna biru dengan notasi kecepatan yang bertambah membentuk suatu kerucut yang seakan-akan aliran tersebut menekan rapat model lingkaran kemudian berubah lurus sampai belakang. Tampak pula fenomena aliran pada warna kuning yang berbentuk ellips pada bagian depan bersamaan dengan ketiga warna yang lain. Pembulatan permukaan / penampang lingkaran depan benda guna memperkecil peluang terjadinya perpisahan aliran di tepi yang runcing adalah efektif, dimana sifat laminar lapis batas berpengaruh terhadap posisi titik pisah (Victor, 1990). Perubahan bentuk aliran tersebut diatas sudah mulai terjadi dengan bertambahnya

suatu eksperimen dengan angka Reynolds tertentu pula. Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 50 adalah 23200 dengan Cp 1.16 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 840 yaitu 2 jam 21 menit.

4. Analisa Kecepatan pada Pemodelan Lingkaran Rn 100

Aliran-aliran yang melewati bentuk geometri lingkaran ini juga terjadi perubahan diangka Reynods 100, dibelakangnya yang ditunjukkan dengan warna aliran biru muda. Pada kondisi ini, partikel-partikel fluida yang mengalir mengalami gerakan rotasi yang disebabkan oleh efek friksi dari permukaan solid dan efek viskositas yang ada. Hal ini biasa disebut aliran *rotational* (Reuben, 1993). Dimana aliran tersebut seperti tertahan setelah terlewati aliran biru muda disekitarnya.



Gambar 4.4. Kecepatan Aliran pada Angka Reynolds 100

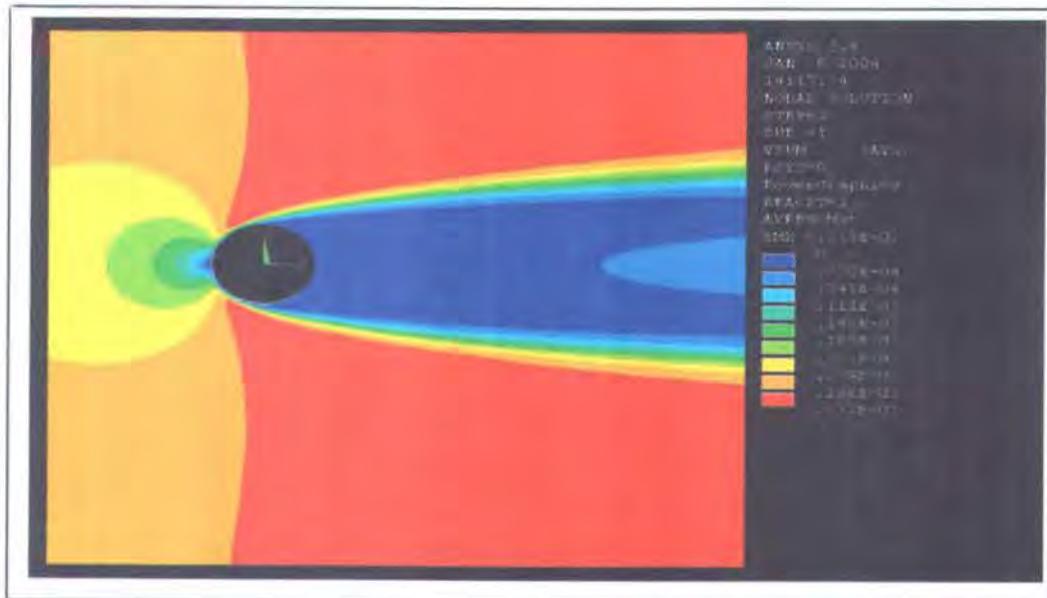
Fenomena aliran yang terpusat diujung geometri tampak terkumpul dengan perubahan warna biru dan biru muda, begitu pula warna yang lainnya. Tetapi pada saat bersamaan pula warna biru muda seolah-olah mendekati kearah bentuk model pada

arah belakang. Aliran laminar tersebut berubah oleh efek friksi yang ada pada permukaan solid (penampang) kemudian aliran tersebut dirusak oleh adanya tekanan balik yang terjadi dipermukaan solidnya.

Pada Gambar 4.4 gradien tekanan yang tidak menguntungkan, yaitu tekanan yang meningkat dalam arah ke hilir, lapisan batas cepat bertambah tebal. Gradien tekanan yang tidak menguntungkan seperti tegangan geser batas memperkecil momentum didalam lapisan batas: dan jika keduanya bekerja pada jarak cukup akan menyebabkan berhentinya gerakan lapisan batas. Kejadian (fenomena) ini disebut perpisahan (*separation*) (Duncan, Thomas & Young, 1970). Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka R_n 100 adalah 49600 dengan C_p 1.1 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 810 yaitu 1 jam 45 menit.

5. Analisa Kecepatan pada Pemodelan lingkaran Rn 500

Perubahan aliran ini membuktikan bahwa pada angka Reynolds rendah sekalipun telah terjadi suatu perubahan yang signifikan pada penekanan jenis warna



Gambar 4.5. Kecepatan Aliran pada angka Reynolds 500

aliran yang ditampilkan diangka Reynolds 500 diakhir pembatasan jumlah iterasi.

Aliran warna merah dengan kecepatan yang maksimal, dimana data kecepatan ditunjukkan pada Gambar 4.5 membuat sebuah batas seperti garis pada bagian depan model kemudian mengikuti bentuk model hingga bagian belakang. Fenomena kecepatan yang masih tetap terjadi pada angka Reynolds sebelumnya adalah kecepatan aliran pada warna biru dan biru muda tetapi mengalami perubahan notasi kecepatan. Aliran dua dimensi yang laminar akan berubah oleh efek friksi yang ada pada permukaan dari *solid (model)*.

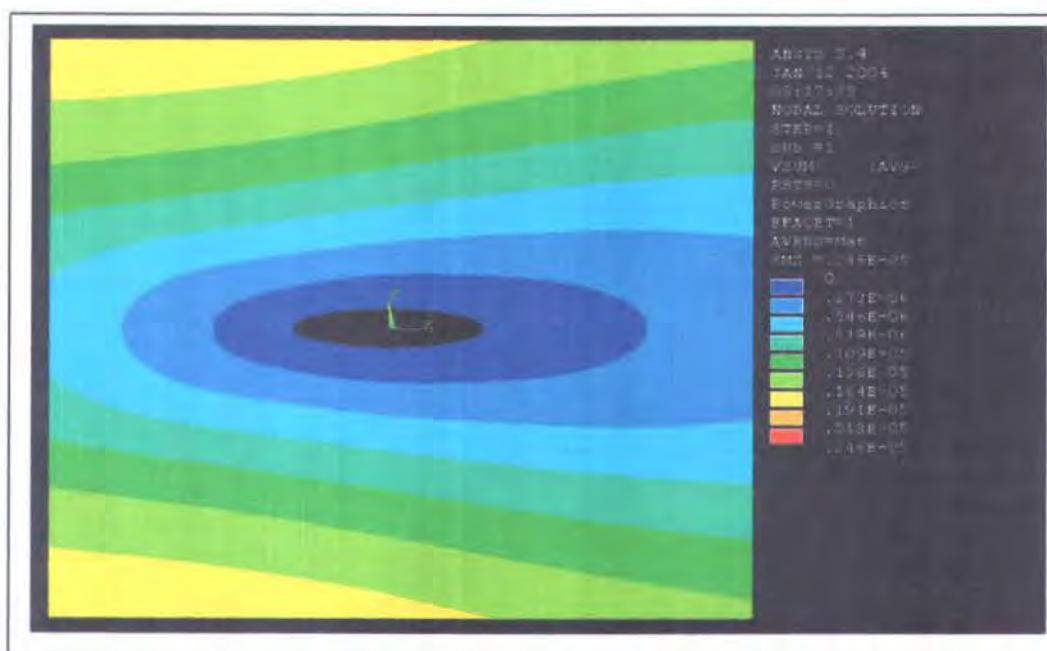
Gaya hambat yang disebabkan oleh rendahnya tekanan dalam wake justru mempercepat pembentukan suatu lapisan batas sehingga titik pemisahan pindah ke arah hilir. Pemisahan yang tertunda ini akan menimbulkan wake lebih kecil. Selain itu, aliran laminar tersebut juga dirusak oleh adanya tekanan balik yang terjadi pada permukaan solidnya. Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 500 adalah 3600 dengan Cp 1.09 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 810 yaitu 1 jam 45 menit.

Analisa Kecepatan pada Pemodelan Ellips

1. Analisa Kecepatan pada Pemodelan Ellips Rn 5

Bentuk aliran kecepatan yang terjadi disekitar geometri ellips dengan angka Reynolds Number 5, seperti ditunjukkan gambar 4.6 hasil running ANSYS 5.4 aliran yang melewati model ellips tampak smooth / baik. Dimana aliran warna biru yang melewati model ellips tersebut hingga bagian belakangnya mengikuti bentuk modelnya. Untuk aliran yang melalui sebuah permukaan lengkung / ellips sedemikian rupa sehingga aliran meluas, profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan

kelengkungan yang dimulai ditempat lapisan batas kemudian memisahkan diri (Reuben, 1993).



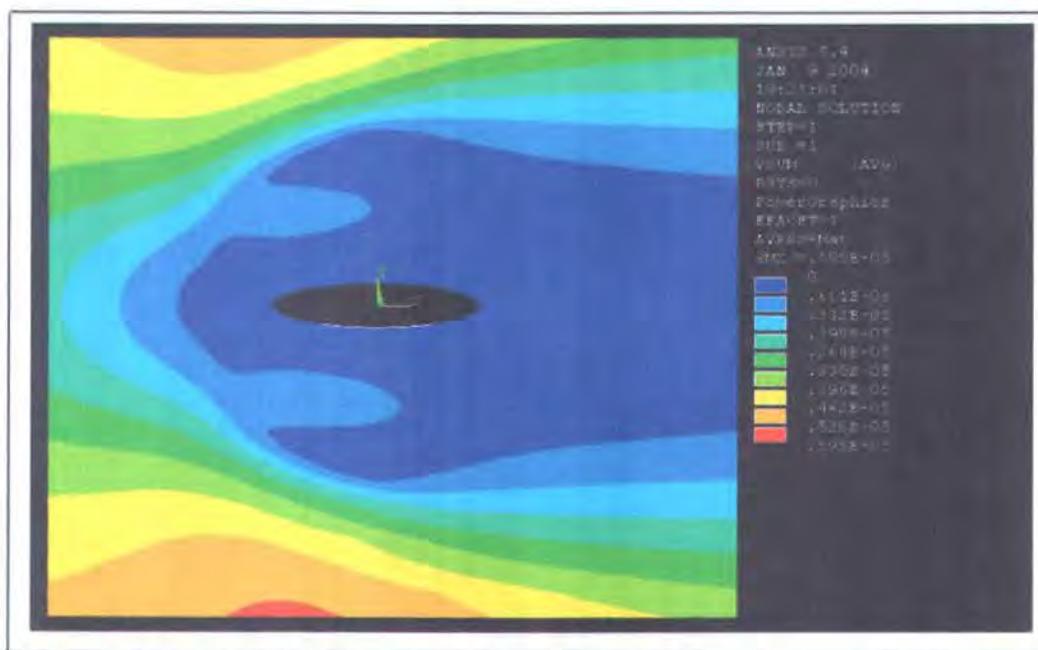
Gambar 4.6. Kecepatan Aliran pada angka Reynolds 5

Kecepatan maksimum yang ditunjukkan pada data gambar yaitu warna merah tidak tampak pada gambar, dikarenakan pembesaran model dengan menggunakan perintah Zoom pada program Ansys 5.4. Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 5 adalah 33500 dengan Cp 0.96 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 990 yaitu 2 jam 45 menit.

2. Analisa Kecepatan pada Pemodelan Ellips Rn 10

Perubahan bentuk aliran kecepatan angka Reynolds Number 10 tampak signifikan sekali, hal ini disebabkan proses meshing saat running kurang rapat

sehingga menghasilkan bentuk aliran yang kurang smooth saat melewati geometri ellips tersebut.



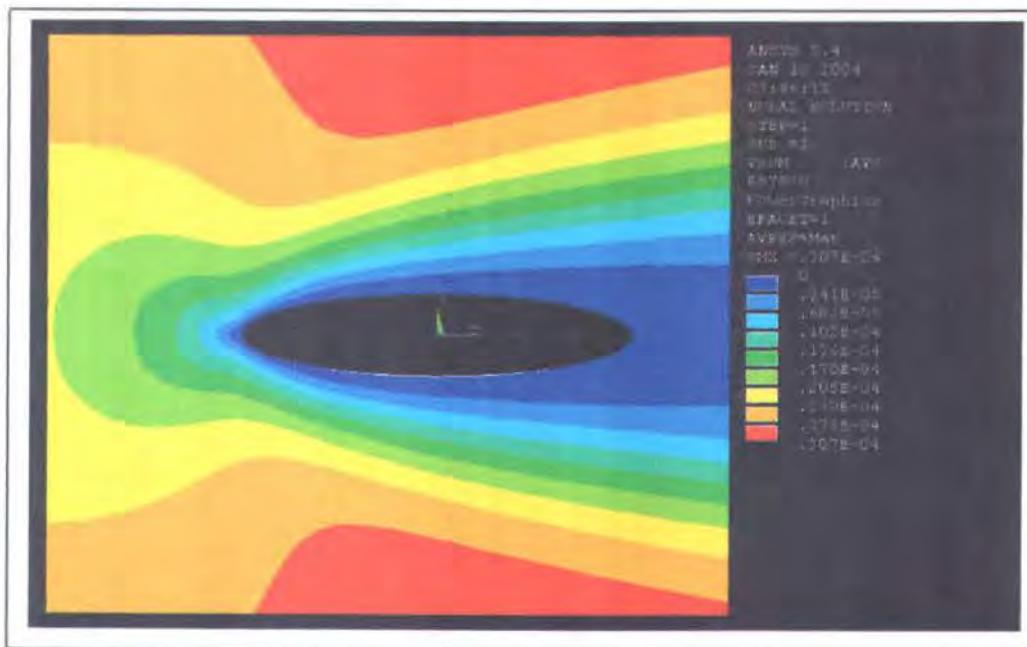
Gambar 4.7. Kecepatan Aliran pada angka Reynolds 10

Aliran yang melewati penampang model ini merupakan aliran ideal, dimana aliran menggambarkan karakteristik aliran yang sebenarnya saat melewati model dimana tidak terjadi separasi disekitar model penampang tersebut. Pada gambar diatas permulaan aliran fluida bergerak dengan distribusi kecepatan yang sama atau *uniform* ketika melewati suatu *solid surface (model ellips)* aliran kecepatan tersebut mengalami distribusi kecepatan yang berbeda yang dipengaruhi oleh kontur dari penampang ellips. Daerah aliran lainnya masih tampak sama seperti kondisi angka Reynolds 5. Kecepatan aliran maksimum pada Ansys 5.4 ditunjukkan pada warna merah. Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 10 adalah 32100 dengan Cp 1.05 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 995 yaitu 2 jam 57 menit.

3. Analisa Kecepatan pada Pemodelan Ellips Rn 50

Aliran kecepatan yang melalui geometri dengan angka Reynolds Number 50 mengikuti kontur benda, dimana aliran diujung benda tampak tajam. Terjadi perubahan bentuk aliran warna biru yang signifikan karena bentuknya mulai mengikuti aliran model ellips.

Fenomena aliran warna biru tampak menyudut / tajam diarah depan model kemudian bergerak lurus sesuai dengan bentuk ellips kearah belakang. Aliran kecepatan pada warna kuning, hijau dan hijau muda tampak tertekan oleh aliran kecepatan warna coklat serta merah sesuai dengan data yang ditunjukkan oleh notasi kecepatan pada Gambar 4.8 dibawah ini :



Gambar 4.8. Kecepatan Aliran model pada angka Reynolds 50

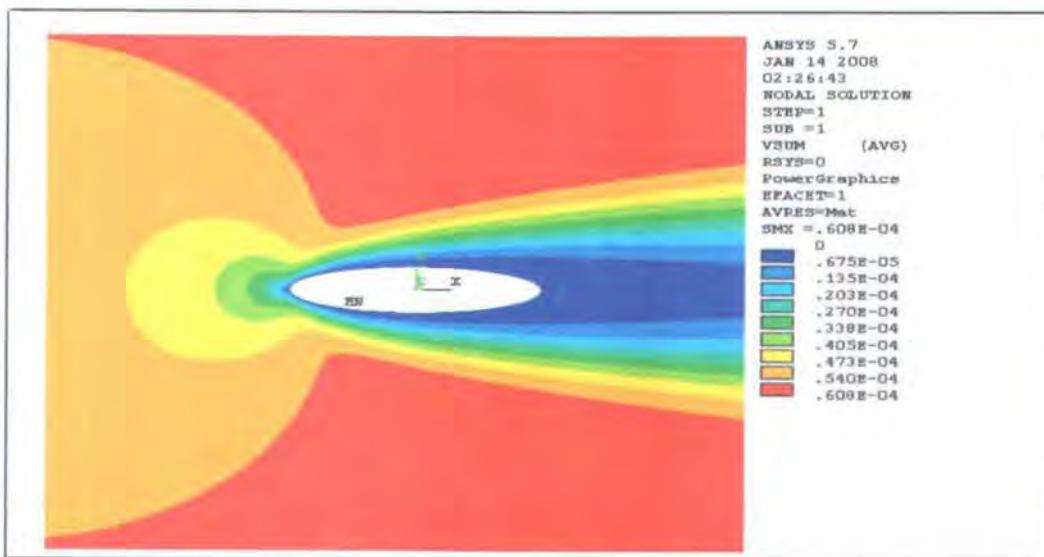
Distribusi kecepatan diatas dimulai dari titik di *solid surface* (penampang ellips) dimana aliran fluida tersebut memiliki kecepatan nol kemudian semakin besar ketika

menjauhi permukaan dari penampang tersebut. Harga kecepatan ini semakin besar sampai mencapai suatu harga dimana sama dengan harga kecepatan awal, (Reuben MO, 1993). Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 50 adalah 41600 dengan Cp 1.2 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 990 yaitu 2 jam 49 menit.

4. Analisa Kecepatan pada Permodelan Ellips Rn 100

Perubahan aliran kecepatan warna merah tampak melengkung kemudian tertahan dan mulai mengikuti bentuk model. Fenomena aliran kecepatan dengan warna kuning dan hijau masih terfokus / mengumpul diarah depan model. Harga-harga kecepatan yang ditunjukkan pada data gambar dibawah, hanya merupakan harga yang terletak pada titik kecepatan tertentu pada permukaan benda yang terbesar (mewakili).

Tetapi harga tersebut akan berubah pada daerah aliran kecepatan lainnya. Percobaan ini ditampilkan dengan menggunakan program Ansys 5.7, dimana penulis mencoba untuk mengaplikasikan.

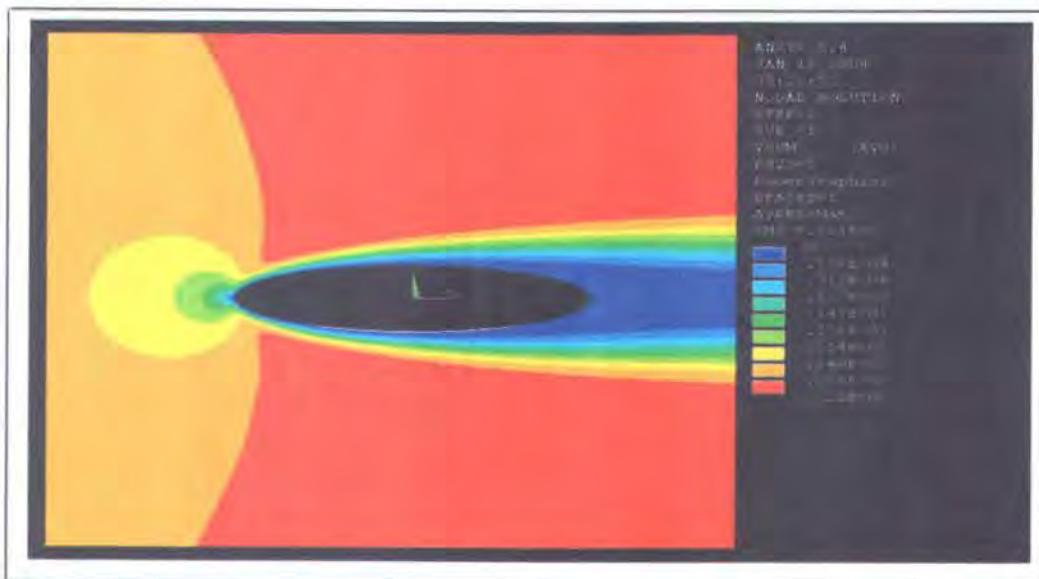


Gambar 4.9. Kecepatan Aliran model Ellips pada angka Reynolds 100

Untuk aliran yang melalui sebuah permukaan model dengan fenomena pada angka Reynolds 100 dimana aliran meluas dan profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan kelengkungan) yang dimulai ditempat lapisan batas kemudian memisahkan diri. Pada lapisan batas bersifat laminar didaerah yang gradien tekanannya positif, kecepatan dipermukaan solid akan lebih kecil dibandingkan bila lapisan batas bersifat turbulen pada permukaan bendanya (Victor, 1990). Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 100 adalah 49600 dengan Cp 1.2 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 865 yaitu 1 jam 58 menit.

5. Analisa Kecepatan pada Pemodelan Ellips Rn 500

Perubahan aliran kecepatan pada warna merah secara maksimum membentuk seperti garis batas pada bagian depan model ellips. Aliran warna kuning dan hijau lebih terfokus kearah depan model ellips. Fenomena perubahan hampir tidak terjadi pada aliran angka Rn 500. Dimana distribusi kecepatan ada yang terpusat diujung model hingga akhirnya melewati bentuk penampang aliran dengan harga kecepatan yang



Gambar 4.10. Kecepatan Aliran model Ellips pada angka Reynolds 500

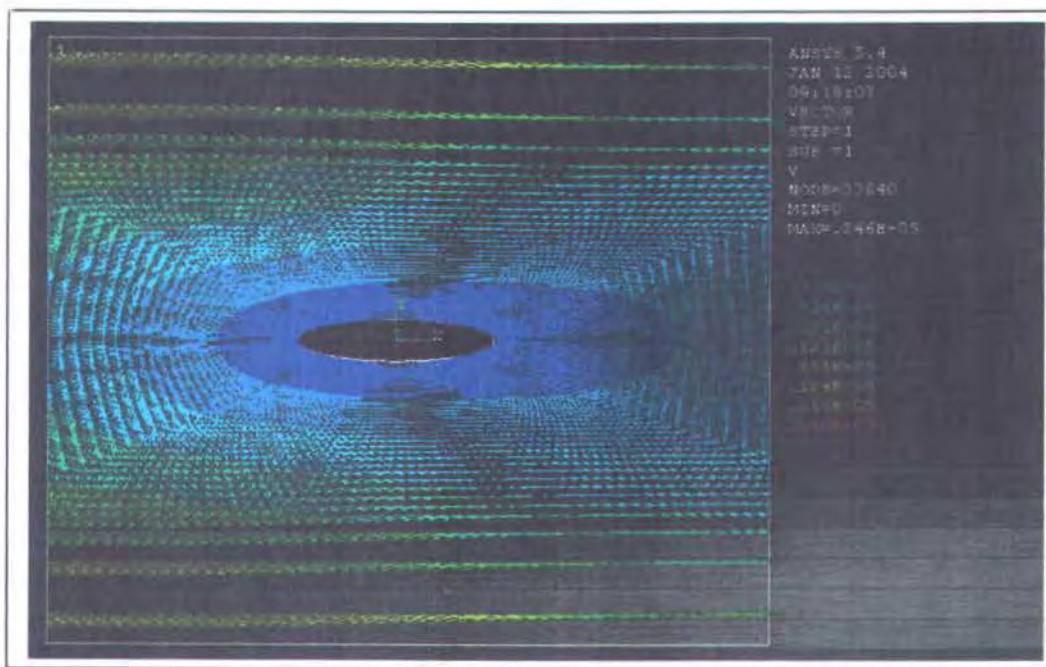
sama. Aliran disekitar penampang ellips untuk bilangan Reynolds 500 dimana aliran adalah tidak turbulen dan hambatannya disebut hambat deformasi (*deformation drag*). Lapisan batas terbentuk dititik stagnasi depan dan umumnya laminar. Didalam lapisan ini gradien tekanan tidak menguntungkan lebih mudah menyebabkan terjadinya perpisahan daripada dalam lapisan batas turbulen karena sedikitnya momentum yang dibawa masuk kedalam lapisan batas. Jika terjadi perpisahan dalam lapisan batas laminar maka lokasinya pada penampang lingkaran / ellips adalah lebih ke hulu daripada lokasinya. Dalam eksperimen ini jumlah elemen pada angka Rn 500 adalah 36600 dengan Cp 1.1 waktu yang dibutuhkan dalam iterasi 429 yaitu 1 jam 15 menit.

Perubahan Bentuk Aliran pada Vektor Plot Kecepatan pada Pemodelan Ellips

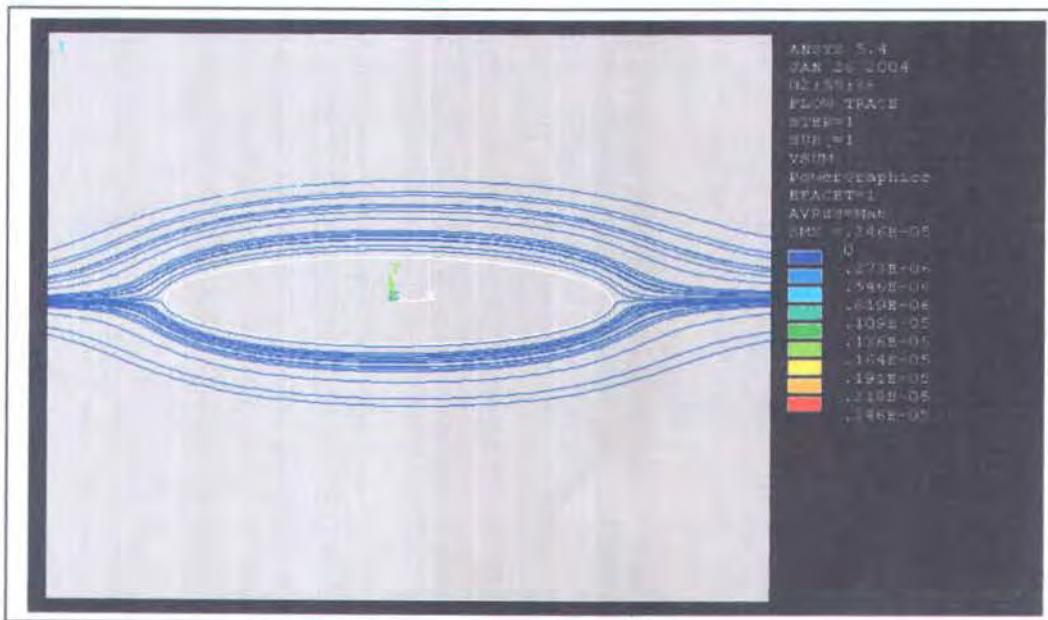
1. Analisa Vektor Plot Kecepatan model Ellips dengan angka Rn 5

Analisa :

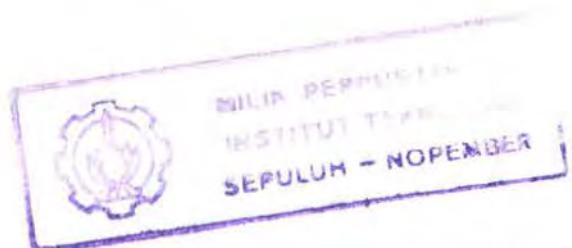
Untuk aliran yang melalui sebuah permukaan lengkung sedemikian rupa sehingga aliran meluas, profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan lengkungan) yang dimulai di tempat gradien tekanan menjadi positif. Disini partikel pada y_t mengalami penurunan kecepatan ketika mengalir sepanjang permukaan, dan akhirnya berhenti sesaat di tempat lapisan batas memisahkan diri. Jika lapisan batas bersifat laminar di daerah yang gradien tekanannya positif, kecepatan di y_t akan lebih kecil dibandingkan bila lapisan batas bersifat turbulen. Vektor plot dari kecepatan angka Rn 5 dengan bentuk permodelan ellips tampak sebuah bentuk aliran laminar yang melewati bidang geometris tersebut. Pada lapisan batas bersifat laminar didaerah yang gradien tekanannya positif, kecepatan dipermukaan solid akan lebih kecil dibandingkan bila lapisan bersifat turbulen pada permukaan bendanya (Victor, 1990).



Gambar 4.11. Vektor kecepatan pada Rn 5



Gambar 4.12. Flow trace pada angka Rn 5



Pembahasan :

Dari gambar 4.11 aliran vector plot kecepatan diperjelas dengan hasil Flow Trace pada sekitar model yang menunjukkan aliran dengan warna biru yang melewati model ellips seperti pada gambar 4.12 garis aliran ini tidak mengalami halangan (smooth). Pada permulaan aliran diatas fluida bergerak dengan distribusi kecepatan yang sama atau uniform (U_∞) ketika melewati sepanjang penampang tersebut. Untuk aliran yang melalui sebuah permukaan sedemikian rupa sehingga meluas, profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan kelengkungan) yang dimulai ditempat lapisan batas kemudian memisahkan diri (Duncan, Thomas & Young, 1970).

2. Analisa Vektor Plot kecepatan model ellips dengan angka Rn 10

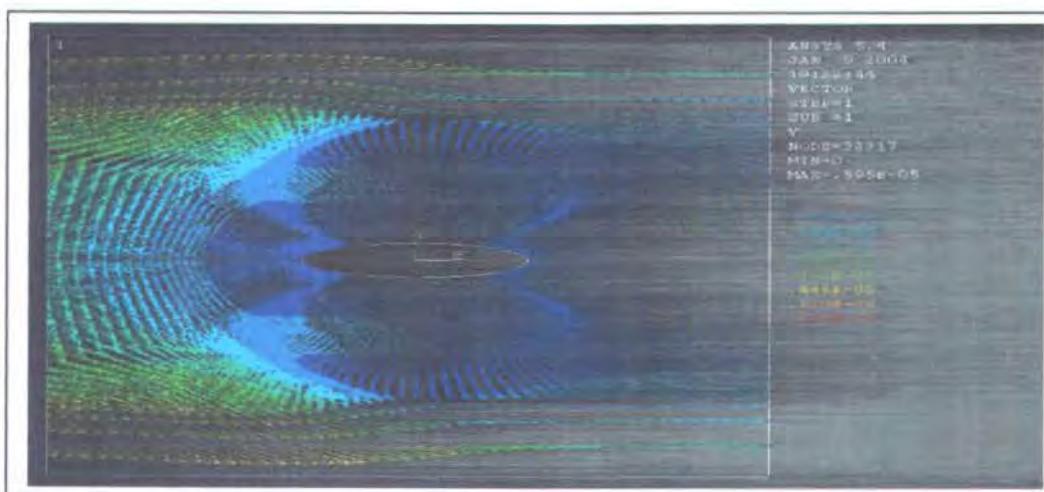
Analisa :

Perubahan bentuk aliran pada aliran berwarna biru dengan bentuk penekanan tertentu terlihat pada hasil running angka Reynolds Number 10. Aliran vector plot kecepatan pada warna hijau dengan bentuk garis vertical tampak menyudut ke arah depan model kemudian tampak tersebar disekeliling model. Untuk aliran yang ditunjukkan pada Flow Trace dari vector plot untuk angka Rn 10, dibelakang aliran terjadi suatu *wake*. Fenomena tersebut terjadi pada partikel dalam aliran laminar akan lebih rendah energi kinetiknya dan akan berhenti ditempat yang lebih dekat dari hulu dibanding bila aliran dalam lapisan batas turbulen.

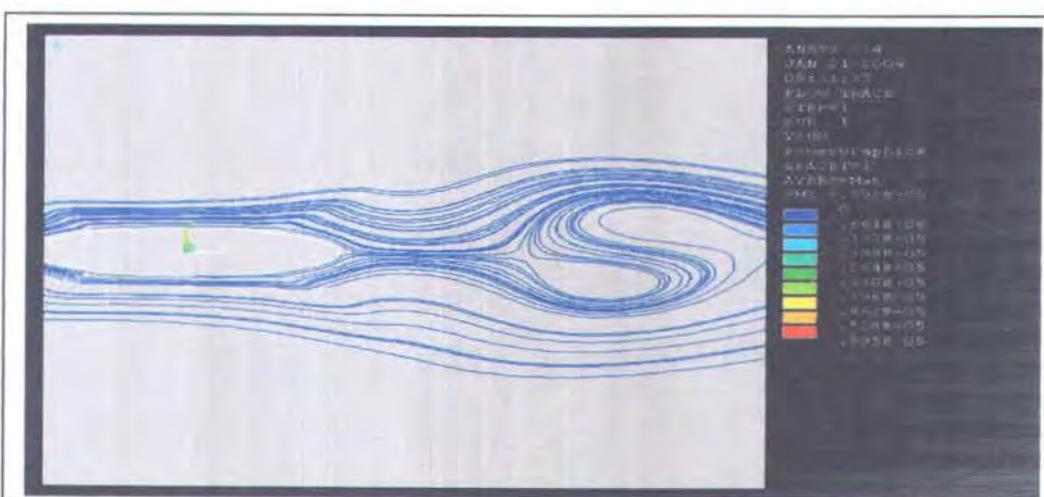
Pembahasan :

Dimana bentuk aliran tersebut tampak menggulung setelah melewati bentuk geometri dari permodelan diatas. Pada aliran dua dimensi diatas berubah karena pengaruh efek friksi yang ada pada permukaan penampang ellips, selain itu juga

aliran laminar ini dirusak oleh adanya tekanan balik yang terjadi (tampak pada gambar 4.13 bagian belakang). Pemisahan aliran tersebut tertunda bila lapisan batas dapat dibuat turbulen. Sehingga gaya total dalam arah aliran, atau gaya hambat (drag) bisa dibagi dua berdasarkan penyebabnya. Gaya hambat yang disebabkan oleh tegangan geser atau tegangan tangensial dilapisan batas disebut *skin-friction drag* (hambatan gesek kulit), sedangkan yang disebabkan tekanan netto / selisih tekanan normal terhadap permukaan disebut *form drag* (Reuben, 1993).



Gambar 4.13. Vektor plot kecepatan pada angka Rn 10



Gambar 4.14. Flow trace pada angka Rn 10

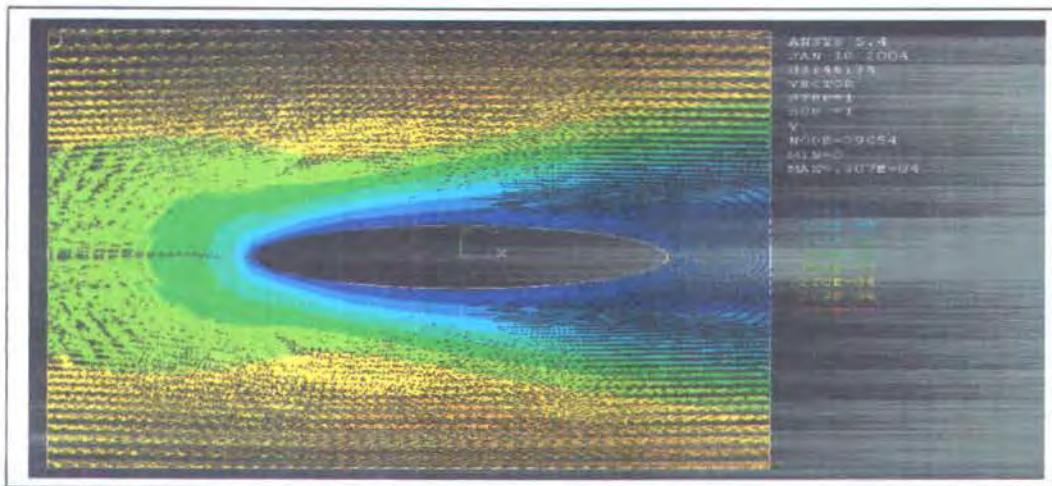
3. Analisa Vektor Plot kecepatan model ellips dengan angka Rn 50

Analisa :

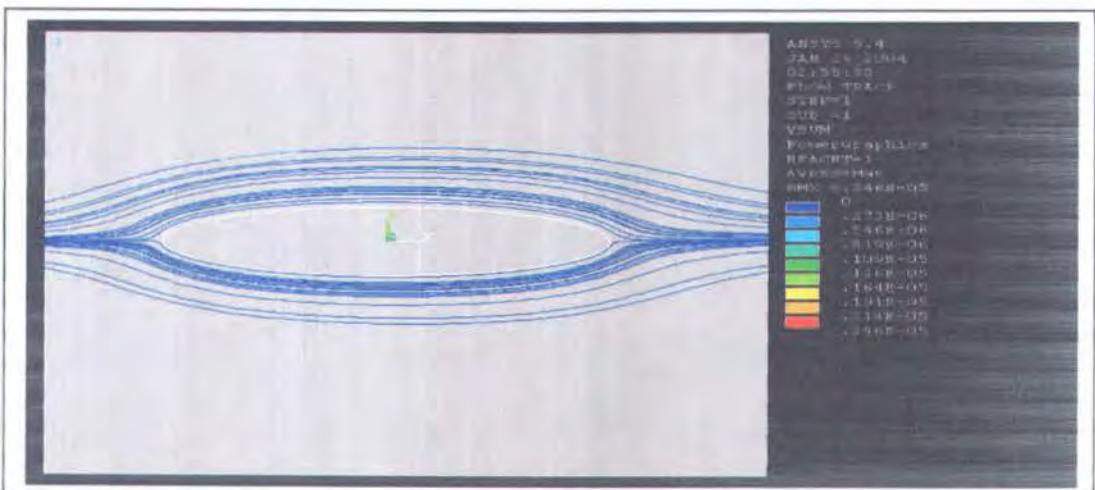
Setiap perubahan dari aliran ini terus diamati untuk mengetahui bagaimana fenomena yang terjadi pada angka Reynolds Number rendah. Perubahan bentuk aliran vector plot yang terjadi pada angka Rn 50 kembali terjadi. Bentuk alirannya tampak lebih mengikuti bentuk geometri benda dibandingkan dengan angka Rn 10. Pada aliran dengan warna hijau, kuning dan biru mengalir dengan kecepatan sesuai data pada Gambar 4.15 mengikuti bentuk model. Pada penampang ini aliran yang melalui sebuah permukaan sedemikian rupa sehingga aliran meluas, profil kecepatan akan mengalami inflesi (perubahan kelengkungan) yang dimulai ditempat lapisan batas kemudian memisahkan diri.

Pembahasan :

Garis aliran yang terjadi tidak mengalami halangan / smooth. Dimana pada permulaan aliran diatas fluida bergerak dengan distribusi kecepatan yang sama atau uniform (U_∞) ketika melewati sepanjang penampang tersebut. Sehingga lapisan batas yang bersifat laminar didaerah gradien tekanannya positif kecepatan dipermukaan solid akan lebih kecil dibandingkan bila lapisan batas bersifat turbulen pada permukaan bendanya. Hal ini ditunjukkan dengan bentuk aliran pada Flow trace pada angka Rn 50, alirannya mengikuti bentuk geometrisnya.



Gambar 4.15. Vektor plot kecenatan pada angka $Rn = 50$



Gambar 4.16. Flow trace pada angka $Rn = 50$

4. Analisa Vektor Plot kecepatan model ellips dengan angka Rn 100

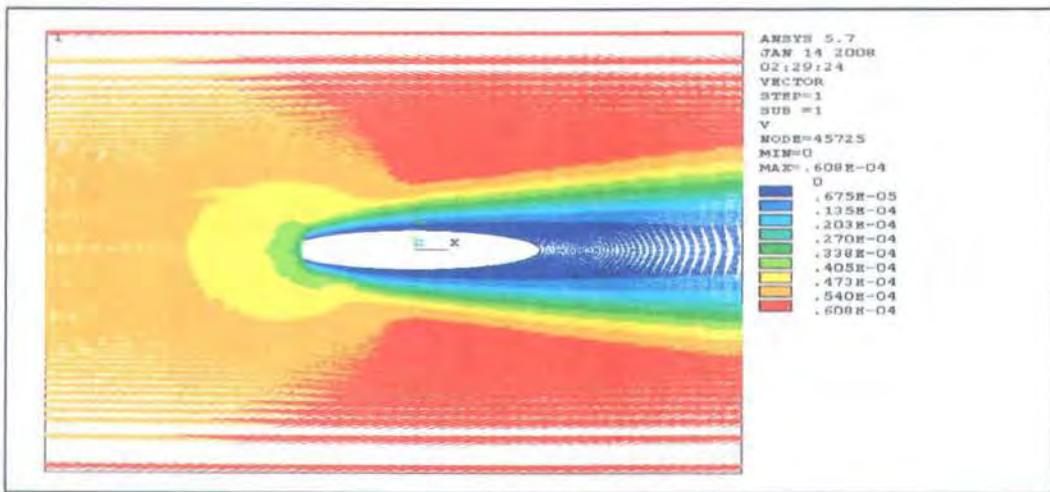
Analisa :

Penekanan aliran tampak terjadi di angka Rn 100 dengan adanya perubahan warna yang lebih dominan pada bagian depan benda sedangkan bentuk aliran lainnya masih mengikuti bentuk geomteri benda tersebut. Aliran pada warna merah tampak dominan dengan kecepatan yang maksimal menunjukkan medan aliran yang dilewati. Pada kombinasi warna untuk kuning, hijau dan biru muda tampak berhimpit pada bagian depan model, disini terjadi suatu penekanan kecepatan dalam suatu model dengan kecepatan yang berbeda. Setiap aliran fluida untuk aliran viscous yang melewati suatu gangguan benda (contoh ellips distors) akan mengalami pergeseran karena vorticity yang terjadi besar sehingga aliran dan aliran tersebut akan berubah arah pada titik tersebut seiring dengan solid.

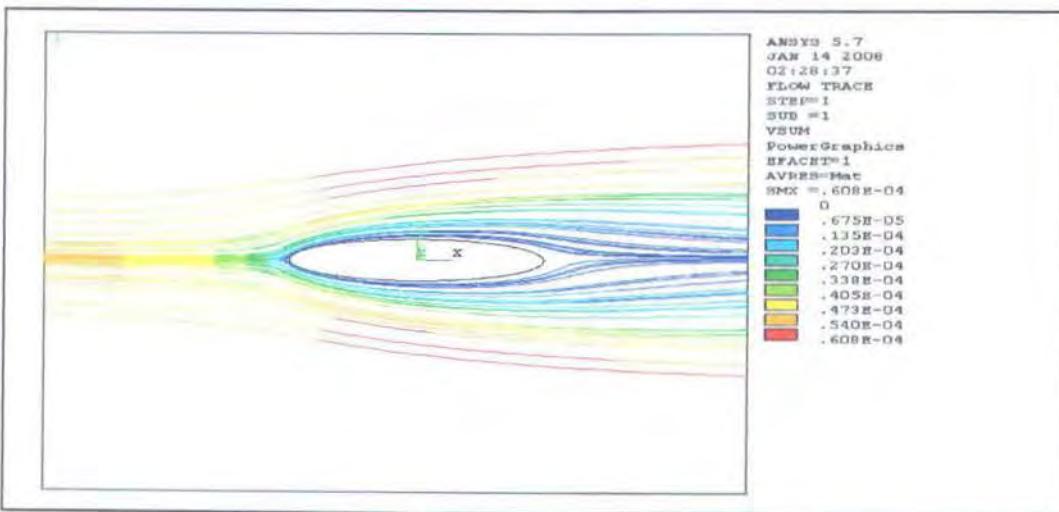
Pembahasan :

Pada karakteristik aliran ini terjadi gradien tekanan yang tidak menguntungkan, yaitu tekanan yang meningkat dalam arah ke hilir, lapisan batas cepat bertambah tebal. Gradien tekanan yang tidak menguntungkan seperti tegangan geser batas memperkecil momentum didalam lapisan batas; dan jika kedua nya berjalin maka jalinan akan memperlambat berkembangnya gerakan lapisan batas. Kejadian (fenomena) ini disebut pembedahan (separation) (Vitousek, 1999). Diarahkan bahwa arus aliran yang berpindah dari batas ini dikenal sebagai arus ikut (*wake / jejak*). Akibat perpisahan adalah berkurangnya jumlah berisi keripikiran setelah arus ikut. Gerakan fluida terhadap fluida sekitarnya dengan mengurangi energi kinetiknya dengan akibat bersih bahwa penurunan tekanan

tidak sempurna dan kerugian aliran (hambatan), dimana tekanan yang tidak menguntungkan sangat kecil hingga menyebabkan menebalnya lapisan batas.



Gambar 4.17. Vektor plot kecepatan pada angka Rn 100



Gambar 4.18. Flow trace pada angka Rn 100

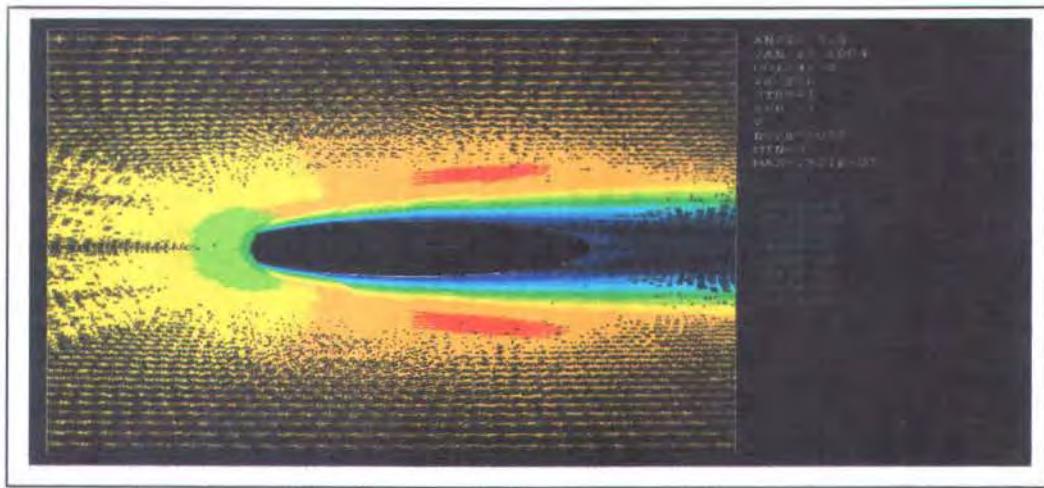
5. Analisa Vektor Plot kecepatan model ellips dengan angka Rn 500

Analisa :

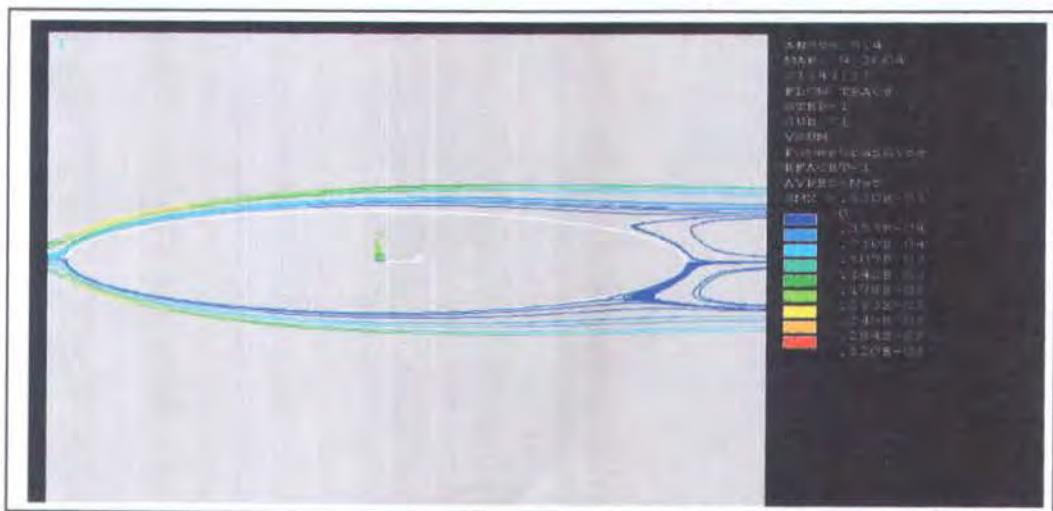
Perubahan pada vector plot lebih tampak terjadi setelah hasil test untuk angka Rn 500. Disini tampak aliran berwarna merah yang melewati dibagian benda geometri bergeser kearah atas. Aliran yang berwarna kuning pada vector plot menyebar dan menekan kearah model, aliran ini tampak mendorong kecepatan aliran warna coklat. Aliran yang melalui sebuah permukaan sedemikian rupa sehingga aliran meluas dan profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan kelengkungan) yang dimulai ditempat lapisan batas kemudian memisahkan diri.

Pembahasan :

Partikel dalam aliran laminar dalam angka Reynolds 500 yang tampak dari hasil eksperimen menunjukkan energi kinetiknya lebih rendah dan akan berhenti ditempat yang lebih dekat dari hulu dibanding bila aliran dalam lapisan batas turbulen. Garis aliran batas harus meninggalkan batas dititik pisah (*separation point*), dan disebelah hilir titik ini gradient tekanan yang tidak menguntungkan itu mengakibatkan aliran-balik didekat dinding (*Victor, 1990*). Daerah disebelah hilir garis aliran yang berpisah dari batas ini dikenal sebagai arus ikut (*wake*), sehingga menimbulkan suatu gaya total dalam arah aliran, atau gaya hambat (*drag*) yang terbagi dua berdasarkan penyebabnya. Gaya hambat yang disebabkan oleh tegangan geser atau tegangan tangensial dilapisan batas disebut *skin-friction drag* (hambatan gesek kulit), sedangkan yang disebabkan tekanan netto / selisih tekanan normal terhadap permukaan disebut *form drag*.



Gambar 4.19. Vektor plot kecepatan pada angka Rn 500



Gambar 4.20. Flow trace pada angka Rn 500

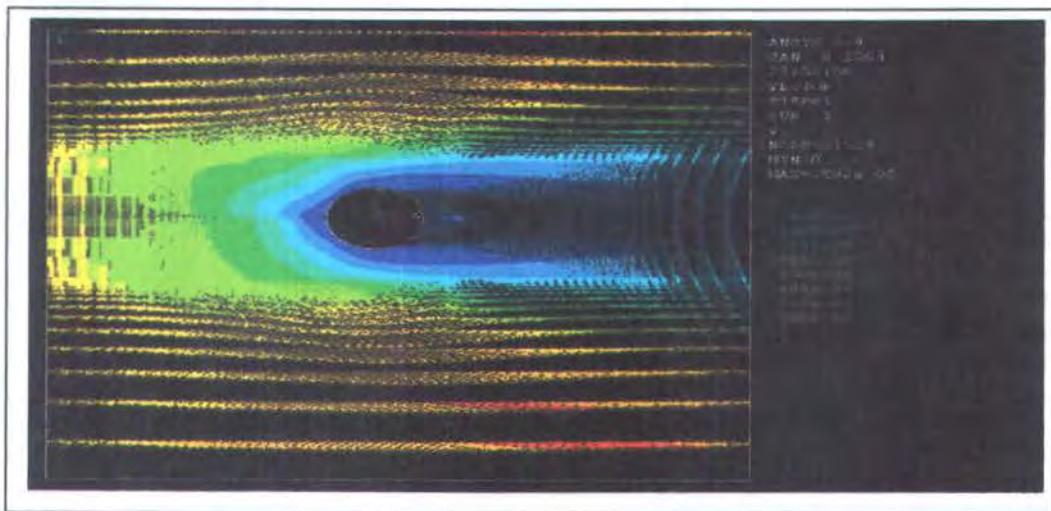
Perubahan bentuk Aliran pada Vektor plot kecepatan pada pemodelan lingkaran***1. Analisa Vektor Plot kecepatan model lingkaran dengan angka Rn 5***

Analisa :

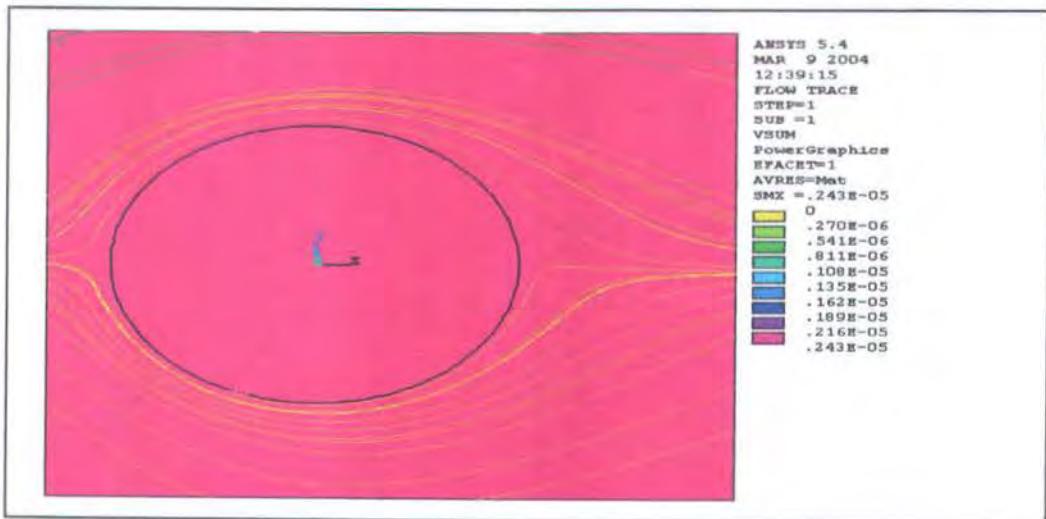
Perubahan vector plot untuk menunjukkan aliran ekstrim yang terjadi disekitar benda / geometri diulas secara singkat dibawah ini. Vektor plot kecepatan aliran pada angka Reynolds 5 terbentuk aliran laminar yang melewati bentuk diatas. Perubahan yang kurang signifikan tampak pada belakang aliran berwarna biru. Aliran kecepatan berwarna kuning tampak mengalir disekeliling model sedangkan untuk pola aliran biru yang mengelilingi model lingkaran berbentuk ellips, menunjukkan tekanan kecepatan yang memanjang kearah belakang.

Pembahasan :

Aliran dengan penampang lingkaran ini meluas sehingga profil kecepatannya akan mengalami infleksi (perubahan kelengkungan) yang dimulai ditempat lapisan batas kemudian memisahkan diri. Pada lapisan batas bersifat laminar didaerah yang gradient tekanannya positif, kecepatan dipermukaan solid akan lebih kecil dibandingkan bila lapisan batas bersifat turbulen pada permukaan bendanya.



Gambar 4.21. Vektor plot kecepatan pada angka Rn 5



Gambar 4.22. Vektor plot lingkaran Rn 5

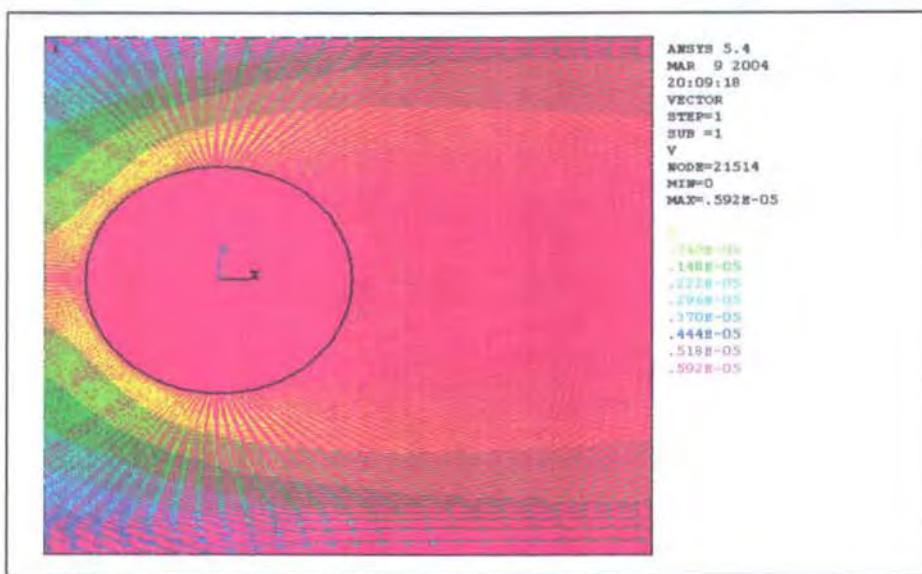
2. Analisa Vektor Plot kecepatan model lingkaran dengan angka Rn 10

Analisa :

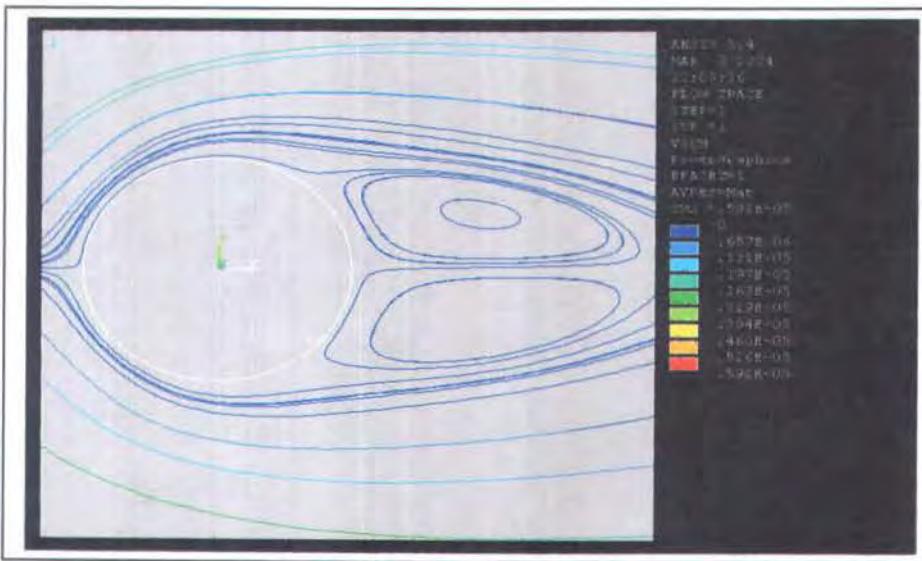
Fenomena vektor plot kecepatan pada angka Rn 10 masih tetap berbentuk laminar tetapi terjadi perubahan pada aliran dibelakang bentuk geometri yang sudah terlewati. Aliran didepan geometri tampak seperti menekan kearah lingkaran tersebut. Aliran berwarna biru didepan model menyudut dengan kecepatan (sesuai data pada gambar), pada arah belakang aliran model tertahan dengan bentuk alur aliran yang tertahan. Aliran disekeliling model tampak mengalir seperti garis-garis kecepatan. Pembulatan permukaan / penampang lingkaran depan benda guna memperkecil peluang terjadinya perpisahan aliran ditepi yang runcing adalah efektif.

Pembahasan :

Sifat laminar / turbulen lapisan batas berpengaruh terhadap posisi titik pisah. Perpindahan momentum yang lebih kecil didalam lapisan batas laminar memerlukan gradient tekanan tak menguntungkan yang lebih kecil, sehingga menyebabkan perpisahan timbul aliran yang teratur. Dengan gradien tekanan yang tidak menguntungkan, yaitu tekanan yang meningkat dalam arah ke hilir, lapisan batas cepat bertambah tebal. Dimana tegangan geser batas pada gradien tekanan tersebut memperkecil momentum didalam lapisan batas. Sehingga tampak pada aliran batas meninggalkan batas titik pisah (*separation point*) dan disebelah hilir titik ini gradien tekanan yang tidak menguntungkan mengakibatkan aliran-balik didekat dinding. Daerah disebelah hilir garis aliran yang berpisah dari batas ini dikenal sebagai arus ikut (*wake*).



Gambar 4.23. Vektor plot lingkaran Rn 10



Gambar 4.24. Flow trace pada angka Rn 10

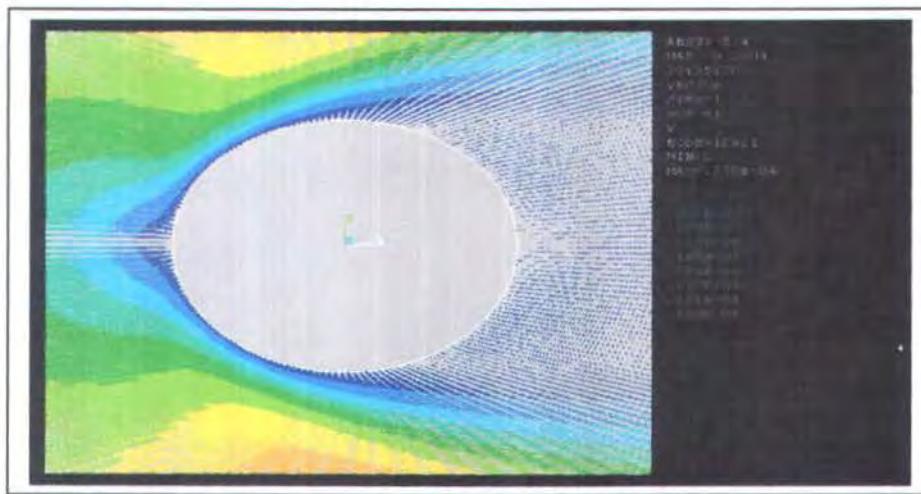
3. Analisa Vektor Plot kecepatan model lingkaran dengan angka Rn 50

Analisa :

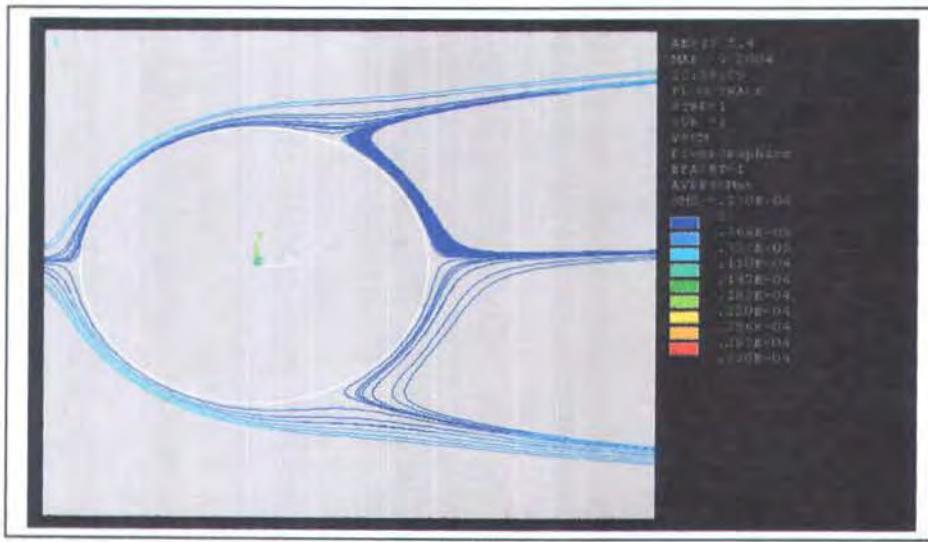
Terjadi perubahan bentuk aliran yang melewati geometri lingkaran dengan angka Reynolds Number 50. Dibawah ini tampak suatu aliran *wake* yang tidak terlalu jelas pada vector plot kecepatan yang ditampilkan. Pada ujung model lingkaran dengan Rn 50 tampak ada pengurangan aliran atau distribusi aliran yang melewati model tidaklah merata. Lapisan batas terbentuk dititik stagnasi depan dan umumnya laminar. Didalam lapisan ini gradien tekanan tidak menguntungkan lebih mudah menyebabkan terjadinya perpisahan daripada dalam lapisan batas turbulen karena sedikitnya momentum yang dibawa masuk kedalam lapisan batas. Jika terjadi perpisahan dalam lapisan batas laminar maka lokasinya pada penampang lingkaran adalah lebih ke hulu daripada lokasinya.

Pembahasan :

Aliran yang terlihat terkumpul tersebut diperjelas lagi dengan melihat Flow Trace disekitar geometri yang dilewati aliran tersebut. Pada aliran batas yang meninggalkan batas dititik pisah (*separation point*), dan disebelah hilir titik ini gradien tekanan yang tidak menguntungkan mengakibatkan aliran-balik didekat dinding. Daerah disebelah hilir garis aliran yang berpisah dari batas ini dikenal sebagai arus ikut (*wake*). Dimana aliran yang berwarna biru tampak membentuk suatu lingkaran ellips dibelakang model dimana fenomena ini menunjukkan bahwa pada angka Reynolds rendah-pun yaitu Rn 50 dengan bentuk model lingkaran dapat menimbulkan *wake*.



Gambar 4.25. Vektor plot lingkaran Rn 50



Gambar 4.26. Flowtrace model lingkaran pada Rn 50

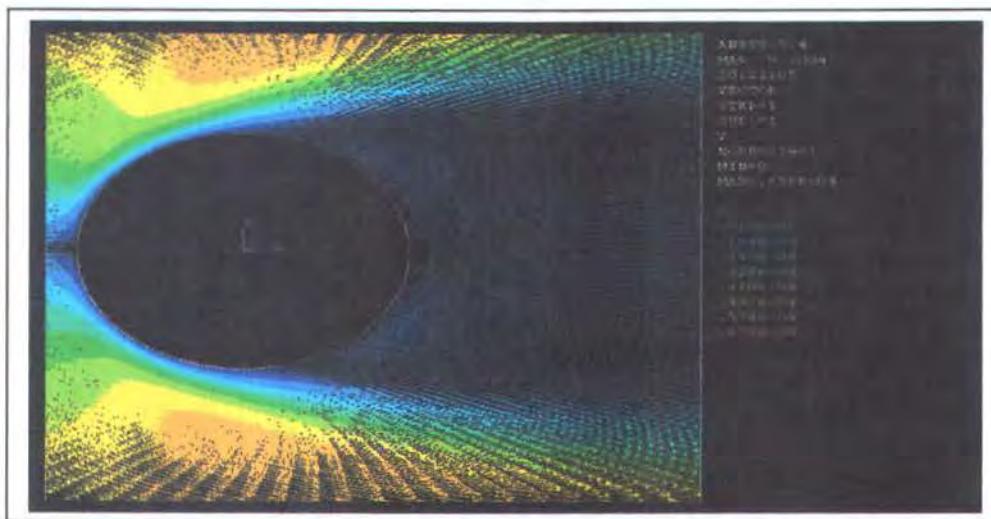
4. Analisa Vektor Plot kecepatan model lingkaran dengan angka Rn 100

Analisa :

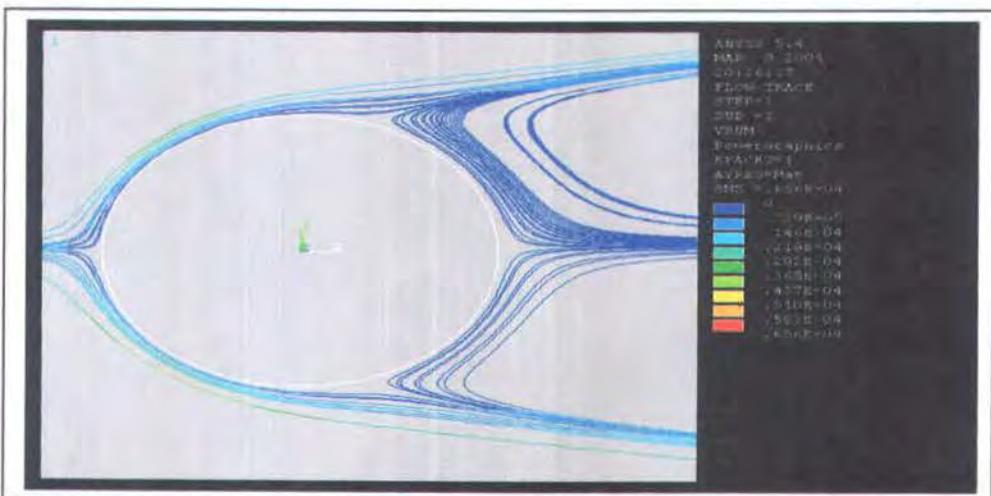
Fenomena aliran berupa lingkaran dibelakang geometri (aliran yang sudah terlewati) atau disebut wake menunjukkan bahwa diangka Reynolds rendah-pun terdapat perubahan aliran. Hal tersebut diatas masih dibandingkan dengan perubahan vektor plot aliran pada Reynolds Number 100. Hasil aliran yang melewati model lingkaran diperjelas dengan menampakkan aliran-aliran yang melewatiinya. Aliran yang berwarna biru, merah, kuning dan hijau tampak smooth saat melewati model diatas tetapi dibelakang model seperti gambar 4.27 timbul suatu fenomena 2 aliran yang berputar pada suatu tempat, disebut *wake*. Dimana lapisan batas terbentuk dititik stagnasi depan dan umumnya laminar.

Pembahasan :

Didalam lapisan ini gradien tekanan tidak menguntungkan lebih mudah menyebabkan terjadinya perpisahan daripada dalam lapisan batas turbulen karena sedikitnya momentum yang dibawa masuk kedalam lapisan batas. Jika terjadi perpisahan dalam lapisan batas laminar maka lokasinya pada penampang lingkaran adalah lebih ke hulu daripada lokasinya. Untuk gradien tekanan yang tidak menguntungkan, yaitu tekanan yang meningkat dalam arah ke hilir, lapisan batas cepat bertambah tebal. Gradien tekanan yang tidak menguntungkan seperti tegangan geser batas memperkecil momentum didalam lapisan batas; dan jika keduanya bekerja pada jarak cukup akan menyebabkan berhentinya gerakan lapisan batas. Kejadian (fenomena) ini disebut perpisahan (*separation*) sehingga menyebabkan aliran-balik didekat dinding, dimana daerah disebelah hilir garis aliran yang berpisah dari batas dikenal sebagai arus ikut (*wake*).



Gambar 4.27. Vektor plot kecepatan pada angka Rn 100



Gambar 4.28. Flowtrace angka Rn 100

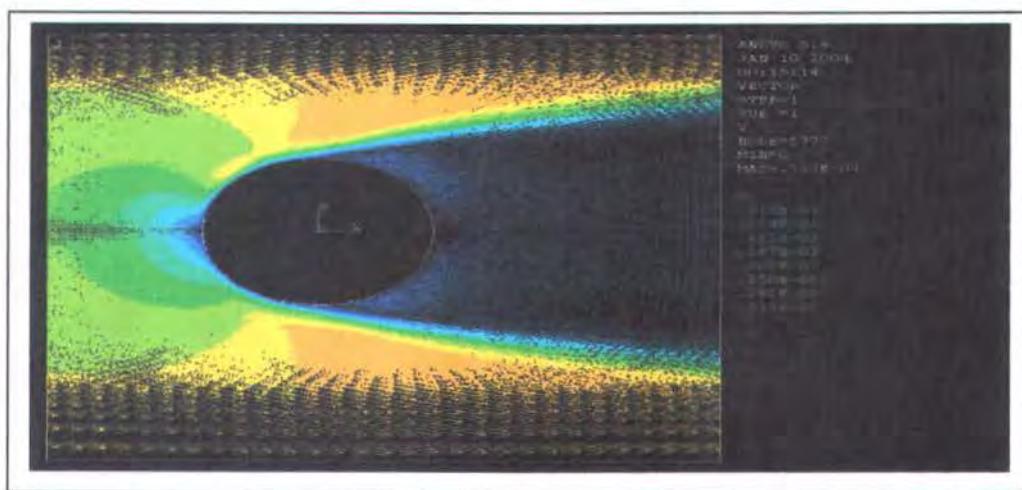
5. Analisa Vektor Plot kecepatan model lingkaran dengan angka Rn 500

Analisa :

Pada angka Reynolds 500 perubahan bentuk aliran pada vektor plot kecepatan tetap ditunjukkan untuk melihat perubahan-perubahan mana yang mengalami kejadian signifikan dari bentuk geometri sama tetapi eksperimen dengan angka Reynolds yang berubah-ubah. Aliran dengan kecepatan berwarna biru tampak terfokus diujung model lingkaran kemudian bergeser melewati model bersama aliran kecepatan berwarna hijau, kuning dan coklat sesuai dengan data kecepatan pada Gambar 4.29 sebelah kanan. Dimana aliran disekitar penampang lingkaran untuk bilangan Reynolds rendah dimana aliran adalah tidak turbulen dan hambatannya disebut hambatan deformasi (*deformation drag*).

Pembahasan :

Lapisan batas terbentuk dititik stagnasi depan dan umumnya laminar. Didalam lapisan ini gradien tekanan tidak menguntungkan lebih mudah menyebabkan terjadinya perpisahan daripada dalam lapisan batas turbulen karena sedikitnya momentum yang dibawa masuk kedalam lapisan batas. Jika terjadi perpisahan dalam lapisan batas laminar maka lokasinya pada penampang lingkaran adalah lebih ke hulu daripada lokasinya. Fenomena yang terjadi pada angka Rn 500 diperjelas lagi dengan melihat aliran pada Flow trace yang melewati model. Aliran yang berputar dibelakang tampak juga pada angka Rn 500 dalam gambar 4.30. dibawah ini. Dimana gradien tekanan yang tidak menguntungkan seperti tegangan geser batas memperkecil mometum didalam lapisan batas; dan jika keduanya bekerja pada jarak yang cukup akan menyebabkan berhentinya gerakan lapisan batas.



Gambar 4.25. Vektor kecepatan pada Rn 500



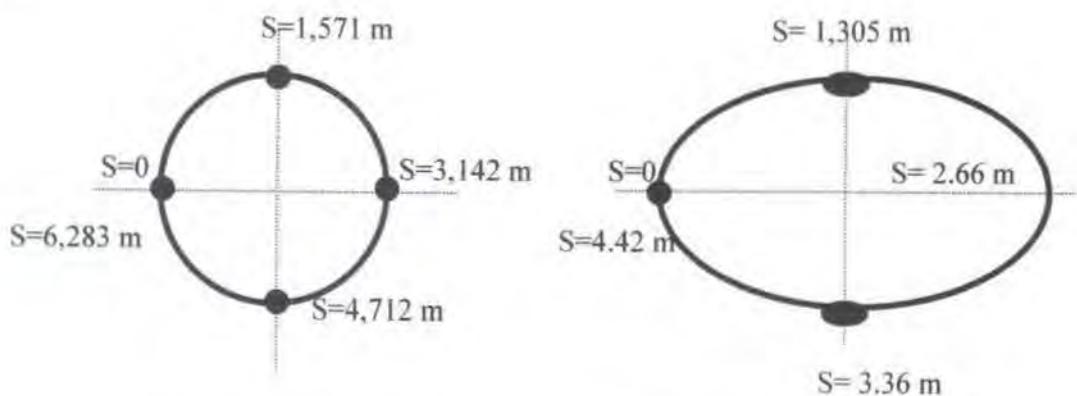
Gambar 4.26. Flowtrace pada angka Rn 500

Dibawah ini data elemen dan waktu yang dibutuhkan saat proses :

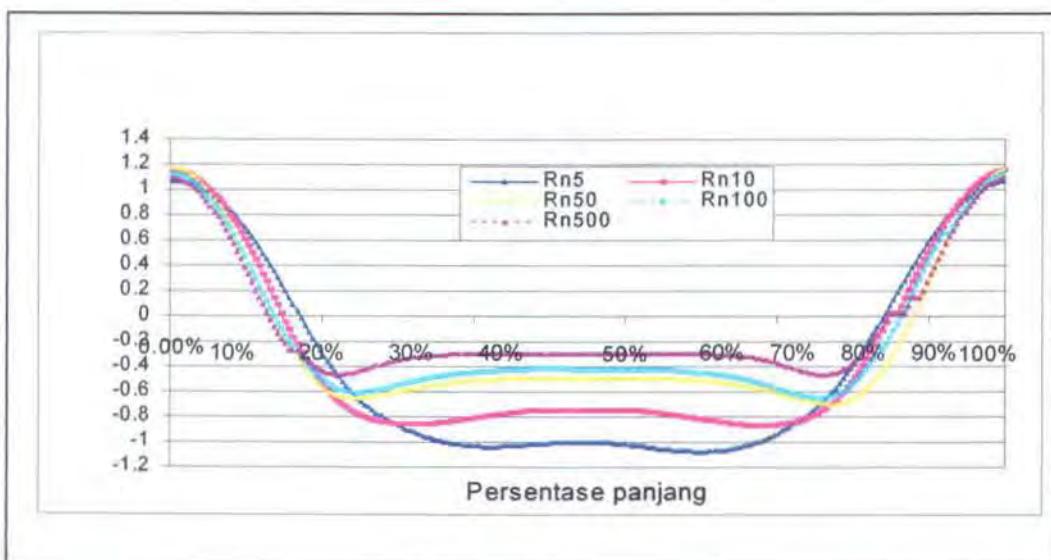
Lingkaran					Ellips			
Reynolds	Elemen	Cp	Iterasi	Jam (waktu)	Elemen	Cp	Iterasi	Jam (waktu)
Rn 5	28300	1.07	990	2:45	33500	0.966	990	2:45
Rn 10	25600	1.15	830	2:21	32100	1.05	995	2:57
Rn 50	23200	1.16	840	2:21	41600	1.2	990	2:49
Rn 100	49600	1.1	810	1:55	49600	1.26	865	1:58
Rn 500	36600	1.09	810	1:45	36600	1.1	429	1:15

4.2. Analisa Koefisien Tekanan (Cp)

Analisa koefisien tekanan digunakan untuk suatu terminologi S agar memudahkan baik dalam penggambaran grafik maupun dalam mencari posisi suatu harga atau nilai pada titik (*node*) tertentu dalam penampang model ellips maupun lingkaran. Dimana S merupakan jarak (satuan meter) yang diukur dari titik *leading edge* pada penampang lingkaran atau ellips dari titik tengah sisi depan yang pertama terkena aliran pada penampang model tersebut, kearah sekeliling penampang hingga satu keliling penuh. Maka untuk penampang lingkaran maupun ellips, pada titik *leading edge*-nya $S = 0$, dan setelah satu putaran maka $S = \text{keliling lingkaran} = 6,283$ m. Sedangkan untuk penampang ellips, $S = 0$ adalah pada titik tengah sisi depan yang pertama terkena aliran pada penampang ellips, dan setelah satu putaran penuh maka $S = \text{keliling ellips} = 4,42$ mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut ini.

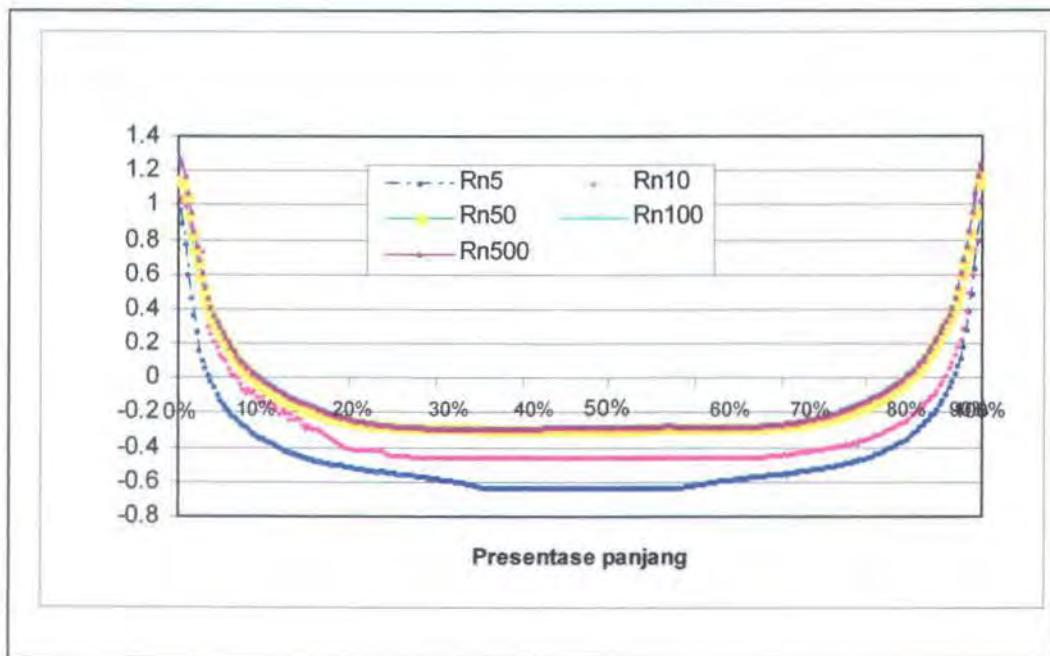


Gambar 4.27. Terminologi S pada penampang lingkaran dan ellips

1. Grafik Koef. Press pada penampang lingkaran dengan**Rn (5, 10, 50, 100 dan 500)**

Gambar 4.27. Grafik Koef.Presure pada penampang lingkaran dengan berbagai angka Reynolds

Bentuk grafik diatas adalah hasil dari iterasi untuk mengetahui korelasi / hubungan antara koef.pressure pada penampang lingkaran dengan angka Reynolds Number yang dilakukan eksperimen. Perubahan jarak pada setiap iterasi dari hasil running setiap Reynolds Number menunjukkan terjadinya perubahan tekanan yang diakibatkan kecepatan pada model. Pada Rn 50 tampak jarak lengkungnya lebih pendek dibandingkan dengan Rn 5, begitu juga dengan kondisi grafik untuk angka Rn lainnya, dimana angka Rn 100 berhimpit dengan Rn 10.

2. Grafik Koef. Press pada penampang ellips dengan angka**Rn (5, 10, 50, 100 dan 500)**

Gambar 4.28. Grafik Koef.Presure penampang ellips dengan berbagai angka Reynolds

Penggabungan grafik diatas untuk melihat hasil iterasi dari percobaan pada setiap penampang ellips dengan harga Reynolds Number yang berbeda-beda. Pada angka Rn 10 bentuk grafiknya berlainan sekali dengan bentuk grafik Rn 5, hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi atau keadaan terjadinya proses aliran yang melewati suatu model dengan angka Reynolds Number tertentu dapat menghasilkan suatu keadaan yang berbeda pula. Hal ini dapat dilihat setelah 2 fenomena yang berbeda pada angka Rn 5 dan Rn 10, perubahan grafik angka Rn 50 hingga Rn 500 tampak mengikuti alur, bentuk dan jarak yang sama.



4.3. Persamaan-persamaan lapisan batas Prandtl

Persamaan Navier-Stokes yang disederhanakan dan persamaan kontinuitas untuk aliran dua-dimensi disebut *persamaan lapisan batas Prandtl*. Dengan x dan u ditetapkan sejajar terhadap batas dan y serta v normal terhadap batas, persamaan tersebut dapat ditulis sebagai

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad [4.1]$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Kondisi atau persyaratan kedua ($\partial p / \partial y = 0$) menyiratkan konstannya tekanan di penampang melintang lapisan batas di mana saja. Persamaan Bernoulli yang diterapkan pada aliran di sebelah luar lapisan batas menentukan tekanan di dalam lapisan batas di bagian yang manapun.

Untuk aliran yang sejajar terhadap pelat rata dengan kecepatan arus bebas konstan, tekanan itu juga konstan, sehingga $\partial p / \partial y = 0$ asalkan gravitasi tidak ada. Dengan demikian persamaan lapisan batas Prandtl menjadi

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \text{dan} \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad [4.2]$$

dengan kondisi lapisan batas bahwa $u(y) = u_s$ pada $x = 0$; $u(x) = v = 0$ pada $y = 0$ dan $u(x) = u_s$ pada $y = \infty$. Kondisi pertama mengharuskan $\delta = 0$ pada $x = 0$.

Solusi Persamaan Lapisan Batas Prandtl untuk Lapisan Batas Laminer

Dimana tebal perpindahan δ^* (displacement thickness) adalah

$$\begin{aligned}\delta^* &= \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{u_s}\right) dy = \int_0^\infty \left(1 - f'\right) \sqrt{\frac{vx}{u_s}} d\eta \\ &= \sqrt{\frac{vx}{u_s}} [\eta_1 - f(\eta_1)]\end{aligned}$$

dengan η_1 terletak di luar lapisan batas, dimana $[\eta_1 - f(\eta_1)] = 1.72$, koefesien hambatan dengan panjang L , diameter d dan B lebar. Dimana tebal lapisan batas adalah (Reuben MO, 1993)

$$\frac{\delta}{x} = \frac{4,91}{(u_s x / v)^{1/2}}$$

Dimana :

$1 \text{ m} = 3.281 \text{ ft}$ (tabel faktor konversi / lampiran)

v = koefesien kinematis (air) = $1.09 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$

x = panjang (jarak) model yang dilewati aliran

δ = tebal lapisan batas laminar (ft)

δ^* = tebal perpindahan (ft)

$[\eta_1 - f(\eta_1)] = 1.72$

4.4. DISKUSI

Karakteristik aliran yang terjadi pada setiap penampang model lingkaran maupun ellips dengan angka Reynolds rendah. Dari pola flow trace untuk penampang lingkaran maupun ellips diatas yang menunjukkan suatu perbedaan pola aliran yang ditunjukkan pada CFD angka Reynolds 10 pasangan wake yang terbentuk dibelakang penampang telah terlihat tunggal di antara penampang dibandingkan pada angka Reynolds 5 yang tampak terjadi perubahan aliran dibelakang penampang. Hal ini terjadi pula jika dibandingkan dengan penampang ellips pada angka Reynolds 10 timbul suatu pola aliran yang berbeda dibandingkan pada angka Reynolds 5. Sedangkan pada angka Reynolds 50 dan 100 untuk penampang ellips tidak terlihat terjadi wake. Fenomena ini berlawanan dengan yang terjadi pada penampang lingkaran dengan angka Reynolds 50 dan 100 terjadi suatu pola aliran dibelakang penampang yang semakin memanjang berupa wake. Pola flow trace pada penampang kembali terjadi perubahan pada angka Reynolds 500 baik untuk penampang model ellips maupun lingkaran. Pada kedua penampang model tersebut dengan angka Reynolds 500 terjadi pemisahan pasangan wake yang semakin menjauh ke arah samping luar penampang dimana titik separasi cenderung tetap dengan pertambahan angka Reynolds, yaitu pada bagian belakang penampang model.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan untuk melihat fenomena perubahan pada permodelan ellips dan lingkaran dengan angka Reynolds Number 5, 10, 50 ,100 dan 500 menggunakan metode numerik (*Computational Fluid Dynamics*) dengan software Ansys 5.4, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Perubahan aliran fluida yang terjadi dibelakang penampang pada angka Reynold (kecepatan) yang rendah dengan model lingkaran maupun ellips terjadi pada Rn 5 hingga Rn 500 , terjadinya separasi aliran ketika melintasi suatu profil penampang model. Dimana daerah aliran yang menyempit (*converging*), penambahan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan sedangkan aliran yang meluas (*diverging*), tekanan meningkat sesuai dengan arah aliran.

2. Aliran yang searah dengan angka Rn 5 hingga 500 pada penampang model ellips dan lingkaran arah peningkatan tekanan disebut aliran dengan gradien positif (*adverse*) yang terjadi dalam aliran di sekitar batas lengkung, menjelang titik stagnasi dan dalam aliran yang meluas. Dimana tebal lapisan batas pada permukaan lingkaran angka Reynolds 10, 50 dan 100 sebesar 4,14 m dengan tebal perpindahan sebesar 1,45 m , sedangkan pada permukaan ellips perubahan aliran dibelakang model yang tampak pada angka Reynolds 10 dan 500 dengan dan gejala tersebut dikenal sebagai *pemisahan lapisan batas*. Untuk fenomena

dibelakng model terdapat kesamaan pada penampang ellips maupun lingkaran pada angka Reynolds 5 berupa aliran laminar, dimana titik pemisahan ini mengawali suatu daerah yang disebut *wake*.

3. Data dan visualisai gambar dari hasil eksperimen yang menggunakan program CFD dapat ditunjukkan, dimana keakuratan hasil dan efesiensi waktu dapat terlihat pada jumlah elemen yang dibutuhkan pada setiap penampang model lingkaran maupun ellips.

5.2 SARAN

Untuk memperoleh hasil eksperimental yang lebih maksimal dalam penelitian dari program ANSYS 5.4 maupun 5.7 penulis memberikan saran serta pertimbangan kepada para peneliti yang ingin melanjutkan. Saran-saran yang ingin disampaikan oleh penulis adalah sebagai berikut :

1. Pemahaman akan permodelan yang akan diteliti sangatlah membantu untuk mempermudah penggeraan.
2. Dari hasil eksperimen membuktikan bahwa keakuratan dari hasil ditentukan dari proses pengeraan permodelan tersebut dan didasarkan atas acuan buku teks yang dapat membantu penulisan..

DAFTAR PUSTAKA

D A F T A R P U S T A K A

FloWorks 2001 Fundamentals, “Flow Over a Circular Cylinder”,
www.flowokrs.com/product/7_circular_cylinder.pdf, Validation Examples, 2001

White F.M., “**Mekanika Fluida**”, Alih bahasa : Andi .K, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1997

Schetz, J.A & Fuhs, A.E, “**Handbook and Fluid Machinery Volume II**”, A Willey Interscience Publication, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1996

Anderson, J.D.JR., “**Computational Fluid Dynamics**”, The Basics With Applications, Department of Aerospace Engineering University of Maryland, 1995

Versteeg, H.K and Malalasekera W, “**An introduction to Computational fluid Dynamics**”, Published Longman Group Ltd, 1995

Fox, R.W and McDonald, A.T, “**Introduction To Fluid Mechanics**”, 4th edition, Jhon Willey and Son, Inc, 1994

Reuben M.O, Steven J.W, “**Dasar-dasar Mekanika Fluida Teknik**”, Edisi kelima, Alih bahasa : Alex T.K, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1993

Victor L.S and Wylie E.B, “**Mekanika Fluida**”, Edisi Delapan, Alih bahasa : Arko P, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1990

Rouse H, “**Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers**”, McGraw-Hill, New York, 1983

Schlichting H., “**Boundary Layer Theory**”, 7th ed. McGraw-Hill, New York, 1979

Duncan W.J, Thom A.S and Young A.D, “**Mechanics Fluid**”, The English Language Book Society and Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1970

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

DATA NUMERIK

Lampiran : Jumlah elemen hasil running Rn 5

DISPLAY ALL STATISTICS AND ESTIMATES
DISPLAY FEM MODEL SIZE INFORMATION
***** FEM MODEL SIZE *****

Maximum Node Number = 33830
Number of Defined Nodes = 33830
Number of Selected Nodes = 33830
Maximum DOF per Node = 7

Maximum Element Number = 33500
Number of Defined Elements = 33500
Number of Selected Elements = 33500
Estimate of -m required = 125 MB

DISPLAY MEMORY INFORMATION

***** MEMORY STATISTICS *****

Requested Work Space (MB) = 128.00
Work Space Obtained (MB) = 131.21

ANSYS Data Base Page Size (KB) = 64.00
Max. Data Base Pages on Disk = 32764
Max. Data Base Space Size (MB) = 2047.75
Data Base Pages in Memory = 1022
Memory for Data Base Pages(MB) = 63.88
ANSYS Scratch Memory Size (MB) = 67.21

Binary I/O Page Size (KB) = 16.00
Buffers Per Solution File = 4
Buffer Scratch Memory (MB) = .38

Analysis Type = 0
Available Scratch Memory (MB) = 66.83

PRINT ALONG PATH DEFINED BY LPATH COMMAND DSYS = 0
 2D XY 1000 ITERATIONS ISOTHERMAL INCOMPRESSIBLE LAMINAR FLOW
 ***** PATH VARIABLE SUMMARY*****

S	XG	YG	PCOE	TAUW
0	-1	0	0.96645	4.45E-10
1.44E-02	-0.9983	1.43E-02	0.89512	4.45E-10
2.87E-02	-0.99376	2.79E-02	0.76959	6.68E-10
4.31E-02	-0.98682	4.05E-02	0.60068	7.81E-10
5.75E-02	-0.9781	5.19E-02	0.46465	7.97E-10
7.19E-02	-0.96828	6.24E-02	0.36376	7.99E-10
8.63E-02	-0.95768	7.22E-02	0.26198	7.98E-10
0.10066	-0.94627	8.09E-02	0.16039	7.53E-10
0.11505	-0.93431	8.89E-02	0.10097	7.05E-10
0.12944	-0.92203	9.65E-02	5.51E-02	7.12E-10
0.14383	-0.90954	0.1036	1.76E-02	7.26E-10
0.15822	-0.89687	0.11041	-1.89E-02	7.37E-10
0.17262	-0.88401	0.11688	-5.51E-02	7.50E-10
0.18701	-0.87098	0.12298	-9.12E-02	7.65E-10
0.2014	-0.85777	0.12871	-0.12352	7.81E-10
0.21579	-0.84443	0.1341	-0.1522	7.95E-10
0.23018	-0.83097	0.13919	-0.17651	8.05E-10
0.24458	-0.81741	0.14403	-0.19652	8.09E-10
0.25897	-0.80379	0.14867	-0.21359	8.09E-10
0.27336	-0.79011	0.15315	-0.22922	8.05E-10
0.28775	-0.77639	0.15748	-0.2437	8.00E-10
0.30214	-0.76262	0.16167	-0.25748	7.95E-10
0.31654	-0.74881	0.16572	-0.27071	7.88E-10
0.33093	-0.73496	0.16963	-0.2846	7.83E-10
0.34532	-0.72106	0.17337	-0.29938	7.80E-10
0.35971	-0.70711	0.17692	-0.31354	7.79E-10
0.37411	-0.69312	0.18029	-0.32613	7.77E-10
0.3885	-0.67909	0.1835	-0.3368	7.72E-10
0.40269	-0.66503	0.1866	-0.34577	7.65E-10
0.41728	-0.65096	0.1896	-0.35372	7.55E-10
0.43167	-0.63687	0.19252	-0.36095	7.45E-10
0.44607	-0.62276	0.19537	-0.36811	7.34E-10
0.46046	-0.60864	0.19815	-0.37455	7.22E-10
0.47485	-0.5945	0.20087	-0.38245	7.11E-10
0.48924	-0.58036	0.20352	-0.38759	7.01E-10
0.50364	-0.56662	0.2061	-0.40058	6.91E-10
0.51988	-0.55017	0.20873	-0.41764	7.24E-10
0.53612	-0.53413	0.21127	-0.42406	7.36E-10
0.55237	-0.51807	0.21374	-0.42868	7.48E-10
0.56861	-0.502	0.21614	-0.43676	7.61E-10
0.58486	-0.48592	0.21844	-0.44067	7.75E-10
0.6011	-0.46983	0.22066	-0.44787	7.89E-10
0.61735	-0.45373	0.22278	-0.45254	8.03E-10
0.63359	-0.43761	0.2248	-0.45859	8.16E-10
0.64983	-0.42148	0.22672	-0.46328	8.30E-10
0.66608	-0.40534	0.22854	-0.46828	8.43E-10
0.68232	-0.38918	0.23027	-0.47249	8.55E-10
0.69857	-0.37302	0.23192	-0.47655	8.66E-10
0.71481	-0.35686	0.23349	-0.48017	8.77E-10
0.73105	-0.34068	0.23499	-0.48346	8.87E-10
0.7473	-0.3245	0.23644	-0.4866	8.97E-10
0.76354	-0.30832	0.23781	-0.49004	9.08E-10
0.77979	-0.29212	0.2391	-0.49392	9.20E-10
0.79603	-0.27592	0.24029	-0.4979	9.30E-10
0.81228	-0.25972	0.2414	-0.50119	9.39E-10
0.82852	-0.2435	0.24244	-0.50349	9.46E-10
0.84476	-0.22729	0.24343	-0.5055	9.53E-10
0.86101	-0.21107	0.24438	-0.50827	9.61E-10
0.87725	-0.19485	0.24525	-0.5115	9.69E-10
0.8935	-0.17863	0.24603	-0.51542	9.77E-10

S	XG	YG	PCOE	TAUW
0.90974	-0.1624	0.2467	-0.51904	9.84E-10
0.92599	-0.14616	0.24729	-0.52161	9.88E-10
0.94223	-0.12993	0.24784	-0.5224	9.92E-10
0.95847	-0.11369	0.24837	-0.52446	9.96E-10
0.97472	-9.75E-02	0.24884	-0.52701	1.00E-09
0.99096	-8.12E-02	0.24917	-0.53372	1.00E-09
1.0072	-6.50E-02	0.24943	-0.53066	1.01E-09
1.0235	-4.87E-02	0.24975	-0.5362	1.01E-09
1.0397	-3.25E-02	0.24988	-0.53903	1.01E-09
1.0559	-1.62E-02	0.24991	-0.54672	1.01E-09
1.0722	0	0.25	-0.5408	1.01E-09
1.0884	1.62E-02	0.24991	-0.53472	1.01E-09
1.1047	3.25E-02	0.24988	-0.54237	1.01E-09
1.1209	4.87E-02	0.24975	-0.54499	1.01E-09
1.1372	6.50E-02	0.24943	-0.55033	1.01E-09
1.1534	8.12E-02	0.24917	-0.54709	1.00E-09
1.1696	9.75E-02	0.24884	-0.55348	9.98E-10
1.1859	0.11369	0.24837	-0.55566	9.94E-10
1.2021	0.12993	0.24784	-0.55738	9.91E-10
1.2184	0.14616	0.24729	-0.55777	9.87E-10
1.2346	0.1624	0.2467	-0.55988	9.81E-10
1.2509	0.17863	0.24603	-0.56292	9.73E-10
1.2671	0.19485	0.24525	-0.5662	9.65E-10
1.2834	0.21107	0.24438	-0.56874	9.57E-10
1.2996	0.22729	0.24343	-0.57078	9.50E-10
1.3158	0.2435	0.24244	-0.57205	9.43E-10
1.3321	0.25972	0.2414	-0.57354	9.35E-10
1.3483	0.27592	0.24029	-0.57591	9.25E-10
1.3646	0.29212	0.2391	-0.57884	9.14E-10
1.3808	0.30832	0.23781	-0.5816	9.03E-10
1.3971	0.3245	0.23644	-0.58386	8.93E-10
1.4133	0.34068	0.23499	-0.58578	8.83E-10
1.4296	0.35686	0.23349	-0.58776	8.72E-10
1.4458	0.37302	0.23192	-0.58995	8.61E-10
1.462	0.38918	0.23027	-0.59245	8.49E-10
1.4783	0.40534	0.22854	-0.59499	8.36E-10
1.4945	0.42148	0.22672	-0.59812	8.23E-10
1.5108	0.43761	0.2248	-0.60083	8.09E-10
1.527	0.45373	0.22278	-0.60468	7.95E-10
1.5433	0.46983	0.22066	-0.60699	7.81E-10
1.5595	0.48592	0.21844	-0.61172	7.68E-10
1.5758	0.502	0.21614	-0.61274	7.55E-10
1.592	0.51807	0.21374	-0.61825	7.43E-10
1.6082	0.53413	0.21127	-0.61898	7.30E-10
1.6245	0.55017	0.20873	-0.62275	7.18E-10
1.6407	0.5662	0.2061	-0.63365	6.91E-10
1.6551	0.58036	0.20352	-0.63769	7.01E-10
1.6695	0.5945	0.20087	-0.64	7.11E-10
1.6839	0.60864	0.19815	-0.64409	7.22E-10
1.6983	0.62276	0.19537	-0.64733	7.34E-10
1.7127	0.63687	0.19252	-0.65093	7.45E-10
1.7271	0.65096	0.1896	-0.65455	7.55E-10
1.7415	0.66503	0.1866	-0.65861	7.65E-10
1.7559	0.67909	0.1835	-0.66333	7.72E-10
1.7703	0.69312	0.18029	-0.66921	7.77E-10
1.7847	0.70711	0.17692	-0.67637	7.79E-10
1.799	0.72106	0.17337	-0.6845	7.80E-10
1.8134	0.73496	0.16963	-0.69284	7.83E-10
1.8278	0.74881	0.16572	-0.70026	7.88E-10
1.8422	0.76262	0.16167	-0.70697	7.95E-10
1.8566	0.77639	0.15748	-0.71388	8.00E-10
1.871	0.79011	0.15315	-0.7211	8.05E-10
1.8854	0.80379	0.14867	-0.72895	8.09E-10
1.8998	0.81741	0.14403	-0.73761	8.09E-10

S	XG	YG	PCOE	TAUW
1.9142	0.83097	0.13919	-0.74815	8.05E-10
1.9286	0.84443	0.1341	-0.76144	7.95E-10
1.943	0.85777	0.12871	-0.77747	7.81E-10
1.9574	0.87098	0.12298	-0.79564	7.65E-10
1.9718	0.88401	0.11688	-0.81599	7.50E-10
1.9861	0.89687	0.11041	-0.83603	7.37E-10
2.0005	0.90954	0.1036	-0.8561	7.26E-10
2.0149	0.92203	9.65E-02	-0.87654	7.12E-10
2.0293	0.93431	8.89E-02	-0.90259	6.90E-10
2.0437	0.94627	8.09E-02	-0.9372	6.49E-10
2.0581	0.95768	7.22E-02	-0.99872	6.03E-10
2.0725	0.96828	6.24E-02	-1.0591	5.71E-10
2.0869	0.9781	5.19E-02	-1.1198	5.35E-10
2.1013	0.98682	4.05E-02	-1.2017	4.95E-10
2.1156	0.99376	2.79E-02	-1.3032	4.62E-10
2.13	0.9983	1.43E-02	-1.3755	4.45E-10
2.1444	1	0	-1.4156	4.45E-10
2.1587	0.9983	-1.43E-02	-1.3671	4.64E-10
2.1731	0.99376	-2.79E-02	-1.2922	4.98E-10
2.1875	0.98682	-4.05E-02	-1.1869	5.93E-10
2.2019	0.9781	-5.19E-02	-1.1062	6.03E-10
2.2162	0.96828	-6.24E-02	-1.0468	6.12E-10
2.2306	0.95768	-7.22E-02	-0.98777	6.60E-10
2.245	0.94627	-8.09E-02	-0.92624	7.03E-10
2.2594	0.93431	-8.89E-02	-0.89329	7.26E-10
2.2738	0.92203	-9.65E-02	-0.86872	7.41E-10
2.2882	0.90954	-0.1036	-0.84979	7.53E-10
2.3026	0.89687	-0.11041	-0.83081	7.66E-10
2.317	0.88401	-0.11688	-0.81161	7.83E-10
2.3314	0.87098	-0.12298	-0.79178	8.00E-10
2.3458	0.85777	-0.12871	-0.77407	8.14E-10
2.3602	0.84443	-0.1341	-0.75844	8.25E-10
2.3746	0.83097	-0.13919	-0.74556	8.30E-10
2.3889	0.81741	-0.14403	-0.73547	8.29E-10
2.4033	0.80379	-0.14867	-0.72727	8.26E-10
2.4177	0.79011	-0.15315	-0.71984	8.21E-10
2.4321	0.77639	-0.15748	-0.71299	8.15E-10
2.4465	0.76262	-0.16167	-0.70641	8.08E-10
2.4609	0.74881	-0.16572	-0.69998	8.02E-10
2.4753	0.73496	-0.16963	-0.69273	8.00E-10
2.4897	0.72106	-0.17337	-0.68441	7.98E-10
2.5041	0.70711	-0.17692	-0.67625	7.96E-10
2.5185	0.69312	-0.18029	-0.66907	7.92E-10
2.5329	0.67909	-0.1835	-0.6632	7.84E-10
2.5473	0.66503	-0.1866	-0.65856	7.74E-10
2.5616	0.65096	-0.1896	-0.65459	7.63E-10
2.576	0.63687	-0.19252	-0.65112	7.51E-10
2.5904	0.62276	-0.19537	-0.64756	7.39E-10
2.6048	0.60864	-0.19815	-0.64464	7.28E-10
2.6192	0.5945	-0.20087	-0.64029	7.17E-10
2.6336	0.58036	-0.20352	-0.63905	7.07E-10
2.648	0.56662	-0.2061	-0.63325	7.11E-10
2.6642	0.55017	-0.20873	-0.62708	7.24E-10
2.6805	0.53413	-0.21127	-0.62492	7.36E-10
2.6967	0.51807	-0.21374	-0.62324	7.48E-10
2.713	0.502	-0.21614	-0.61972	7.61E-10
2.7292	0.48592	-0.21844	-0.61794	7.75E-10
2.7455	0.46983	-0.22066	-0.61438	7.89E-10
2.7617	0.45373	-0.22278	-0.61178	8.03E-10
2.778	0.43761	-0.2248	-0.60853	8.16E-10
2.7942	0.42148	-0.22672	-0.60583	8.30E-10
2.8104	0.40534	-0.22854	-0.60304	8.43E-10
2.8267	0.38918	-0.23027	-0.60066	8.55E-10
2.8429	0.37302	-0.23192	-0.59844	8.66E-10

S	XG	YG	PCOE	TAUW
2.8592	0.35686	-0.23349	-0.59646	8.77E-10
2.8754	0.34068	-0.23499	-0.59478	8.87E-10
2.8917	0.3245	-0.23644	-0.59313	8.97E-10
2.9079	0.30832	-0.23781	-0.59111	9.08E-10
2.9242	0.29212	-0.2391	-0.58851	9.20E-10
2.9404	0.27592	-0.24029	-0.58571	9.30E-10
2.9566	0.25972	-0.2414	-0.5835	9.39E-10
2.9729	0.2435	-0.24244	-0.58233	9.46E-10
2.9891	0.22729	-0.24343	-0.58137	9.53E-10
3.0054	0.21107	-0.24438	-0.57963	9.61E-10
3.0216	0.19485	-0.24525	-0.57719	9.69E-10
3.0379	0.17863	-0.24603	-0.57415	9.77E-10
3.0541	0.1624	-0.2467	-0.57099	9.84E-10
3.0704	0.14616	-0.24729	-0.56949	9.88E-10
3.0866	0.12993	-0.24784	-0.56903	9.92E-10
3.1028	0.11369	-0.24837	-0.56853	9.96E-10
3.1191	9.75E-02	-0.24884	-0.56536	1.00E-09
3.1353	8.12E-02	-0.24917	-0.56065	1.00E-09
3.1516	6.50E-02	-0.24943	-0.56228	1.01E-09
3.1678	4.87E-02	-0.24975	-0.56125	1.01E-09
3.1841	3.25E-02	-0.24988	-0.55338	1.01E-09
3.2003	1.62E-02	-0.24991	-0.55601	1.01E-09
3.2166	0	-0.25	-0.55293	1.01E-09
3.2328	-1.62E-02	-0.24991	-0.54994	1.01E-09
3.249	-3.25E-02	-0.24988	-0.55262	1.01E-09
3.2653	-4.87E-02	-0.24975	-0.54463	1.01E-09
3.2815	-6.50E-02	-0.24943	-0.54346	1.01E-09
3.2978	-8.12E-02	-0.24917	-0.54494	1.00E-09
3.314	-9.75E-02	-0.24884	-0.53995	9.98E-10
3.3303	-0.11369	-0.24837	-0.53645	9.94E-10
3.3465	-0.12993	-0.24784	-0.53563	9.91E-10
3.3627	-0.14616	-0.24729	-0.53477	9.87E-10
3.379	-0.1624	-0.2467	-0.53284	9.81E-10
3.3952	-0.17863	-0.24603	-0.52911	9.73E-10
3.4115	-0.19485	-0.24525	-0.52545	9.65E-10
3.4277	-0.21107	-0.24438	-0.52234	9.57E-10
3.444	-0.22729	-0.24343	-0.51987	9.50E-10
3.4602	-0.2435	-0.24244	-0.51818	9.43E-10
3.4765	-0.25972	-0.2414	-0.51618	9.35E-10
3.4927	-0.27592	-0.24029	-0.51305	9.25E-10
3.5089	-0.29212	-0.2391	-0.5092	9.14E-10
3.5252	-0.30832	-0.23781	-0.50547	9.03E-10
3.5414	-0.3245	-0.23644	-0.50226	8.93E-10
3.5577	-0.34068	-0.23499	-0.49935	8.83E-10
3.5739	-0.35666	-0.23349	-0.49631	8.72E-10
3.5902	-0.37302	-0.23192	-0.49288	8.61E-10
3.6064	-0.38918	-0.23027	-0.48904	8.49E-10
3.6227	-0.40534	-0.22854	-0.48493	8.36E-10
3.6389	-0.42148	-0.22672	-0.48024	8.23E-10
3.6551	-0.43761	-0.2248	-0.47545	8.09E-10
3.6714	-0.45373	-0.22278	-0.47004	7.95E-10
3.6876	-0.46983	-0.22066	-0.46482	7.81E-10
3.7039	-0.48592	-0.21844	-0.45901	7.68E-10
3.7201	-0.502	-0.21614	-0.4538	7.55E-10
3.7364	-0.51807	-0.21374	-0.44824	7.43E-10
3.7526	-0.53413	-0.21127	-0.442	7.30E-10
3.7689	-0.55017	-0.20873	-0.43754	7.18E-10
3.7851	-0.5662	-0.2061	-0.42704	7.11E-10
3.7995	-0.58036	-0.20352	-0.41198	7.07E-10
3.8139	-0.5945	-0.20087	-0.40749	7.17E-10
3.8283	-0.60864	-0.19815	-0.39872	7.28E-10
3.8427	-0.62276	-0.19537	-0.39189	7.39E-10
3.8571	-0.63687	-0.19252	-0.38393	7.51E-10
3.8715	-0.65096	-0.1896	-0.37595	7.63E-10

S	XG	YG	PCOE	TAUW
3.8858	-0.66503	-0.1866	-0.36707	7.74E-10
3.9002	-0.67909	-0.1835	-0.35715	7.84E-10
3.9146	-0.69312	-0.18029	-0.3454	7.92E-10
3.929	-0.70711	-0.17692	-0.33166	7.96E-10
3.9434	-0.72106	-0.17337	-0.3163	7.98E-10
3.9578	-0.73496	-0.16963	-0.30026	8.00E-10
3.9722	-0.74881	-0.16572	-0.2851	8.02E-10
3.9866	-0.76262	-0.16167	-0.27055	8.08E-10
4.001	-0.77639	-0.15748	-0.2554	8.15E-10
4.0154	-0.79011	-0.15315	-0.23947	8.21E-10
4.0298	-0.80379	-0.14867	-0.22231	8.26E-10
4.0442	-0.81741	-0.14403	-0.20362	8.29E-10
4.0586	-0.83097	-0.13919	-0.18188	8.30E-10
4.0729	-0.84443	-0.1341	-0.15575	8.25E-10
4.0873	-0.85777	-0.12871	-0.12514	8.14E-10
4.1017	-0.87098	-0.12298	-9.08E-02	8.00E-10
4.1161	-0.88401	-0.11688	-5.26E-02	7.83E-10
4.1305	-0.89687	-0.11041	-1.41E-02	7.66E-10
4.1449	-0.90954	-0.1036	2.50E-02	7.53E-10
4.1593	-0.92203	-9.65E-02	6.52E-02	7.41E-10
4.1737	-0.93431	-8.89E-02	0.11432	7.26E-10
4.1881	-0.94627	-8.09E-02	0.1769	7.68E-10
4.2025	-0.95768	-7.22E-02	0.28105	8.14E-10
4.2169	-0.96828	-6.24E-02	0.38518	7.88E-10
4.2312	-0.9781	-5.19E-02	0.48914	7.78E-10
4.2456	-0.98682	-4.05E-02	0.62616	7.48E-10
4.26	-0.99376	-2.79E-02	0.79085	5.92E-10
4.2744	-0.9983	-1.43E-02	0.9088	4.64E-10



PATH DATA STATUS
Current path name is RN5

Point	Node	X	Y	Z	CS
1	11272	-1	0	0	0
2	15120	-0.9983046	1.43E-02	0	0
3	15119	-0.9937643	2.79E-02	0	0
4	15118	-0.9868199	4.05E-02	0	0
5	15117	-0.9781038	5.19E-02	0	0
6	15116	-0.9682773	6.24E-02	0	0
7	15115	-0.9576787	7.22E-02	0	0
8	15114	-0.9462734	8.09E-02	0	0
9	15113	-0.9343103	8.89E-02	0	0
10	15112	-0.9220349	9.65E-02	0	0
11	15111	-0.9095424	0.103596	0	0
12	15110	-0.8968661	0.1104104	0	0
13	15109	-0.8840122	0.1168836	0	0
14	15108	-0.8709768	0.1229828	0	0
15	15107	-0.8577745	0.1287121	0	0
16	15106	-0.8444289	0.1340992	0	0
17	15105	-0.8309659	0.1391861	0	0
18	15104	-0.817412	0.1440261	0	0
19	15103	-0.8037906	0.1486727	0	0
20	15102	-0.7901137	0.1531534	0	0
21	15101	-0.7763883	0.1574835	0	0
22	15100	-0.7626192	0.1616724	0	0
23	15099	-0.7488092	0.1657246	0	0
24	15098	-0.7349581	0.1696338	0	0
25	15097	-0.7210594	0.1733701	0	0
26	15096	-0.7071113	0.1769173	0	0
27	15095	-0.6931187	0.1802853	0	0
28	15094	-0.6790903	0.1835007	0	0
29	15093	-0.6650348	0.1865958	0	0
30	15092	-0.6509588	0.1895962	0	0
31	15091	-0.6368666	0.192517	0	0
32	15090	-0.6227587	0.1953667	0	0
33	15089	-0.6086381	0.1981498	0	0
34	15088	-0.5945049	0.2008678	0	0
35	15087	-0.580359	0.2035193	0	0
36	14982	-0.5662	0.2061	0	0
37	26110	-0.5501694	0.2087256	0	0
38	26109	-0.5341262	0.2112735	0	0
39	26108	-0.5180709	0.2137441	0	0
40	26107	-0.5020037	0.2161356	0	0
41	26106	-0.4859243	0.2184436	0	0
42	26105	-0.4698321	0.2206607	0	0
43	26104	-0.4537266	0.2227789	0	0
44	26103	-0.4376081	0.2247967	0	0
45	26102	-0.4214776	0.2267152	0	0
46	26101	-0.405336	0.2285378	0	0
47	26100	-0.3891844	0.2302703	0	0
48	26099	-0.3730241	0.2319195	0	0
49	26098	-0.3568561	0.2334919	0	0
50	26097	-0.3406816	0.2349948	0	0
51	26096	-0.3245013	0.2364355	0	0
52	26095	-0.3083152	0.2378083	0	0
53	26094	-0.2921224	0.2390993	0	0
54	26093	-0.2759222	0.2402941	0	0
55	26092	-0.2597155	0.2413982	0	0
56	26091	-0.2435045	0.2424371	0	0
57	26090	-0.2272909	0.2434344	0	0
58	26089	-0.2110742	0.2443801	0	0
59	26088	-0.1948534	0.2452513	0	0
60	26087	-0.1786278	0.2460294	0	0
61	26086	-0.1623975	0.2467009	0	0

Point	Node	X	Y	Z	CS
62	26085	-0.1461638	0.2472876	0	0
63	26084	-0.1299289	0.2478389	0	0
64	26083	-0.1136933	0.2483669	0	0
65	26082	-9.75E-02	0.2488401	0	0
66	26081	-8.12E-02	0.2491694	0	0
67	26080	-6.50E-02	0.2494339	0	0
68	26079	-4.87E-02	0.2497453	0	0
69	26078	-3.25E-02	0.2498806	0	0
70	26077	-1.62E-02	0.2499147	0	0
71	22367	0	0.25	0	0
72	22401	1.62E-02	0.2499147	0	0
73	22400	3.25E-02	0.2498806	0	0
74	22399	4.87E-02	0.2497453	0	0
75	22398	6.50E-02	0.2494339	0	0
76	22397	8.12E-02	0.2491694	0	0
77	22396	9.75E-02	0.2488401	0	0
78	22395	0.1136933	0.2483669	0	0
79	22394	0.1299289	0.2478389	0	0
80	22393	0.1461638	0.2472876	0	0
81	22392	0.1623975	0.2467009	0	0
82	22391	0.1786278	0.2460294	0	0
83	22390	0.1948534	0.2452513	0	0
84	22389	0.2110742	0.2443801	0	0
85	22388	0.2272909	0.2434344	0	0
86	22387	0.2435045	0.2424371	0	0
87	22386	0.2597155	0.2413982	0	0
88	22385	0.2759222	0.2402941	0	0
89	22384	0.2921224	0.2390993	0	0
90	22383	0.3083152	0.2378083	0	0
91	22382	0.3245013	0.2364355	0	0
92	22381	0.3406816	0.2349948	0	0
93	22380	0.3568561	0.2334919	0	0
94	22379	0.3730241	0.2319195	0	0
95	22378	0.3891844	0.2302703	0	0
96	22377	0.405336	0.2285378	0	0
97	22376	0.4214776	0.2267152	0	0
98	22375	0.4376081	0.2247967	0	0
99	22374	0.4537266	0.2227789	0	0
100	22373	0.4698321	0.2206607	0	0
101	22372	0.4859243	0.2184436	0	0
102	22371	0.5020037	0.2161356	0	0
103	22370	0.5180709	0.2137441	0	0
104	22369	0.5341262	0.2112735	0	0
105	22368	0.5501694	0.2087256	0	0
106	18692	0.5662	0.2061	0	0
107	18830	0.580359	0.2035193	0	0
108	18829	0.5945049	0.2008678	0	0
109	18828	0.6086381	0.1981498	0	0
110	18827	0.6227587	0.1953667	0	0
111	18826	0.636866	0.192517	0	0
112	18825	0.6509588	0.1895962	0	0
113	18824	0.66650348	0.1865958	0	0
114	18823	0.6790903	0.1835007	0	0
115	18822	0.6931187	0.1802853	0	0
116	18821	0.7071113	0.1769173	0	0
117	18820	0.7210594	0.1733701	0	0
118	18819	0.7349581	0.1696338	0	0
119	18818	0.7488092	0.1657246	0	0
120	18817	0.7626192	0.1616724	0	0
121	18816	0.7763883	0.1574835	0	0
122	18815	0.7901137	0.1531534	0	0
123	18814	0.8037906	0.1486727	0	0
124	18813	0.817412	0.1440261	0	0
125	18812	0.8309659	0.1391861	0	0

Point	Node	X	Y	Z	CS
126	18811	0.8444289	0.1340992	0	0
127	18810	0.8577745	0.1287121	0	0
128	18809	0.8709768	0.1229828	0	0
129	18808	0.8840122	0.1168836	0	0
130	18807	0.8968661	0.1104104	0	0
131	18806	0.9095424	0.103596	0	0
132	18805	0.9220349	9.65E-02	0	0
133	18804	0.9343103	8.89E-02	0	0
134	18803	0.9462734	8.09E-02	0	0
135	18802	0.9576787	7.22E-02	0	0
136	18801	0.9682773	6.24E-02	0	0
137	18800	0.9781038	5.19E-02	0	0
138	18799	0.9868199	4.05E-02	0	0
139	18798	0.9937643	2.79E-02	0	0
140	18797	0.9983046	1.43E-02	0	0
141	7562	1	0	0	0
142	7700	0.9983046	-1.43E-02	0	0
143	7699	0.9937643	-2.79E-02	0	0
144	7698	0.9868199	-4.05E-02	0	0
145	7697	0.9781038	-5.19E-02	0	0
146	7696	0.9682773	-6.24E-02	0	0
147	7695	0.9576787	-7.22E-02	0	0
148	7694	0.9462734	-8.09E-02	0	0
149	7693	0.9343103	-8.89E-02	0	0
150	7692	0.9220349	-9.65E-02	0	0
151	7691	0.9095424	-0.103596	0	0
152	7690	0.8968661	-0.1104104	0	0
153	7689	0.8840122	-0.1168836	0	0
154	7688	0.8709768	-0.1229828	0	0
155	7687	0.8577745	-0.1287121	0	0
156	7686	0.8444289	-0.1340992	0	0
157	7685	0.8309659	-0.1391861	0	0
158	7684	0.817412	-0.1440261	0	0
159	7683	0.8037906	-0.1486727	0	0
160	7682	0.7901137	-0.1531534	0	0
161	7681	0.7763883	-0.1574835	0	0
162	7680	0.7626192	-0.1616724	0	0
163	7679	0.7488092	-0.1657246	0	0
164	7678	0.7349581	-0.1696338	0	0
165	7677	0.7210594	-0.1733701	0	0
166	7676	0.7071113	-0.1769173	0	0
167	7675	0.6931187	-0.1802853	0	0
168	7674	0.6790903	-0.1835007	0	0
169	7673	0.6650348	-0.1865958	0	0
170	7672	0.6509588	-0.1895962	0	0
171	7671	0.636866	-0.192517	0	0
172	7670	0.6227587	-0.1953667	0	0
173	7669	0.6086381	-0.1981498	0	0
174	7668	0.5945049	-0.2008678	0	0
175	7667	0.580359	-0.2035193	0	0
176	3852	0.5662	-0.2061	0	0
177	3990	0.5501694	-0.2087256	0	0
178	3989	0.5341262	-0.2112735	0	0
179	3988	0.5180709	-0.2137441	0	0
180	3987	0.5020037	-0.2161356	0	0
181	3986	0.4859243	-0.2184436	0	0
182	3985	0.4698321	-0.2206607	0	0
183	3984	0.4537266	-0.2227789	0	0
184	3983	0.4376081	-0.2247967	0	0
185	3982	0.4214776	-0.2267152	0	0
186	3981	0.405336	-0.2285378	0	0
187	3980	0.3891844	-0.2302703	0	0
188	3979	0.3730241	-0.2319195	0	0
189	3978	0.3568561	-0.2334919	0	0

Point	Node	X	Y	Z	CS
190	3977	0.3406816	-0.2349948	0	0
191	3976	0.3245013	-0.2364355	0	0
192	3975	0.3083152	-0.2378083	0	0
193	3974	0.2921224	-0.2390993	0	0
194	3973	0.2759222	-0.2402941	0	0
195	3972	0.2597155	-0.2413982	0	0
196	3971	0.2435045	-0.2424371	0	0
197	3970	0.2272909	-0.2434344	0	0
198	3969	0.2110742	-0.2443801	0	0
199	3968	0.1948534	-0.2452513	0	0
200	3967	0.1786278	-0.2460294	0	0
201	3966	0.1623975	-0.2467009	0	0
202	3965	0.1461638	-0.2472876	0	0
203	3964	0.1299289	-0.2478389	0	0
204	3963	0.1136933	-0.2483669	0	0
205	3962	9.75E-02	-0.2488401	0	0
206	3961	8.12E-02	-0.2491694	0	0
207	3960	6.50E-02	-0.2494339	0	0
208	3959	4.87E-02	-0.2497453	0	0
209	3958	3.25E-02	-0.2498806	0	0
210	3957	1.62E-02	-0.2499147	0	0
211	37	0	-0.25	0	0
212	176	-1.62E-02	-0.2499147	0	0
213	175	-3.25E-02	-0.2498806	0	0
214	174	-4.87E-02	-0.2497453	0	0
215	173	-6.50E-02	-0.2494339	0	0
216	172	-8.12E-02	-0.2491694	0	0
217	171	-9.75E-02	-0.2488401	0	0
218	170	-0.1136933	-0.2483669	0	0
219	169	-0.1299289	-0.2478389	0	0
220	168	-0.1461638	-0.2472876	0	0
221	167	-0.1623975	-0.2467009	0	0
222	166	-0.1786278	-0.2460294	0	0
223	165	-0.1948534	-0.2452513	0	0
224	164	-0.2110742	-0.2443801	0	0
225	163	-0.2272909	-0.2434344	0	0
226	162	-0.2435045	-0.2424371	0	0
227	161	-0.2597155	-0.2413982	0	0
228	160	-0.2759222	-0.2402941	0	0
229	159	-0.2921224	-0.2390993	0	0
230	158	-0.3083152	-0.2378083	0	0
231	157	-0.3245013	-0.2364355	0	0
232	156	-0.3406816	-0.2349948	0	0
233	155	-0.3568561	-0.2334919	0	0
234	154	-0.3730241	-0.2319195	0	0
235	153	-0.3891844	-0.2302703	0	0
236	152	-0.405336	-0.2285378	0	0
237	151	-0.4214776	-0.2267152	0	0
238	150	-0.4376081	-0.2247967	0	0
239	149	-0.4537266	-0.2227789	0	0
240	148	-0.4698321	-0.2206607	0	0
241	147	-0.4859243	-0.2184436	0	0
242	146	-0.5020037	-0.2161356	0	0
243	145	-0.5180709	-0.2137441	0	0
244	144	-0.5341262	-0.2112735	0	0
245	143	-0.5501694	-0.2087256	0	0
246	142	-0.5662	-0.2061	0	0
247	11410	-0.580359	-0.2035193	0	0
248	11409	-0.5945049	-0.2008678	0	0
249	11408	-0.6086381	-0.1981498	0	0
250	11407	-0.6227587	-0.1953667	0	0
251	11406	-0.636866	-0.192517	0	0
252	11405	-0.6509588	-0.1895962	0	0
253	11404	-0.6650348	-0.1865958	0	0

Point	Node	X	Y	Z	CS
254	11403	-0.6790903	-0.1835007	0	0
255	11402	-0.6931187	-0.1802853	0	0
256	11401	-0.7071113	-0.1769173	0	0
257	11400	-0.7210594	-0.1733701	0	0
258	11399	-0.7349581	-0.1696338	0	0
259	11398	-0.7488092	-0.1657246	0	0
260	11397	-0.7626192	-0.1616724	0	0
261	11396	-0.7763883	-0.1574835	0	0
262	11395	-0.7901137	-0.1531534	0	0
263	11394	-0.8037906	-0.1486727	0	0
264	11393	-0.817412	-0.1440261	0	0
265	11392	-0.8309659	-0.1391861	0	0
266	11391	-0.8444289	-0.1340992	0	0
267	11390	-0.8577745	-0.1287121	0	0
268	11389	-0.8709768	-0.1229828	0	0
269	11388	-0.8840122	-0.1168836	0	0
270	11387	-0.8968661	-0.1104104	0	0
271	11386	-0.9095424	-0.103596	0	0
272	11385	-0.9220349	-9.65E-02	0	0
273	11384	-0.9343103	-8.89E-02	0	0
274	11383	-0.9462734	-8.09E-02	0	0
275	11382	-0.9576787	-7.22E-02	0	0
276	11381	-0.9682773	-6.24E-02	0	0
277	11380	-0.9781038	-5.19E-02	0	0
278	11379	-0.9868199	-4.05E-02	0	0
279	11378	-0.9937643	-2.79E-02	0	0
280	11377	-0.9983046	-1.43E-02	0	0

USE GLOBAL COORDINAT FOR SOLUTION RESULTS

**DISPLAY ALL STATISTICS AND ESTIMATES
DISPLAY FEM MODEL SIZE INFORMATION
**** FEM MODEL SIZE ******

Maximum Node Number =	50050
Number of Defined Nodes =	50050
Number of Selected Nodes =	7
Maximum DOF per Node =	49600

Maximum Element Number =	49600
Number of Defined Elements =	49600
Number of Selected Elements =	154 MB
Estimate of -m required =	49600

DISPLAY MEMORY INFORMATION

MEMORY STATUS

Requested Initial Work Space =	335544440 Words
Initial Work Space Obtained =	335544440 Words
ANSYS Scratch Memory Size =	67106912 Words
ANSYS Scratch Memory Used =	14719888 Words
Available Scratch Memory =	52389024 Words
Maximum Scratch Memory Used =	25214448 Words
Largest Available Continuous Block =	52389020 Words

DATABASE STATUS

Current Database Position =	2165377 Words
Maximum Database Length =	2147413157 Words
Memory Resident Database =	16546144 Words
Void Space In Database =	0 Words
Binary I/O Page Size =	16384 Words
Buffers Per Solution File =	4
Buffer Scratch Memory =	393216 Words
Analysis Type =	0
Available Solution Memory =	12704040 Words

SOLUTION MEMORY

0.063 MB
1.500 MB
48462 MB

PRINT ALONG PATH DEFINED BY LPATH COMMAND DSYS= 0
 2D XY 867 ITERATIONS ISOTHERMAL INCOMPRESSIBLE LAMINAR FLOW
 **** PATH VARIABLE SUMMARY

S	XG	YG	PCOE	TAUW
0	-1	0	1.2647	6.61E-09
1.01E-02	-0.99912	1.00E-02	1.2306	1.93E-07
2.01E-02	-0.99681	1.98E-02	1.1675	3.44E-07
3.02E-02	-0.99317	2.92E-02	1.066	4.55E-07
4.03E-02	-0.98837	3.81E-02	0.9576	5.18E-07
5.03E-02	-0.98264	4.63E-02	0.848	5.43E-07
6.04E-02	-0.97621	5.41E-02	0.75731	5.43E-07
7.05E-02	-0.9693	6.14E-02	0.68133	5.40E-07
8.06E-02	-0.96202	6.84E-02	0.60831	5.39E-07
9.06E-02	-0.95434	7.49E-02	0.5277	5.23E-07
0.1007	-0.94627	8.09E-02	0.45975	4.93E-07
0.11078	-0.93794	8.66E-02	0.40793	4.63E-07
0.12085	-0.92943	9.20E-02	0.36673	4.39E-07
0.13093	-0.92079	9.72E-02	0.33058	4.18E-07
0.141	-0.91206	0.10219	0.29772	4.01E-07
0.15107	-0.90323	0.10704	0.26673	3.87E-07
0.16115	-0.89431	0.11173	0.23704	3.73E-07
0.17122	-0.88531	0.11625	0.20784	3.61E-07
0.1813	-0.87621	0.12059	0.17964	3.48E-07
0.19137	-0.86703	0.12474	0.15335	3.34E-07
0.20145	-0.85777	0.12871	0.12907	3.21E-07
0.21152	-0.84845	0.13252	0.10688	3.08E-07
0.2216	-0.83906	0.13617	8.68E-02	2.95E-07
0.23167	-0.82961	0.13968	6.87E-02	2.83E-07
0.24174	-0.82013	0.14308	5.25E-02	2.72E-07
0.25182	-0.81061	0.14637	3.79E-02	2.63E-07
0.26189	-0.80106	0.14958	2.42E-02	2.54E-07
0.27197	-0.79148	0.15271	1.12E-02	2.46E-07
0.28204	-0.78188	0.15577	-1.15E-03	2.38E-07
0.29212	-0.77226	0.15875	-1.30E-02	2.32E-07
0.30219	-0.76262	0.16167	-2.44E-02	2.25E-07
0.31227	-0.75296	0.16452	-3.55E-02	2.19E-07
0.32234	-0.74327	0.16731	-4.64E-02	2.14E-07
0.33242	-0.73357	0.17002	-5.74E-02	2.08E-07
0.34249	-0.72384	0.17264	-6.83E-02	2.02E-07
0.35256	-0.71409	0.17517	-7.90E-02	1.96E-07
0.36264	-0.70432	0.1776	-8.90E-02	1.90E-07
0.37271	-0.69452	0.17996	-9.84E-02	1.84E-07
0.38279	-0.68471	0.18223	-0.1071	1.78E-07
0.39286	-0.67488	0.18444	-0.11509	1.72E-07
0.40294	-0.66503	0.1866	-0.12254	1.67E-07
0.41301	-0.65518	0.1887	-0.12958	1.61E-07
0.42309	-0.64532	0.19077	-0.13632	1.56E-07
0.43316	-0.63546	0.19281	-0.14282	1.51E-07
0.44324	-0.62558	0.1948	-0.14916	1.47E-07
0.45331	-0.6157	0.19677	-0.15532	1.42E-07
0.46339	-0.60581	0.1987	-0.16148	1.37E-07
0.47346	-0.59592	0.2006	-0.16739	1.32E-07
0.48353	-0.58602	0.20247	-0.17378	1.27E-07
0.49361	-0.57611	0.2043	-0.1792	1.22E-07
0.50368	-0.5662	0.2061	-0.18753	1.15E-07
0.51505	-0.55498	0.20795	-0.19841	1.02E-07
0.52643	-0.54375	0.20975	-0.2043	9.58E-08
0.5378	-0.53252	0.21152	-0.20907	9.07E-08
0.54917	-0.52128	0.21326	-0.21527	8.66E-08
0.56054	-0.51004	0.21495	-0.21933	8.26E-08
0.57191	-0.49879	0.2166	-0.22463	7.93E-08
0.58328	-0.48753	0.21822	-0.22865	7.61E-08
0.59465	-0.47627	0.21979	-0.23321	7.32E-08
0.60602	-0.465	0.22131	-0.23713	7.04E-08
0.61739	-0.45373	0.22278	-0.24111	6.77E-08

S	XG	YG	PCOE	TAUW
0.62876	-0.44244	0.2242	-0.24472	6.51E-08
0.64013	-0.43116	0.22558	-0.24821	6.27E-08
0.65151	-0.41986	0.2269	-0.25144	6.04E-08
0.66288	-0.40857	0.22818	-0.25448	5.81E-08
0.67425	-0.39726	0.22941	-0.25731	5.60E-08
0.68562	-0.38595	0.23061	-0.25995	5.40E-08
0.69699	-0.37464	0.23176	-0.2624	5.22E-08
0.70836	-0.36332	0.23287	-0.26469	5.04E-08
0.71973	-0.352	0.23395	-0.26681	4.87E-08
0.7311	-0.34068	0.23499	-0.26878	4.71E-08
0.74247	-0.32936	0.23601	-0.27064	4.57E-08
0.75384	-0.31803	0.23699	-0.27244	4.44E-08
0.76522	-0.3067	0.23794	-0.27419	4.31E-08
0.77659	-0.29536	0.23885	-0.27589	4.19E-08
0.78796	-0.28402	0.23971	-0.27754	4.06E-08
0.79933	-0.27268	0.24052	-0.27904	3.93E-08
0.8107	-0.26134	0.24129	-0.28036	3.80E-08
0.82207	-0.24999	0.24203	-0.28149	3.69E-08
0.83344	-0.23864	0.24274	-0.28247	3.58E-08
0.84481	-0.22729	0.24343	-0.28341	3.49E-08
0.85618	-0.21594	0.2441	-0.28436	3.41E-08
0.86755	-0.20459	0.24474	-0.28533	3.33E-08
0.87893	-0.19323	0.24533	-0.2863	3.25E-08
0.8903	-0.18187	0.24588	-0.28723	3.16E-08
0.90167	-0.17051	0.24638	-0.28814	3.07E-08
0.91304	-0.15915	0.24682	-0.28888	2.98E-08
0.92441	-0.14779	0.24723	-0.28943	2.88E-08
0.93578	-0.13642	0.24762	-0.28978	2.80E-08
0.94715	-0.12506	0.248	-0.29014	2.74E-08
0.95852	-0.11369	0.24837	-0.29042	2.69E-08
0.96989	-0.10233	0.24871	-0.29098	2.65E-08
0.98126	-9.10E-02	0.24899	-0.29155	2.59E-08
0.99263	-7.96E-02	0.2492	-0.29228	2.49E-08
1.004	-6.82E-02	0.24937	-0.29195	2.42E-08
1.0154	-5.69E-02	0.2496	-0.29231	2.39E-08
1.0267	-4.55E-02	0.24979	-0.29232	2.40E-08
1.0381	-3.41E-02	0.24988	-0.29395	2.30E-08
1.0495	-2.27E-02	0.2499	-0.29294	2.27E-08
1.0609	-1.14E-02	0.24993	-0.29508	2.20E-08
1.0722	0	0.25	-0.29275	2.34E-08
1.0836	1.14E-02	0.24993	-0.29024	2.10E-08
1.095	2.27E-02	0.2499	-0.29235	2.07E-08
1.1063	3.41E-02	0.24988	-0.29119	1.99E-08
1.1177	4.55E-02	0.24979	-0.29262	1.99E-08
1.1291	5.69E-02	0.2496	-0.29231	1.88E-08
1.1405	6.82E-02	0.24937	-0.29246	1.83E-08
1.1518	7.96E-02	0.2492	-0.29187	1.79E-08
1.1632	9.10E-02	0.24899	-0.29218	1.77E-08
1.1746	0.10233	0.24871	-0.29219	1.72E-08
1.1859	0.11369	0.24837	-0.29221	1.67E-08
1.1973	0.12506	0.248	-0.29196	1.62E-08
1.2087	0.13642	0.24762	-0.29175	1.58E-08
1.2201	0.14779	0.24723	-0.29147	1.55E-08
1.2314	0.15915	0.24682	-0.29128	1.52E-08
1.2428	0.17051	0.24638	-0.29116	1.49E-08
1.2542	0.18187	0.24588	-0.29108	1.46E-08
1.2655	0.19323	0.24533	-0.29095	1.42E-08
1.2769	0.20459	0.24474	-0.2908	1.39E-08
1.2883	0.21594	0.2441	-0.2906	1.35E-08
1.2997	0.22729	0.24343	-0.29035	1.31E-08
1.311	0.23864	0.24274	-0.29005	1.28E-08
1.3224	0.24999	0.24203	-0.28974	1.25E-08
1.3338	0.26134	0.24129	-0.28945	1.22E-08
1.3451	0.27268	0.24052	-0.28919	1.19E-08
1.3565	0.28402	0.23971	-0.28896	1.17E-08

S	XG	YG	PCOE	TAUW
1.3679	0.29536	0.23885	-0.28874	1.14E-08
1.3792	0.3067	0.23794	-0.2885	1.11E-08
1.3906	0.31803	0.23699	-0.28823	1.08E-08
1.402	0.32936	0.23601	-0.28794	1.05E-08
1.4134	0.34068	0.23499	-0.28763	1.03E-08
1.4247	0.352	0.23395	-0.28731	1.00E-08
1.4361	0.36332	0.23287	-0.287	9.76E-09
1.4475	0.37464	0.23176	-0.2867	9.53E-09
1.4588	0.38595	0.23061	-0.2864	9.31E-09
1.4702	0.39726	0.22941	-0.2861	9.10E-09
1.4815	0.40857	0.22818	-0.28582	8.89E-09
1.493	0.41986	0.2269	-0.28554	8.69E-09
1.5043	0.43116	0.22558	-0.28526	8.49E-09
1.5157	0.44244	0.2242	-0.28499	8.29E-09
1.5271	0.45373	0.22278	-0.28471	8.10E-09
1.5384	0.465	0.22131	-0.28445	7.91E-09
1.5498	0.47627	0.21979	-0.28414	7.73E-09
1.5612	0.48753	0.21822	-0.2839	7.54E-09
1.5726	0.49879	0.2166	-0.28354	7.38E-09
1.5839	0.51004	0.21495	-0.28335	7.20E-09
1.5953	0.52128	0.21326	-0.2829	7.09E-09
1.6067	0.53252	0.21152	-0.28278	6.95E-09
1.618	0.54375	0.20975	-0.28233	6.88E-09
1.6294	0.55498	0.20795	-0.28212	6.90E-09
1.6408	0.5662	0.2061	-0.28242	7.57E-09
1.6509	0.57611	0.2043	-0.28203	7.11E-09
1.6609	0.58602	0.20247	-0.28178	6.82E-09
1.671	0.59592	0.2006	-0.28155	6.60E-09
1.6811	0.60581	0.1987	-0.28131	6.42E-09
1.6912	0.6157	0.19677	-0.28106	6.25E-09
1.7012	0.62558	0.1948	-0.28079	6.09E-09
1.7113	0.63546	0.19281	-0.28052	5.95E-09
1.7214	0.64532	0.19077	-0.28024	5.81E-09
1.7315	0.65518	0.1887	-0.27996	5.68E-09
1.7415	0.66503	0.1866	-0.27968	5.57E-09
1.7516	0.67488	0.18444	-0.2794	5.46E-09
1.7617	0.68471	0.18223	-0.27914	5.36E-09
1.7717	0.69452	0.17996	-0.27888	5.27E-09
1.7818	0.70432	0.1776	-0.27864	5.17E-09
1.7919	0.71409	0.17517	-0.27841	5.07E-09
1.802	0.72384	0.17264	-0.27818	4.97E-09
1.812	0.73357	0.17002	-0.27795	4.85E-09
1.8221	0.74327	0.16731	-0.27768	4.72E-09
1.8322	0.75296	0.16452	-0.2774	4.60E-09
1.8423	0.76262	0.16167	-0.27709	4.48E-09
1.8523	0.77226	0.15875	-0.27678	4.37E-09
1.8624	0.78188	0.15577	-0.27646	4.27E-09
1.8725	0.79148	0.15271	-0.27613	4.18E-09
1.8826	0.80106	0.14958	-0.27579	4.10E-09
1.8926	0.81061	0.14637	-0.27546	4.03E-09
1.9027	0.82013	0.14308	-0.27512	3.97E-09
1.9128	0.82961	0.13968	-0.2748	3.92E-09
1.9229	0.83906	0.13617	-0.27448	3.87E-09
1.9329	0.84845	0.13252	-0.27417	3.83E-09
1.943	0.85777	0.12871	-0.27387	3.78E-09
1.9531	0.86703	0.12474	-0.27357	3.72E-09
1.9632	0.87621	0.12059	-0.27326	3.65E-09
1.9732	0.88531	0.11625	-0.27293	3.57E-09
1.9833	0.89431	0.11173	-0.27259	3.48E-09
1.9934	0.90323	0.10704	-0.27221	3.39E-09
2.0035	0.91206	0.10219	-0.27182	3.32E-09
2.0135	0.92079	9.72E-02	-0.27142	3.26E-09
2.0236	0.92943	9.20E-02	-0.27101	3.22E-09
2.0337	0.93794	8.66E-02	-0.27062	3.20E-09
2.0438	0.94627	8.09E-02	-0.27026	3.19E-09

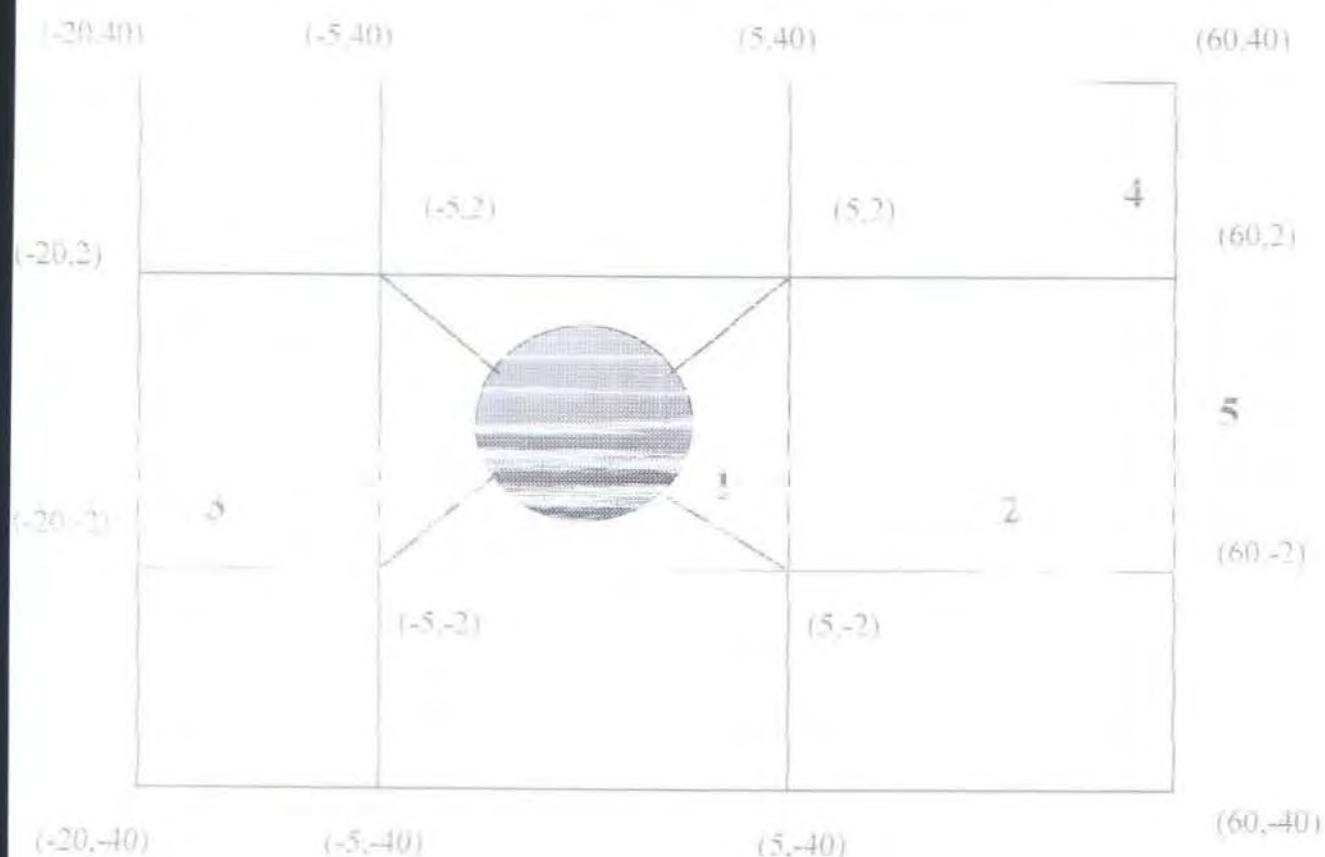
S	XG	YG	PCOE	TAUW
2.0538	0.95434	7.49E-02	-0.26996	3.14E-09
2.0639	0.96202	6.84E-02	-0.26968	2.97E-09
2.074	0.9693	6.14E-02	-0.26931	2.71E-09
2.0841	0.97621	5.41E-02	-0.26895	2.46E-09
2.0941	0.98264	4.63E-02	-0.26864	2.15E-09
2.1042	0.98837	3.81E-02	-0.2684	1.69E-09
2.1143	0.99317	2.92E-02	-0.26819	1.02E-09
2.1243	0.99681	1.98E-02	-0.26801	4.73E-10
2.1344	0.99912	1.00E-02	-0.26786	8.54E-10
2.1445	1	0	-0.26772	2.03E-09
2.1545	0.99912	-1.00E-02	-0.26759	3.05E-09
2.1646	0.99681	-1.98E-02	-0.26762	3.97E-09
2.1747	0.99317	-2.92E-02	-0.26762	4.72E-09
2.1847	0.98837	-3.81E-02	-0.26772	5.20E-09
2.1948	0.98264	-4.63E-02	-0.26787	5.42E-09
2.2049	0.97621	-5.41E-02	-0.26814	5.46E-09
2.2149	0.9693	-6.14E-02	-0.2685	5.54E-09
2.225	0.96202	-6.84E-02	-0.26884	5.81E-09
2.2351	0.95434	-7.49E-02	-0.26902	5.92E-09
2.2452	0.94627	-8.09E-02	-0.26923	5.76E-09
2.2552	0.93794	-8.66E-02	-0.26953	5.56E-09
2.2653	0.92943	-9.20E-02	-0.26988	5.44E-09
2.2754	0.92079	-9.72E-02	-0.27024	5.39E-09
2.2855	0.91206	-0.10219	-0.27059	5.40E-09
2.2955	0.90323	-0.10704	-0.27092	5.45E-09
2.3056	0.89431	-0.11173	-0.27122	5.53E-09
2.3157	0.88531	-0.11625	-0.27147	5.62E-09
2.3258	0.87621	-0.12059	-0.27169	5.69E-09
2.3358	0.86703	-0.12474	-0.27189	5.73E-09
2.3459	0.85777	-0.12871	-0.27208	5.76E-09
2.356	0.84845	-0.13252	-0.27227	5.78E-09
2.3661	0.83906	-0.13617	-0.27246	5.79E-09
2.3761	0.82961	-0.13968	-0.27265	5.79E-09
2.3862	0.82013	-0.14308	-0.27286	5.80E-09
2.3963	0.81061	-0.14637	-0.27308	5.84E-09
2.4064	0.80106	-0.14958	-0.27329	5.89E-09
2.4164	0.79148	-0.15271	-0.2735	5.96E-09
2.4265	0.78188	-0.15577	-0.27371	6.05E-09
2.4366	0.77226	-0.15875	-0.2739	6.14E-09
2.4467	0.76262	-0.16167	-0.27408	6.25E-09
2.4567	0.75296	-0.16452	-0.27425	6.37E-09
2.4668	0.74327	-0.16731	-0.27439	6.51E-09
2.4769	0.73357	-0.17002	-0.2745	6.66E-09
2.487	0.72384	-0.17264	-0.27458	6.79E-09
2.497	0.71409	-0.17517	-0.27465	6.91E-09
2.5071	0.70432	-0.1776	-0.27471	7.01E-09
2.5172	0.69452	-0.17996	-0.27479	7.09E-09
2.5273	0.68471	-0.18223	-0.27488	7.18E-09
2.5373	0.67488	0.18444	-0.27499	7.28E-09
2.5474	0.66503	-0.1866	-0.27511	7.39E-09
2.5575	0.65518	-0.1887	-0.27524	7.53E-09
2.5676	0.64532	-0.19077	-0.27537	7.68E-09
2.5776	0.63546	-0.19281	-0.27551	7.86E-09
2.5877	0.62558	-0.1948	-0.27563	8.06E-09
2.5978	0.6157	-0.19677	-0.27576	8.29E-09
2.6078	0.60581	-0.1987	-0.27587	8.56E-09
2.6179	0.59592	-0.2006	-0.27599	8.88E-09
2.626	0.58602	-0.20247	-0.27608	9.29E-09
2.6381	0.57611	-0.2043	-0.27629	9.91E-09
2.6481	0.5662	-0.2061	-0.27659	1.11E-08
2.6595	0.55498	-0.20795	-0.27663	1.09E-08
2.6709	0.54375	-0.20975	-0.27687	1.11E-08
2.6823	0.53252	-0.21152	-0.27718	1.13E-08
2.6936	0.52128	-0.21326	-0.27736	1.16E-08
2.705	0.51004	-0.21495	-0.27767	1.18E-08

S	XG	YG	PCOE	TAUW
2.7164	0.49879	-0.2166	-0.27788	1.21E-08
2.7277	0.48753	-0.21822	-0.27815	1.24E-08
2.7391	0.47627	-0.21979	-0.27838	1.27E-08
2.7505	0.465	-0.22131	-0.27861	1.30E-08
2.7619	0.45373	-0.22278	-0.27884	1.33E-08
2.7732	0.44244	-0.2242	-0.27907	1.35E-08
2.7846	0.43116	-0.22558	-0.2793	1.38E-08
2.796	0.41986	-0.2269	-0.27954	1.41E-08
2.8073	0.40857	-0.22818	-0.27978	1.44E-08
2.8187	0.39726	-0.22941	-0.28004	1.48E-08
2.8301	0.38595	-0.23061	-0.28031	1.51E-08
2.8415	0.37464	-0.23176	-0.28059	1.54E-08
2.8528	0.36332	-0.23287	-0.28088	1.57E-08
2.8642	0.352	-0.23395	-0.28118	1.61E-08
2.8756	0.34068	-0.23499	-0.28149	1.64E-08
2.8869	0.32936	-0.23601	-0.2818	1.68E-08
2.8983	0.31803	-0.23699	-0.2821	1.72E-08
2.9097	0.3067	-0.23794	-0.28237	1.77E-08
2.921	0.29536	-0.23885	-0.28262	1.81E-08
2.9324	0.28402	-0.23971	-0.28284	1.85E-08
2.9438	0.27268	-0.24052	-0.28307	1.89E-08
2.9552	0.26134	-0.24129	-0.28335	1.92E-08
2.9665	0.24999	-0.24203	-0.28366	1.96E-08
2.9779	0.23864	-0.24274	-0.28402	2.00E-08
2.9893	0.22729	-0.24343	-0.28438	2.05E-08
3.0006	0.21594	-0.2441	-0.28465	2.10E-08
3.012	0.20459	-0.24474	-0.28489	2.16E-08
3.0234	0.19323	-0.24533	-0.28508	2.21E-08
3.0348	0.18187	-0.24588	-0.28524	2.26E-08
3.0461	0.17051	-0.24638	-0.28536	2.30E-08
3.0575	0.15915	-0.24682	-0.28552	2.34E-08
3.0689	0.14779	-0.24723	-0.28579	2.38E-08
3.0802	0.13642	-0.24762	-0.28613	2.42E-08
3.0916	0.12506	-0.248	-0.28647	2.48E-08
3.103	0.11369	-0.24837	-0.28676	2.54E-08
3.1144	0.10233	-0.24871	-0.28692	2.62E-08
3.1257	9.10E-02	-0.24899	-0.28681	2.68E-08
3.1371	7.96E-02	-0.2492	-0.28679	2.70E-08
3.1485	6.82E-02	-0.24937	-0.28722	2.73E-08
3.1598	5.69E-02	-0.2496	-0.28776	2.83E-08
3.1712	4.55E-02	-0.24979	-0.28747	2.93E-08
3.1826	3.41E-02	-0.24988	-0.2872	2.97E-08
3.194	2.27E-02	-0.2499	-0.28718	2.98E-08
3.2053	1.14E-02	-0.24993	-0.2879	3.04E-08
3.2167	0	-0.25	-0.2876	3.17E-08
3.2281	-1.14E-02	-0.24993	-0.28727	3.17E-08
3.2394	-2.27E-02	-0.2499	-0.28801	3.24E-08
3.2506	-3.41E-02	-0.24988	-0.28789	3.36E-08
3.2622	-4.55E-02	-0.24979	-0.28743	3.46E-08
3.2735	-5.69E-02	-0.2496	-0.28683	3.49E-08
3.2849	-6.82E-02	-0.24937	-0.28718	3.51E-08
3.2963	-7.96E-02	-0.2492	-0.28739	3.62E-08
3.3077	-9.10E-02	-0.24899	-0.28696	3.74E-08
3.319	-0.10233	-0.24871	-0.28631	3.82E-08
3.3304	-0.11369	-0.24837	-0.28596	3.88E-08
3.3418	-0.12506	-0.248	-0.28575	3.94E-08
3.3531	-0.13642	-0.24762	-0.28557	4.03E-08
3.3645	-0.14779	-0.24723	-0.28533	4.13E-08
3.3759	-0.15915	-0.24682	-0.28492	4.24E-08
3.3873	-0.17051	-0.24638	-0.28427	4.36E-08
3.3986	-0.18187	-0.24588	-0.28345	4.47E-08
3.41	-0.19323	-0.24533	-0.28262	4.58E-08
3.4214	-0.20459	-0.24474	-0.28176	4.68E-08
3.4327	-0.21594	-0.2441	-0.28092	4.78E-08
3.4441	-0.22729	-0.24343	-0.28008	4.88E-08

S	XG	YG	PCOE	TAUW
3.4555	-0.23864	-0.24274	-0.27928	4.99E-08
3.4669	-0.24999	-0.24203	-0.27844	5.12E-08
3.4782	-0.26134	-0.24129	-0.27744	5.26E-08
3.4896	-0.27268	-0.24052	-0.27624	5.41E-08
3.501	-0.28402	-0.23971	-0.27485	5.57E-08
3.5123	-0.29536	-0.23885	-0.2733	5.72E-08
3.5237	-0.3067	-0.23794	-0.27173	5.87E-08
3.5351	-0.31803	-0.23699	-0.27009	6.02E-08
3.5465	-0.32936	-0.23601	-0.26844	6.18E-08
3.5578	-0.34068	-0.23499	-0.26672	6.35E-08
3.5692	-0.352	-0.23395	-0.2649	6.53E-08
3.5806	-0.36332	-0.23287	-0.26291	6.73E-08
3.5919	-0.37464	-0.23176	-0.26077	6.93E-08
3.6033	-0.38595	-0.23061	-0.25846	7.15E-08
3.6147	-0.39726	-0.22941	-0.25596	7.38E-08
3.626	-0.40857	-0.22818	-0.25329	7.62E-08
3.6374	-0.41986	-0.2269	-0.2504	7.87E-08
3.6488	-0.43116	-0.22558	-0.24733	8.13E-08
3.6602	-0.44244	-0.2242	-0.24403	8.41E-08
3.6715	-0.45373	-0.22278	-0.24057	8.69E-08
3.6829	-0.465	-0.22131	-0.23686	8.99E-08
3.6943	-0.47627	-0.21979	-0.23303	9.29E-08
3.7056	-0.48753	-0.21822	-0.22894	9.61E-08
3.717	-0.49879	-0.2166	-0.22484	9.95E-08
3.7284	-0.51004	-0.21495	-0.22041	1.03E-07
3.7398	-0.52128	-0.21326	-0.21593	1.07E-07
3.7511	-0.53252	-0.21152	-0.21117	1.11E-07
3.7625	-0.54375	-0.20975	-0.20597	1.16E-07
3.7739	-0.55498	-0.20795	-0.20126	1.20E-07
3.7852	-0.5662	-0.2061	-0.19414	1.31E-07
3.7953	-0.57811	-0.2043	-0.18541	1.32E-07
3.8054	-0.58602	-0.20247	-0.18051	1.36E-07
3.8155	-0.59592	-0.2006	-0.17404	1.40E-07
3.8255	-0.60581	-0.1987	-0.16818	1.44E-07
3.8356	-0.6157	-0.19677	-0.16193	1.48E-07
3.8457	-0.62558	-0.1948	-0.15568	1.53E-07
3.8558	-0.63546	-0.19281	-0.1492	1.57E-07
3.8658	-0.64532	-0.19077	-0.14254	1.62E-07
3.8759	-0.65518	-0.1887	-0.1356	1.67E-07
3.886	-0.66503	-0.1866	-0.12834	1.72E-07
3.8961	-0.67488	-0.18444	-0.12065	1.78E-07
3.9061	-0.68471	-0.18223	-0.1124	1.84E-07
3.9162	-0.69452	-0.17996	-0.10345	1.91E-07
3.9263	-0.70432	-0.1776	-0.938E-02	1.97E-07
3.9364	-0.71409	-0.17517	-0.834E-02	2.03E-07
3.9464	-0.72384	-0.17264	-7.25E-02	2.09E-07
3.9565	-0.73357	-0.17002	-6.12E-02	2.15E-07
3.9666	-0.74327	-0.16731	-4.99E-02	2.20E-07
3.9767	-0.75296	-0.16452	-3.87E-02	2.25E-07
3.9867	-0.76262	-0.16167	-2.74E-02	2.31E-07
3.9968	-0.77226	-0.15875	-1.57E-02	2.37E-07
4.0069	-0.78188	-0.15577	-3.52E-03	2.44E-07
4.017	-0.79148	-0.15271	9.10E-03	2.52E-07
4.027	-0.80106	-0.14958	2.24E-02	2.60E-07
4.0371	-0.81061	-0.14637	3.64E-02	2.69E-07
4.0472	-0.82013	-0.14308	5.13E-02	2.80E-07
4.0573	-0.82961	-0.13968	6.78E-02	2.92E-07
4.0673	-0.83906	-0.13617	8.61E-02	3.05E-07
4.0774	-0.84845	-0.13252	0.10654	3.18E-07
4.0875	-0.85777	-0.12871	0.12902	3.32E-07
4.0976	-0.86703	-0.12474	0.15361	3.46E-07
4.1076	-0.87621	-0.12059	0.18021	3.60E-07
4.1177	-0.88531	-0.11625	0.20872	3.73E-07
4.1278	-0.89431	-0.11173	0.23822	3.85E-07
4.1379	-0.90323	-0.10704	0.26822	3.97E-07

S	XG	YG	PCOE	TAUW
4.1479	-0.91206	-0.10219	0.29952	4.12E-07
4.158	-0.92079	-9.72E-02	0.33271	4.30E-07
4.1681	-0.92943	-9.20E-02	0.36919	4.52E-07
4.1781	-0.93794	-8.66E-02	0.41073	4.81E-07
4.1882	-0.94627	-8.09E-02	0.46289	5.19E-07
4.1983	-0.95434	-7.49E-02	0.53114	5.56E-07
4.2084	-0.96202	-6.84E-02	0.61196	5.68E-07
4.2184	-0.9693	-6.14E-02	0.68523	5.61E-07
4.2285	-0.97621	-5.41E-02	0.76139	5.67E-07
4.2386	-0.98264	-4.63E-02	0.85221	5.70E-07
4.2487	-0.98837	-3.81E-02	0.96156	5.43E-07
4.2587	-0.99317	-2.92E-02	1.0695	4.71E-07
4.2688	-0.99681	-1.98E-02	1.17	3.47E-07
4.2789	-0.99912	-1.00E-02	1.2322	1.85E-07

LAMPIRAN B
GAMBAR MESHING



Rn 5 :

File	1	2	3	4	5
	100 : 20	20 : 80	20 : 16	20 : 200	60 : 1

Rn 10 :

File	1	2	3	4	5
	100 : 20	20 : 80	20 : 16	20 : 200	50 : 1

Rn 50 :

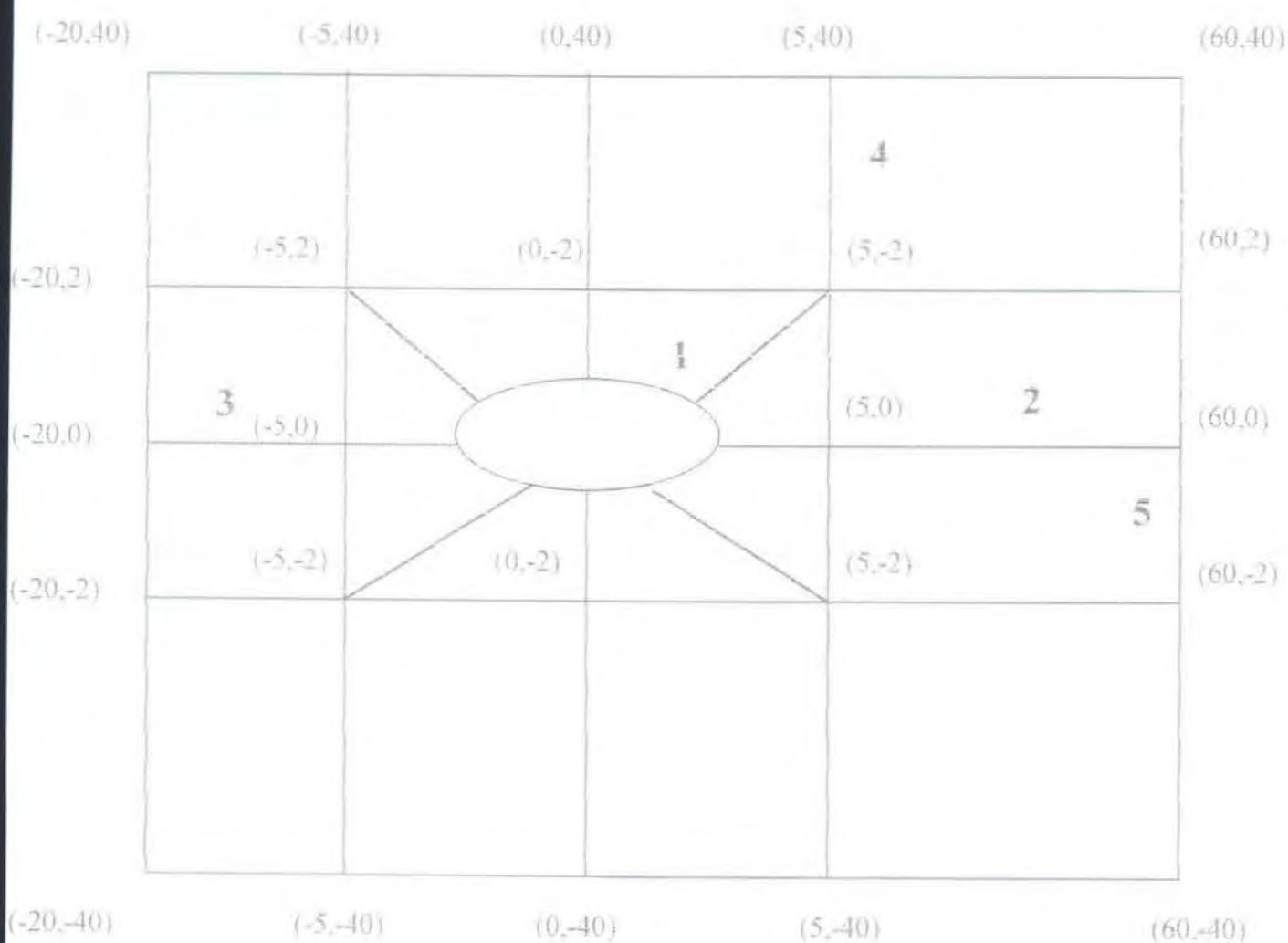
File	1	2	3	4	5
	100 : 20	20 : 80	20 : 16	20 : 200	45 : 1

Rn 100 :

File	1	2	3	4	5
	100 : 20	20 : 80	20 : 16	20 : 200	50 : 1

Rn 500 :

File	1	2	3	4	5
	100 : 20	20 : 80	20 : 16	20 : 200	45 : 1



Rn 5 :

File	1	2	3	4	5
	105 : 1000	20 : 35	10 : 15	10 : 130	35 : 1

Rn 10 :

File	1	2	3	4	5
	100 : 1000	20 : 35	10 : 15	10 : 130	35 : 1

Rn 50 :

File	1	2	3	4	5
	90 : 1010	20 : 35	10 : 15	10 : 90	35 : 1

Rn 100 :

File	1	2	3	4	5
	120 : 1000	20 : 35	10 : 15	10 : 130	45 : 1

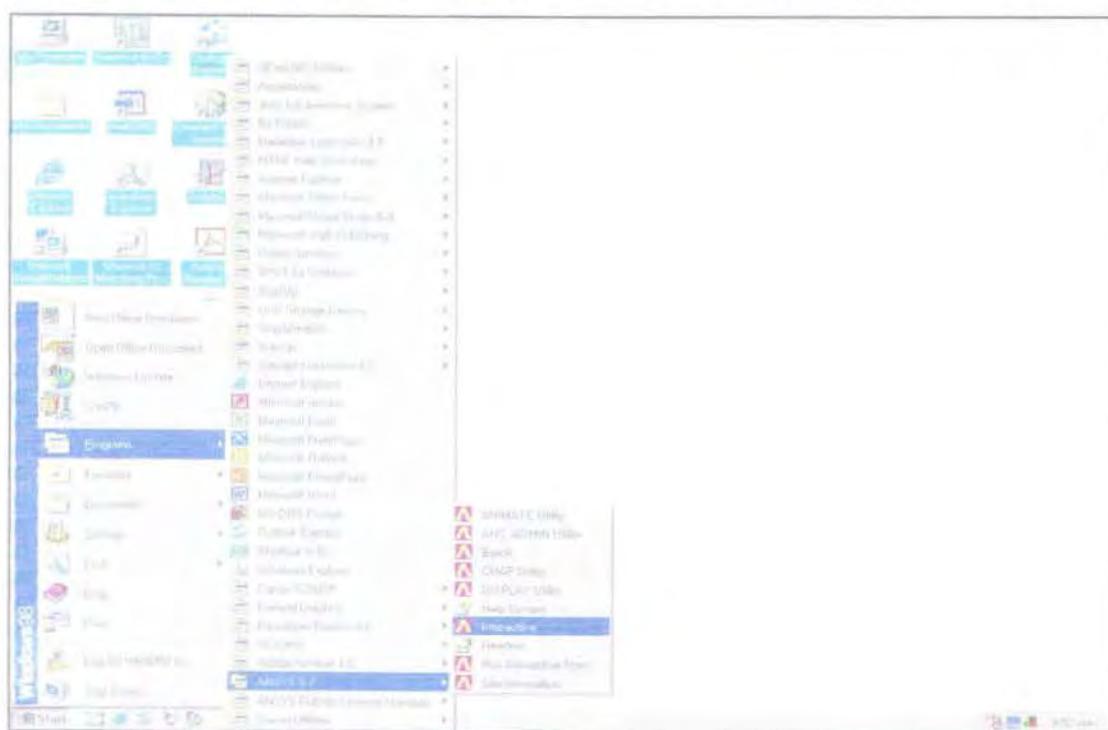
Rn 500 :

File	1	2	3	4	5
	100 : 1000	20 : 35	10 : 15	10 : 130	30 : 1

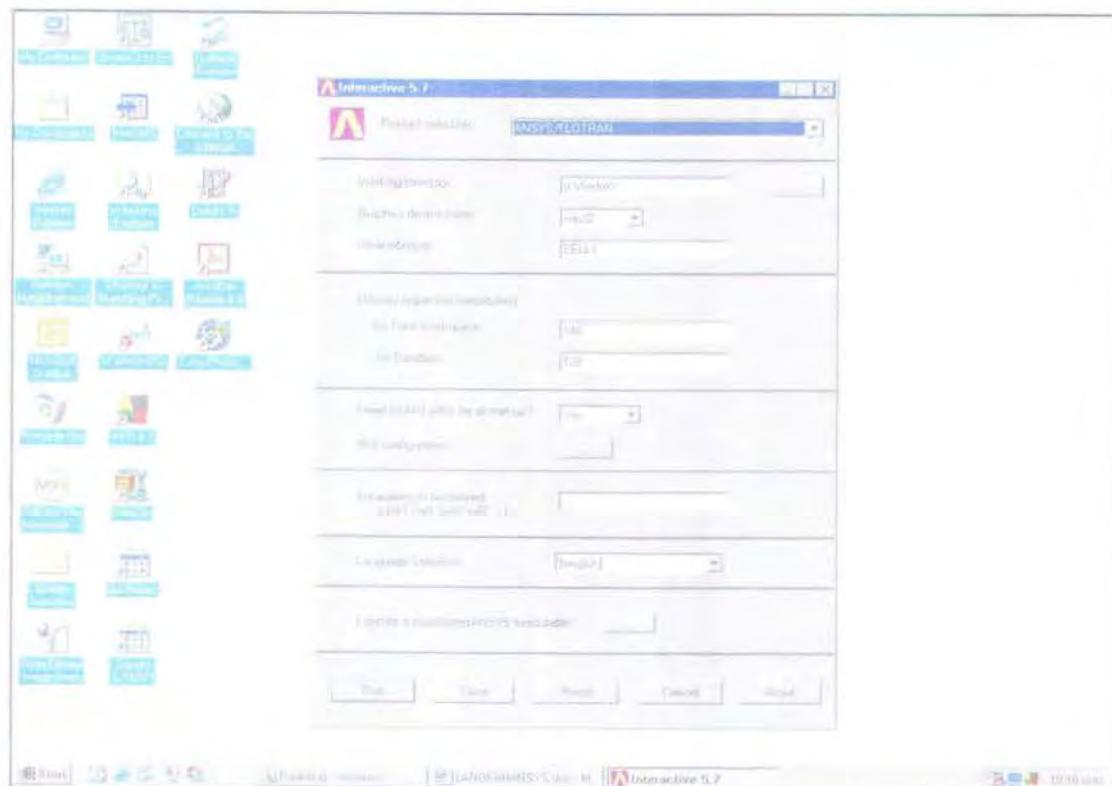
LAMPIRAN C VISUALISASI

Lampiran Tugas Akhir Hidrodinamika

Langkah I : Klik start pilih program Ansys 5.4 atau 5.7 kemudian pilih Interactive



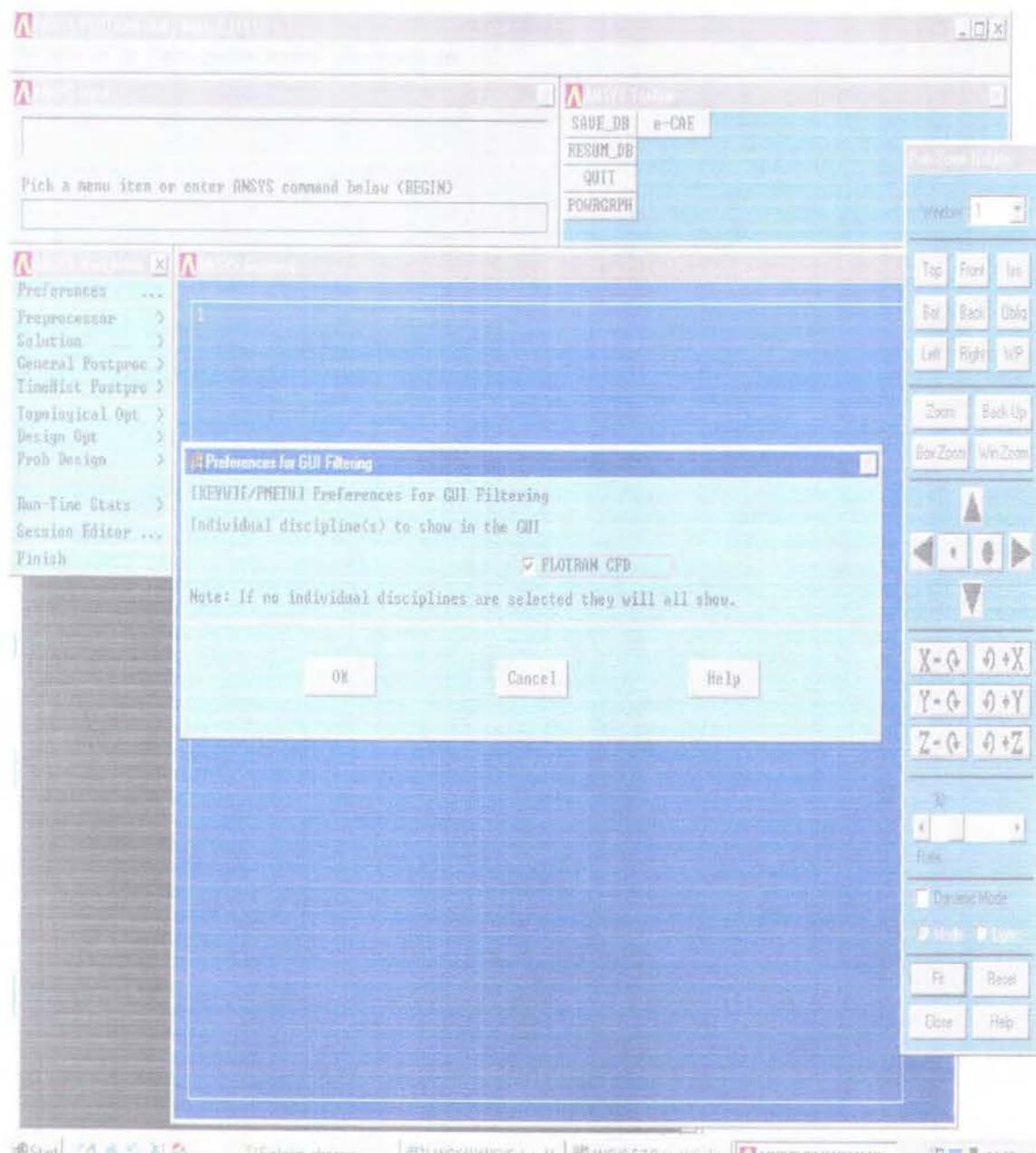
Langkah II : Pilih Product selection untuk menentukan bentuk aplikasi apa yang akan digunakan. Tekan ... pada Working directory untuk meletakkan dimana file yang



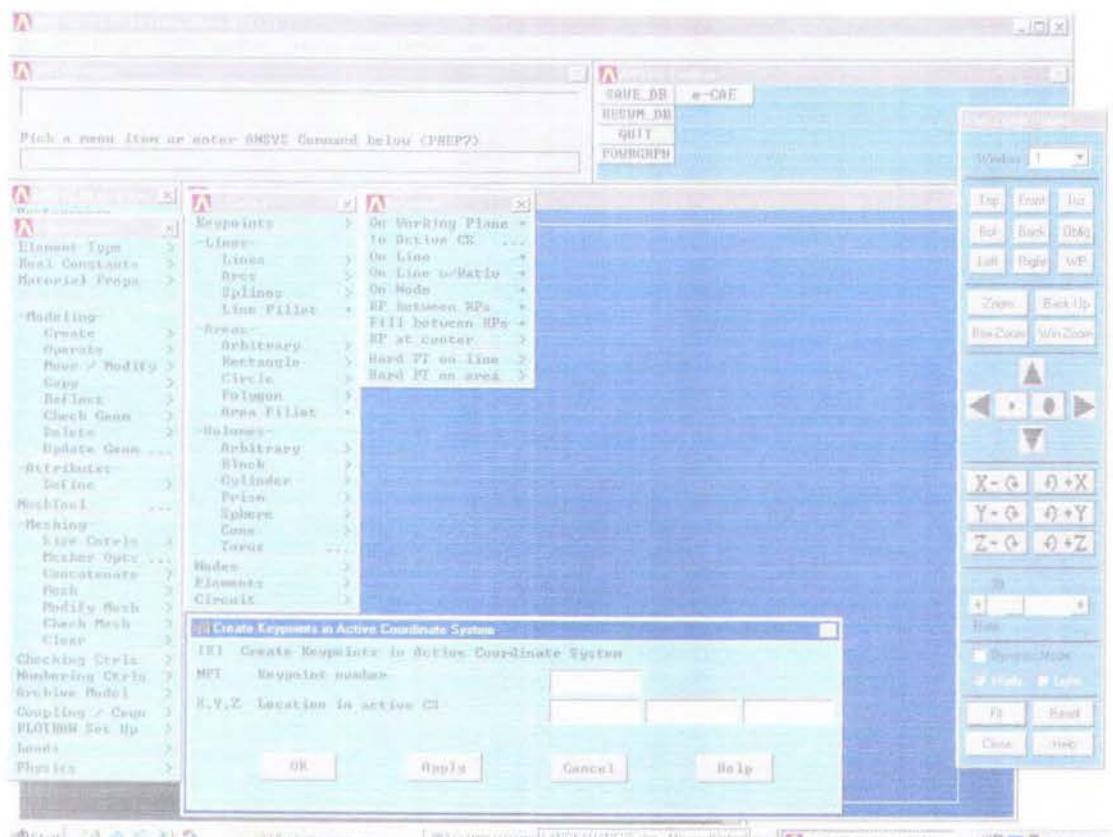
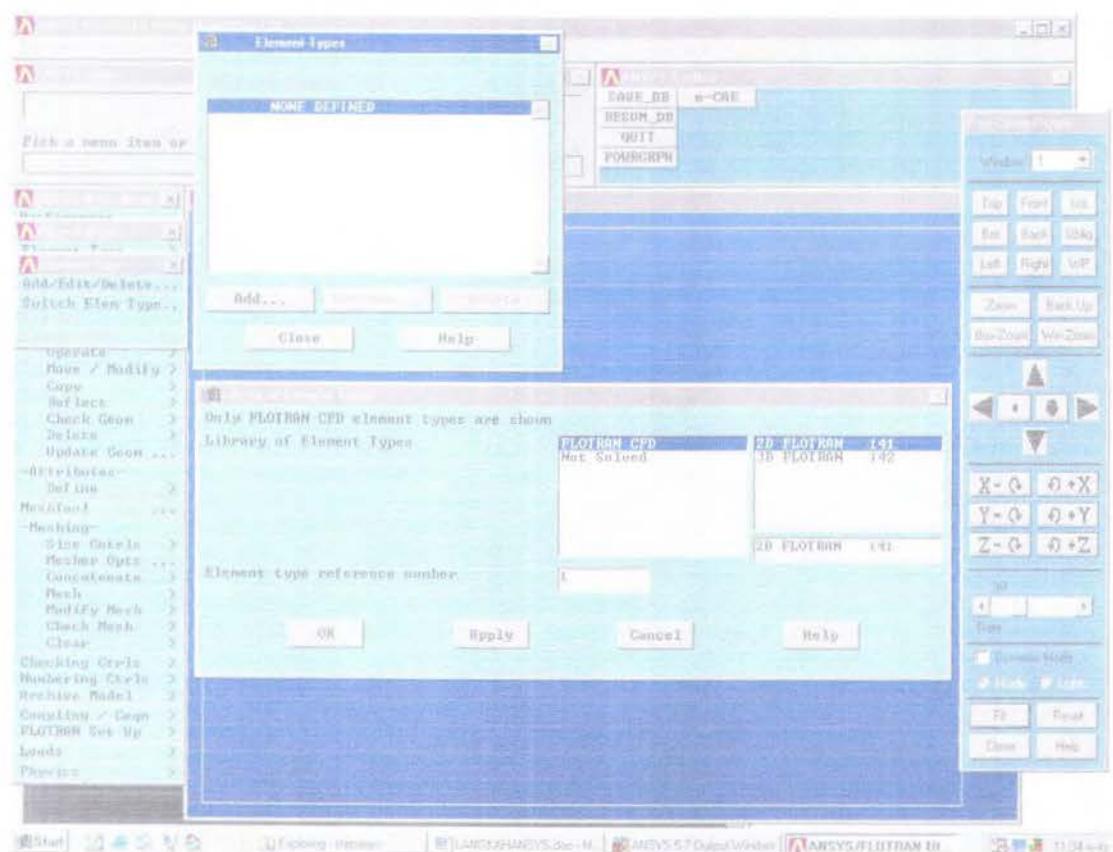
Lampiran Tugas Akhir Hidrodinamika

dibuat akan diletakkan kemudian masukkan nama file pada Initial jobname. Masukkan space yang dibutuhkan untuk iterasi pada “for TotalWorkspace” begitu juga pada “for Database” yang ada dibawahnya.

Langkah III : Pilih ANSYS menu kemudian pilih Preferences... (keluar tampilan seperti ini) klik OK, pilih menu diatas PlotCtrls untuk mengeluarkan menu Pan-Zoom-Rotate



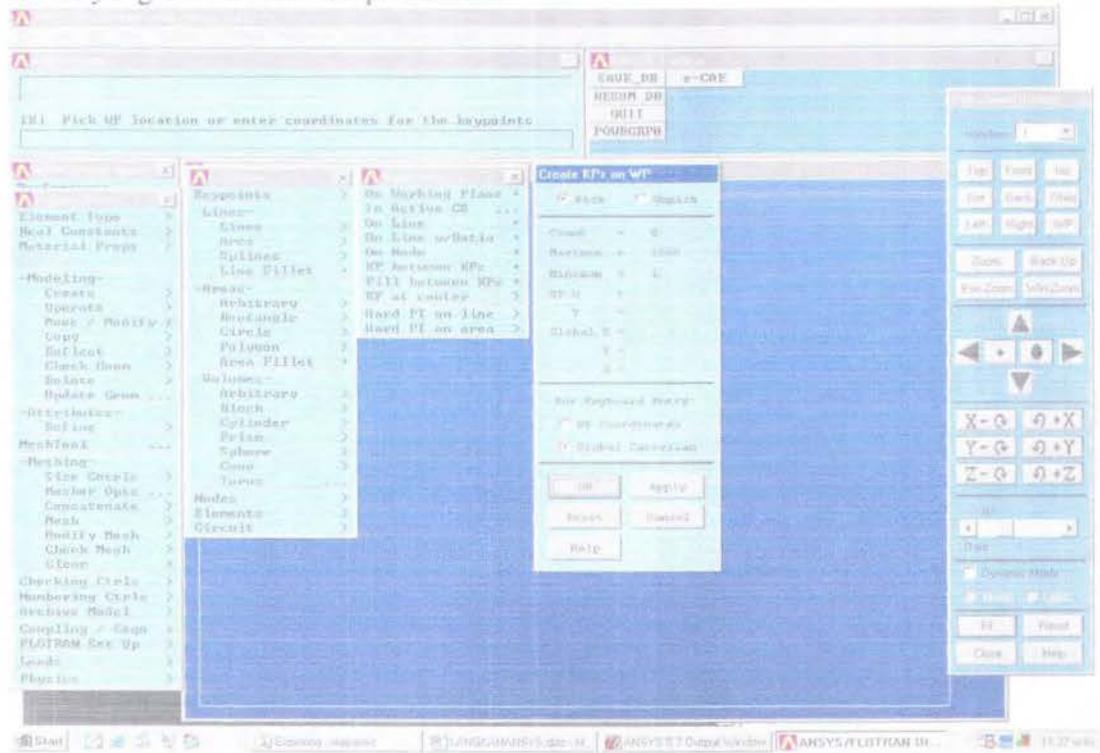
Lampiran Tugas Akhir Hidrodinamika



Lampiran Tugas Akhir Hidrodinamika

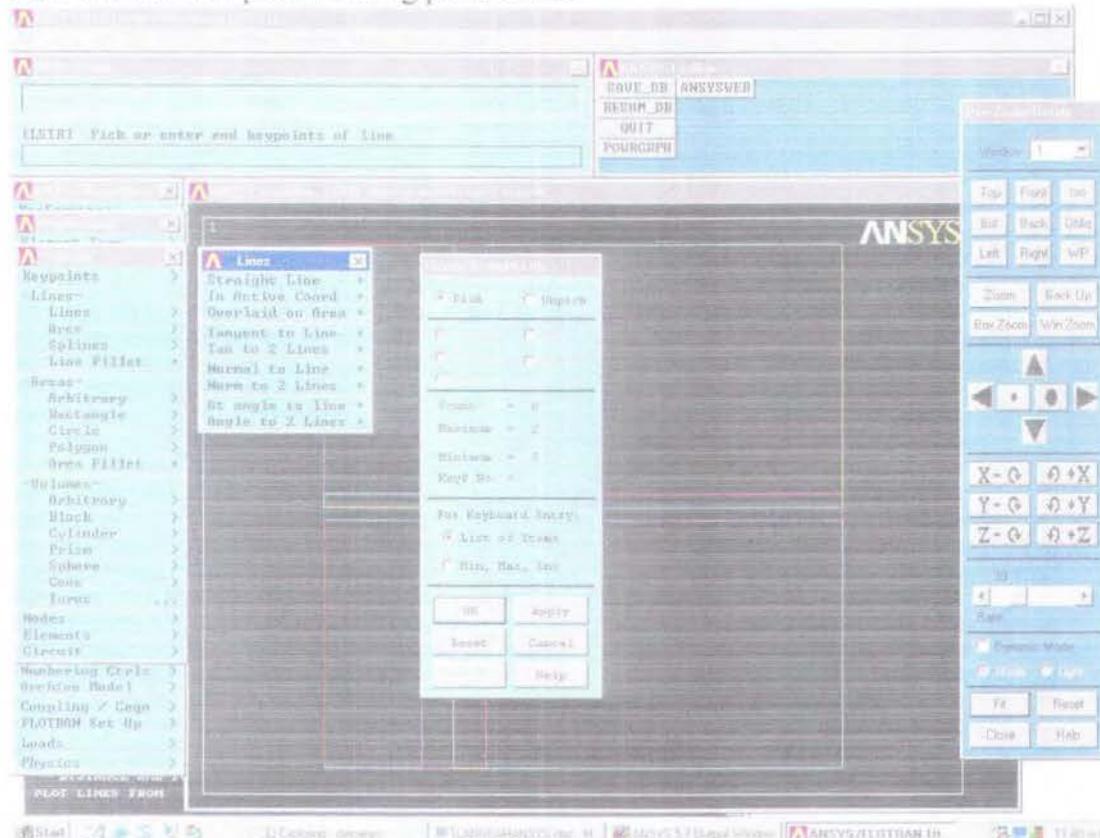
Langkah IV :

pilih menu On working Plane masukkan koordinat untuk proses meshing disekitar benda yang akan dilakukan percobaan.



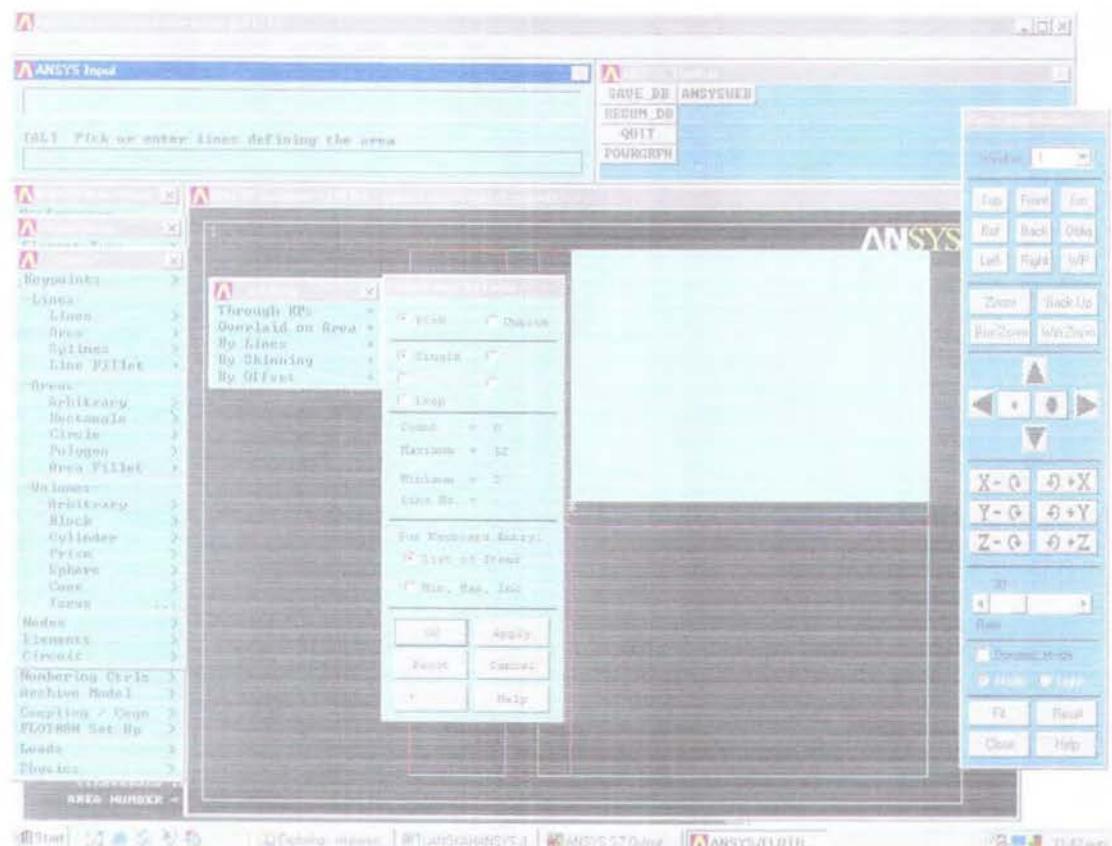
Langkah V :

Pilih Create kemudian straight line untuk menghubungkan titik-titik pada benda yang telah dimasukkan pada working plane diatas

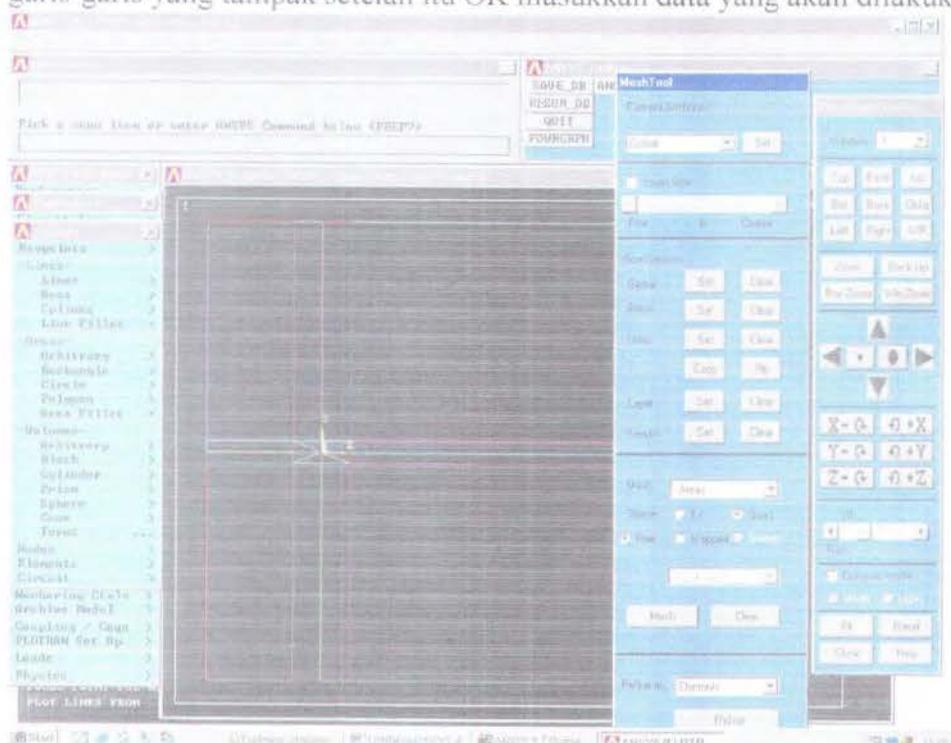


Lampiran Tugas Akhir Hidrodinamika

Langkah VI :
pilih Create kemudian arbitrary By lines lalu klik pada garis disekitar geometri tersebut

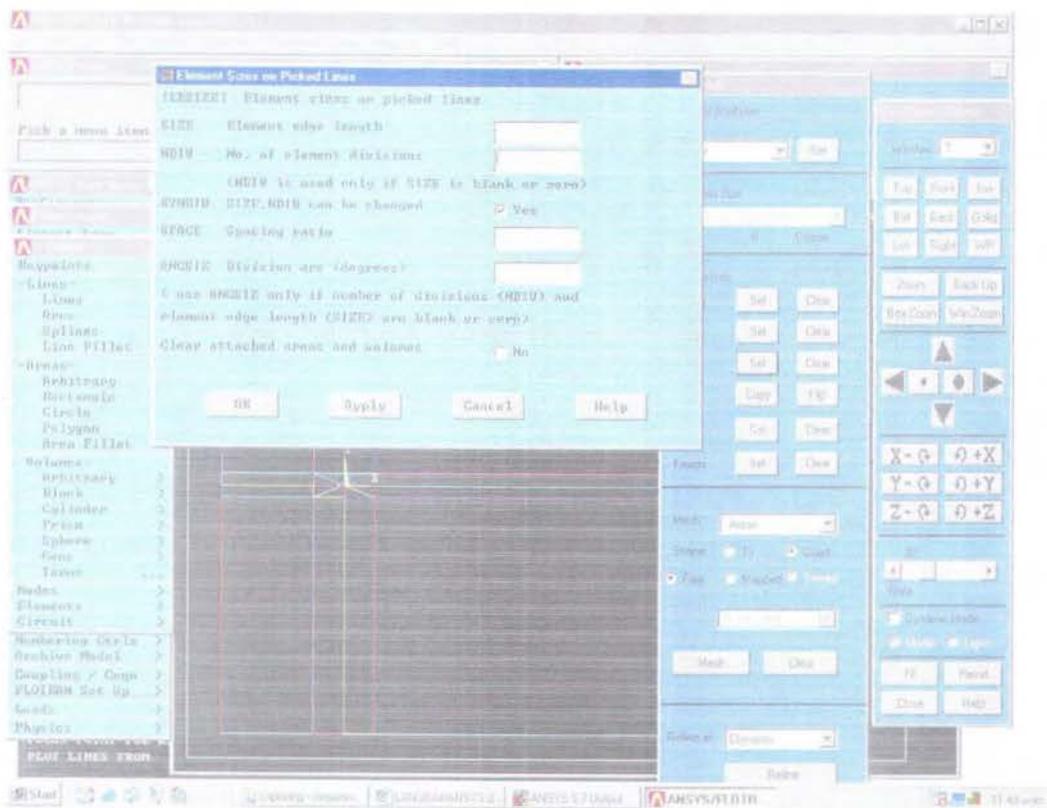


Pilih kembali Preprocessor kemudian klik MeshTool, klik lines set kemudian klik garis-garis yang tampak setelah itu OK masukkan data yang akan dilakukan iterasi

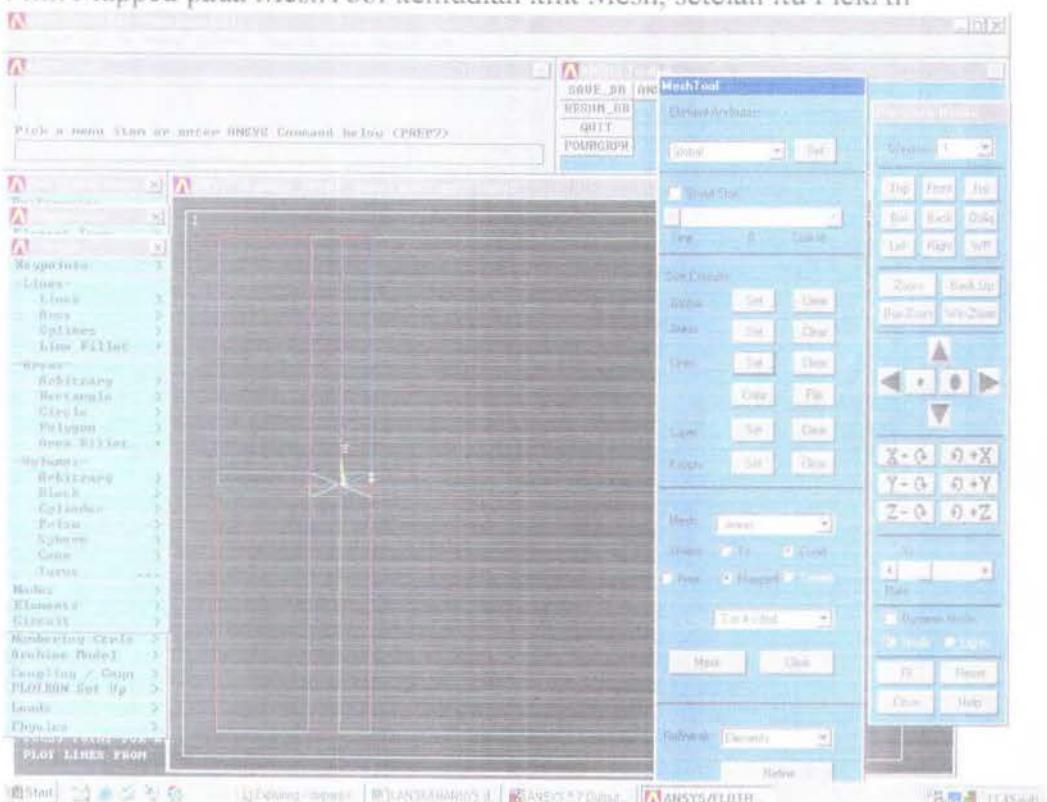


Lampiran Tugas Akhir Hidrodinamika

Langkah VII : Masukkan iterasi pada garis yang diletakkan pada kotak NDIV ... Kemudian SPACE pada setiap garis yang akan dilalui aliran.



Pilih Mapped pada MeshTool kemudian klik Mesh, setelah itu PickAll

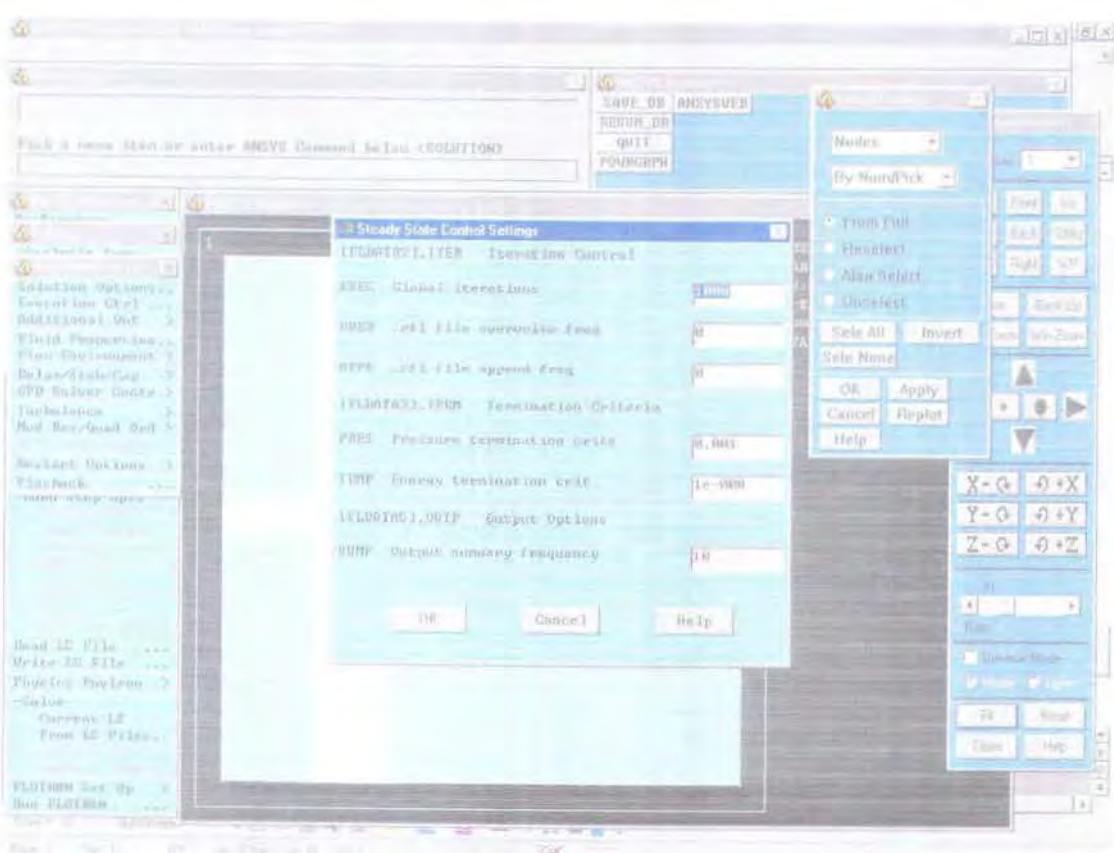


Lampiran Tugas Akhir Hidrodinamika

Langkah VIII : Simpan hasil pekerjaan pada menu File change jobname kemudian pilih menu Select / entities / lines / by numpick pilih garis yang akan dilakukan meshing pada sisi bidangnya. Klik Ok kemudian pilih kembali select / entities / node / attached to / lines all / Ok. Pilih Plot pada tampilan menu diatas kemudian Node.

Langkah IX : Ambil perintah Loads / apply / velocity / on nodes / Box / Ok masukkan Vx dan Vy yang akan diteliti. Setelah itu kembali ke perintah select / entities / nodes / bynumpick / Ok / Pick All / Plot / Nodes

Langkah X : Simpan pekerjaan pada SAVEDB cari perintah Flotran setup / solution option / OK / Execution untuk melakukan berapa lama percobaan /iterasi dilakukan. / Press ... / Ok.



Langkah XI : pilih menu Addtional Out / RFL OUT DERIVED / pilih bentuk koefesien yang akan diminta.

Langkah XII : pilih menu Fluid properties untuk menunjukkan bentuk aliran mana yang akan melewati model penelitian. Masukkan nilai DO ... / nilai VO .../ pindah menu ke Solution / run flotran.

7. Flow over a Circular Cylinder

Until now we have only considered internal flows. Let us now consider examples of external incompressible flows. In the first example, water at a temperature of 293.15 K and a pressure of 1 atm flows over a cylinder of 0.01 m diameter. The flow pattern of this example substantially depends on the Reynolds numbers based on the cylinder diameter. At low Reynolds numbers ($4 < \text{Re} < 60$) two steady vortices are formed on the rear side of the cylinder and remain attached to it, as it is shown schematically in Fig.7.1 (see Refs.3, 4 also).

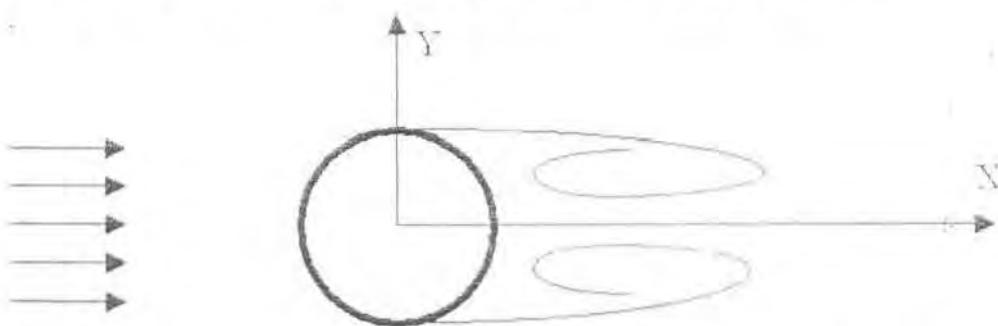


Fig.7.1 Flow past a cylinder at low Reynolds numbers ($4 < \text{Re} < 60$).

At higher Reynolds numbers the flow becomes unstable and a von Karman vortex street appears in the wake past the cylinder. Moreover, at $\text{Re} > 60\dots 100$ the eddies attached to the cylinder begin to oscillate and shed from the cylinder (Refs.3, 4). The flow pattern is shown schematically in Fig.7.2.

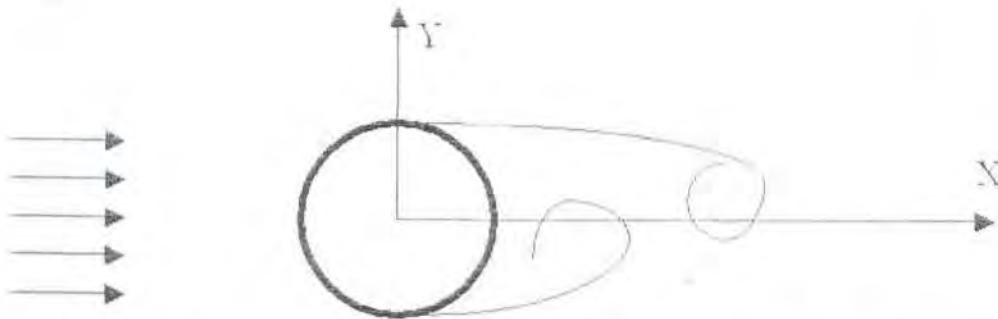


Fig.7.2 Flow past a cylinder at Reynolds numbers $\text{Re} > 60\dots 100$.

To calculate the 2D flow (in the X-Y plane) with FloWorks 2001, the SolidWorks model shown in Fig.7.3 has been created.

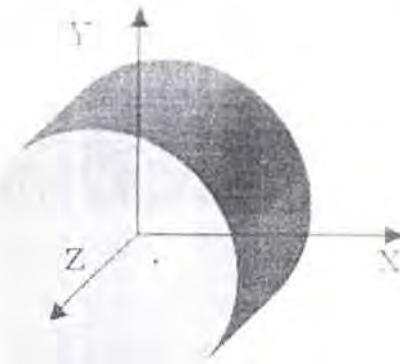


Fig.7.3 The SolidWorks model for calculating 2D flow over a cylinder with FloWorks 2001.

A qualitative time-dependent flow pattern over and past the cylinder calculated as time-dependent (in contrast with all the previous examples calculated as steady-state processes) at result resolution level is 5 shown in Fig. 7.4. A qualitative flow pattern of the von Karman vortex street type is seen. The predicted frequency characteristics of this unsteady vortex shedding are not accurate at present, deviating from the theoretical curve (Strouhal number versus Reynolds number) at some Reynolds number values.

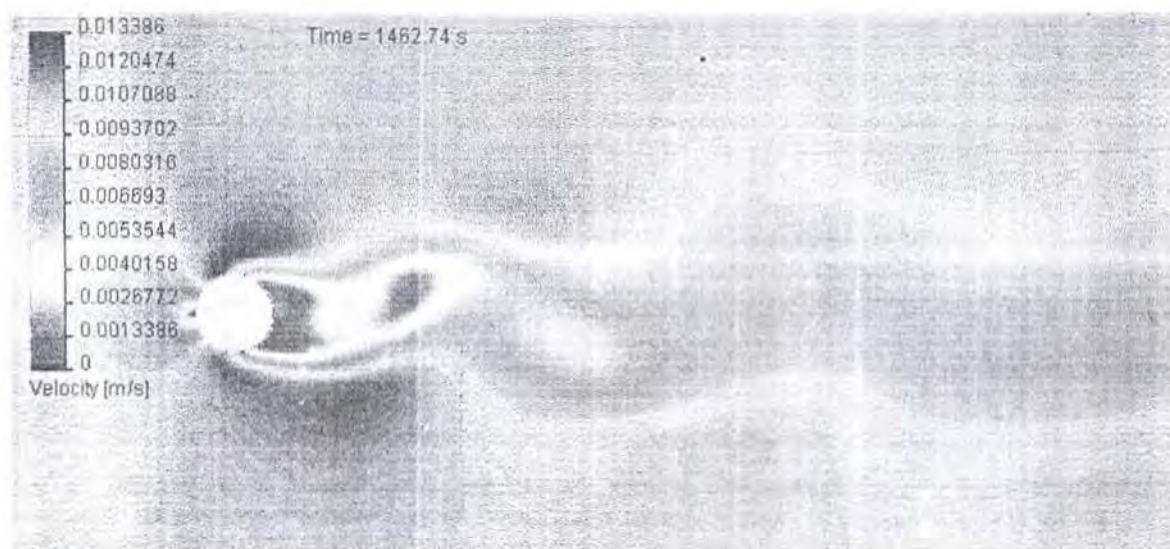


Fig.7.4. Velocity contours of flow over and past the cylinder at $Re=100$.

In contrast to the time-dependent characteristics, the time-averaged cylinder drag curve is predicted much more accurately. Although solving the time-dependent problem is the most straight-forward and correct way (since the flow over the cylinder is unsteady), the calculations can also be performed by solving the steady-state problem in order to shorten the computational time (by about 2 to 10 times, depending on the flow characteristics). A physical reason for this is that the cylinder drag curve is time-averaged (see Ref.3), so the steady-state calculations can be considered as time-averaged results.

Table 7.1 and Fig.7.5 show the influence of result resolution level and time dependency (steady-state versus time-dependent analysis) on the predicted cylinder drag within the wide Reynolds number range of $Re = 0.1 \dots 10^7$ (the cylinder diameter $D = 1$ m at $Re \geq 10^5$).

Here, the cylinder drag coefficient is defined as

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 D L}$$

where F_D is the drag force acting on the cylinder, $\rho U^2 / 2$ is the incoming stream dynamic head, D is the cylinder diameter, and L is the cylinder length. In all of the calculations the freestream turbulence intensity has been specified as 1%.

Table 7.1. Cylinder drag coefficient versus Re number, result resolution level, and time-dependent or steady-state calculation mode.

Re	Velocity, m/s	C_D , steady state analysis		C_D , time-dependent analysis
		Level 5	Level 7	Level 5
0.1	10^{-5}	57.3	50.5	49.7
10	10^{-3}	2.38	2.31	2.34
10^2	10^{-2}	1.07	1.15	1.36
10^4	1	0.62	1.38	1.06
10^5	0.1	0.72	1.73	1.07
5×10^5	0.5	0.28	0.92	0.24
10^6	1	0.24	0.24	0.24
10^7	10	0.23	0.16	0.22

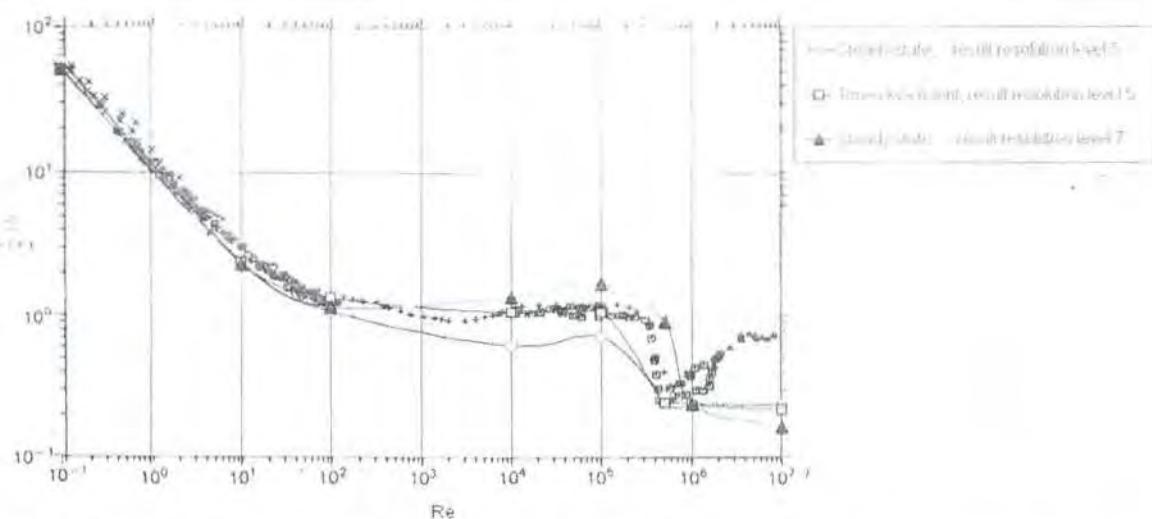


Fig.7.5 The cylinder drag coefficient predicted with FloWorks 2001 in comparison with the experimental data (black signs, Ref.3).

One can see that the time-dependent calculations at result resolution level 5 are fairly close to the experimental data at $Re \leq 10^6$. The steady-state calculations are very close to them at $Re \leq 10^2$ at both the result resolution levels and yield some overprediction or underprediction at $10^2 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5$, depending on the result resolution level.

