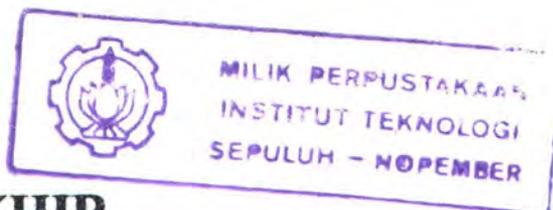


19.667/115/11/2004



TUGAS AKHIR
(KP 1701)

**ANALISA CFD TERHADAP BESARNYA
BLOCKAGE EFECT DI LABORATORIUM
HIDRODINAMIKA FTK ITS**



R5Pe
532.5
Jan
7-1
2003

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	12-9-2003
Terima Dari	H1
No. Agenda Prp.	219122

Oleh :

LUSI JANUARTI
NRP. 4196100017

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2003**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA CFD TERHADAP BESARNYA BLOCKAGE EFFECT DI LABORATORIUM HIDRODINAMIKA FTK ITS

TUGAS AKHIR

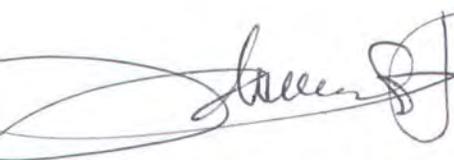
Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Perkapalan

Pada

Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Mengetahui dan Menyetujui
Dosen Pembimbing

Dosen Pembimbing II



Ir. Petrus Adrianto, M.A.Sc
NIP. 130 325 763



Dosen Pembimbing I



Ir. I. K. A. Pria Utama, M.Sc., Ph.D
NIP. 132 007 645

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA CFD TERHADAP BESARNYA BLOCKAGE EFFECT DI
LABORATORIUM HIDRODINAMIKA FTK ITS

TUGAS AKHIR (KP 1701)

Telah mengalami revisi dalam sidang Tugas Akhir

Pada

Jurusan Teknik Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

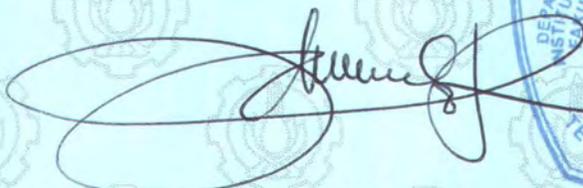
Surabaya

Surabaya, 4 Pebruari 2003

Mengetahui dan Menyetujui,

Dosen Pembimbing II

Dosen Pembimbing I



Ir. Petrus Adrianto, M.A.Sc.
NIP. 130 325 763



Ir. I.K.A. Pria Utama, M.Sc., Ph.D.
NIP. 132 007 645

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi ALLAH SWT Penguasa Alam. Berkat rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan Tugas Akhir. Tugas Akhir ini merupakan sebagian dari upaya penerapan ilmu yang telah didapatkan di Jurusan Teknik Perkapalan ITS Surabaya sebagai prasyarat meraih gelar kesarjanaan.

Laporan ini dibuat berdasarkan hasil percobaan numerik menggunakan perangkat lunak Flotran CFD ANSYS 5.7 untuk menghitung tahanan model dalam tangki.

Terselesainya penulisan Tugas Akhir ini tentu tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. I.K.A. Pria Utama, MSc., PhD., selaku dosen pembimbing I yang memberikan arahan dan bimbingan untuk penulisan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. Petrus Adrianto, MAsc., selaku dosen pembimbing II yang memberikan arahan dan bimbingan untuk penulisan tugas akhir ini.
3. Ir. Djauhar Manfaat, MSc., PhD., selaku Ketua Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS yang telah memberikan ijin penulisan ini.
4. Ir. Petrus Eko Panunggal, PhD., yang telah memberikan dukungan dan arahan dalam untuk penulisan tugas akhir ini.
5. Ir. Paulus Andrianto selaku dosen wali yang telah memberikan bimbingan dan arahan demi kelancaran perkuliahan.
6. Ahmad Nasirudin, ST., yang telah memberikan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
7. Ebu', yang selalu memberikan doa dan semangat untuk pilihan hidupku. You're my greatest blessing I've ever have.
8. Bapak yang banyak memberikan pelajaran dan makna hidup. You're my best spirit to change my world.
9. Mbak Dini dan Elli, atas semangat dan dorongan untuk tetap maju. You're my best spirit to keep me fight.

10. Binti, M'Ratna, Fifien, Lina, Cecep, Didiet. For your supports till the end. I won't forget you.
11. Rina, Romy, Burhan, Ghoffar, Uzhan, Handy, Yitno, Oka, Harteg, Thohir, Yusuf, Fajar, Bram, Jane, and another Petie.
12. Yayang, m'Hen, m'Budi, and Divas. Thank you for my live within, I love you all.
13. Bapak dan Ibu kost-ku, Nyit-nyit, Ima', Winda, Anis, Indah, Kiki, Yessi, Anik, Riza, Ita', Zepti, Noceng, Cepu, Mela dan teman kost lainnya, terima kasih untuk kebersamaan dan dukungannya. Dan pihak-pihak lain yang juga tidak mungkin penulis sebutkan satu-persatu.

Demikian, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan penulis khususnya.

Surabaya, Januari 2003

Penulis

ABSTRACT

Velocity and resistance distribution for a ship moving in restricted water differs from that of unrestricted water. To calculate the resistance of the ship, used a scaly model to approach a real form of ship. Then it towed in the channel by different velocity variation.

Design is adapted to determine a body with different cross section of the channel geosimilarity. The design is approached by three dimensional analysis with the use of Flotran CFD ANSYS 5.7, that apply for fluid dynamics analysis (Computational Fluids Dynamics, CFD)

From the numeric testing that have been done for the towing tank of Hydrodynamic Laboratory (Ocean Engineering Faculty-ITS) it shows that for velocity until 3 m/s works well for blockage ratio smaller than 3.048. But for velocity 4 m/s works well for the blockage ratio smaller than 2.469 %. Added velocity correction for blockage ratio increase 12 % is 3.74 ~ 5.04 %

ABSTRAK

Distribusi kecepatan dan tahanan badan kapal yang bergerak diperairan terbatas berbeda dengan perairan tak terbatas. Untuk menghitung besarnya tahanan kapal, digunakan model dengan skala mendekati bentuk badan kapal sebenarnya. Model tersebut digerakkan didalam tangki percobaan dengan variasi kecepatan yang berbeda.

Pemodelan dilakukan untuk mendekati ukuran model kapal dengan menggunakan variasi ukuran tangki melintang percobaan yang berubah secara geosim. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan pendekatan tiga dimensi menggunakan Flotran CFD ANSYS 5.7 yang merupakan perangkat lunak untuk aplikasi analisa dinamika fluida (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Dari pengujian numerik yang dilakukan besarnya blockage di Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS menunjukkan bahwa untuk kecepatan hingga 3.0 m/dt besarnya blockage memenuhi hingga 3.048 %. Sementara untuk kecepatan 4.0 m/dt ratio blockage yang memenuhi hingga 2.469 %. Koreksi penambahan kecepatan karena penambahan blockage ratio 12 % adalah 3.74 ~ 5.04 %.

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Tujuan Penulisan	3
1.3. Pembatasan Masalah	3
1.4. Metodologi dan Analisa	4
1.5. Sistematika Penulisan	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Studi penentuan Blockage Effect	8
2.1.1 Studi eksperimen	10
2.1.2 Studi secara teori	11
2.2 Teori aliran rata-rata	11
2.3 Metode teori pendekatan	12
2.3.1 Konsep body equivalen dari pandangan efek Blockage	12
2.3.2 Sistem Gelombang	13
2.3.3 Pergerakan benda elips berputar pada tangki	16
2.4 Aplikasi Numerik	19

BAB 3	CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)	
3.1	Persamaan Dasar Dinamika Fluida dalam CFD	21
3.2	Persamaan aliran viscous (Persamaan Navier-Stokes)	23
3.2.1.	Persamaan Kontinuitas	23
3.2.2.	Persamaan Momentum	27
3.3.	ANSYS Flotran CFD 5.7	35
3.4.	Pemodelan model kapal 3D	38
3.5.	Perhitungan Tahanan Pada Model Kapal	43
BAB 4	ANALISA HASIL	
4.1.	Grid Independen	44
4.2.	Data, jumlah iterasi dan waktu running	45
4.3.	Hasil analisa tahanan dan penambahan kecepatan yang terjadi pada model	46
4.4.	Validasi Hasil	67
BAB 5	KESIMPULAN	
5.1.	Kesimpulan	73
5.2.	Saran kedepan	73

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

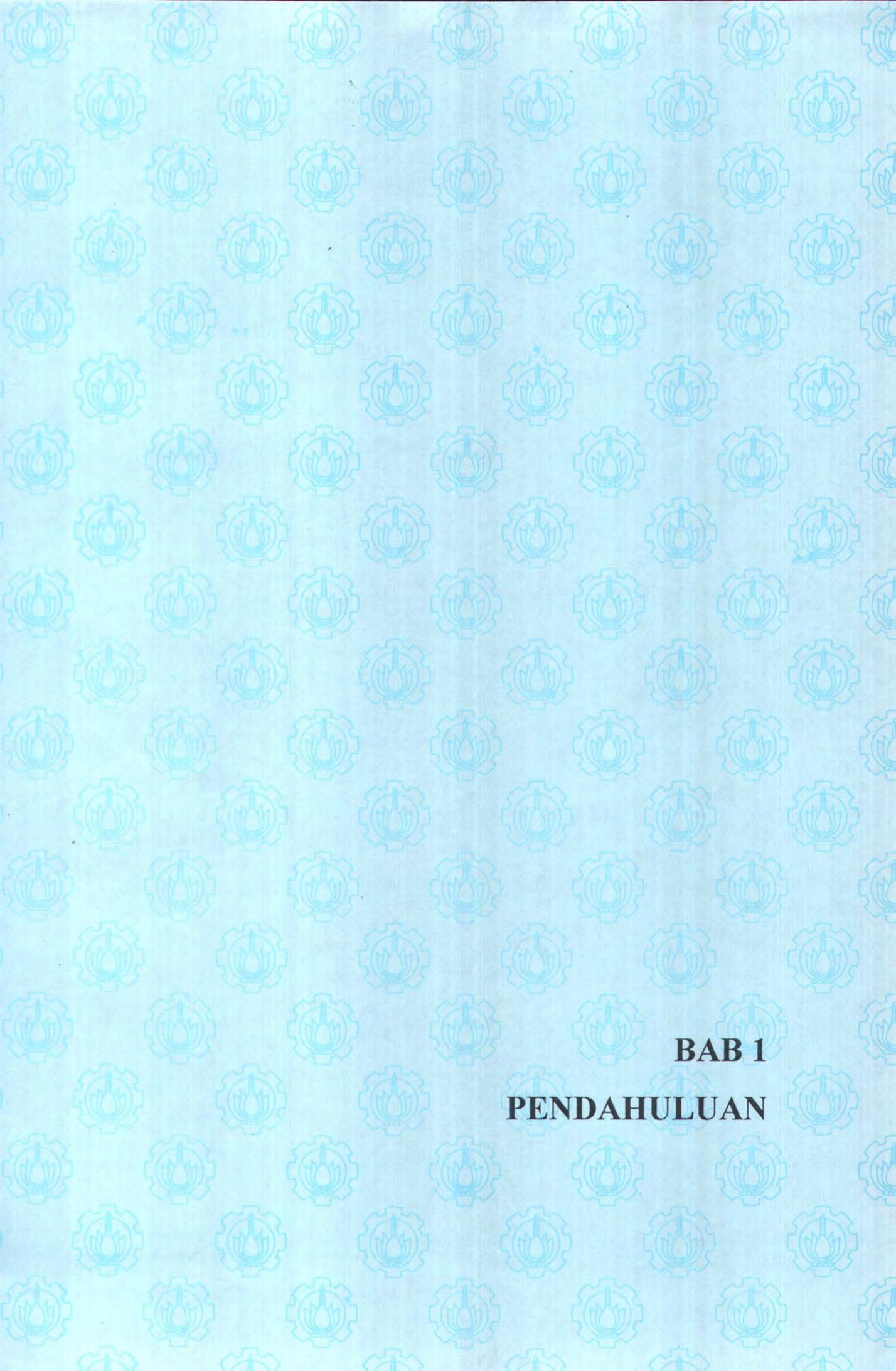
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Gambar sistem pemodelan	4
Gambar 2.1	Kurva koreksi tahanan di tangki percobaan dan diperairan tak terbatas	8
Gambar 2.2	Aliran streamlines	10
Gambar 2.3	Aliran streamlines yang terbatas	10
Gambar 2.4.	Puncak gelombang dari kelompok gelombang Kelvin yang ditimbulkan oleh usikan yang bergerak di P	14
Gambar 2.5	Skema diagram sistem gelombang haluan	15
Gambar 2.6	Sistem koordinat silinder	16
Gambar 3.1.	Model-model aliran	23
Gambar 3.2.	Model elemen kecil tak hingga yang tetap dalam ruang	24
Gambar 3.3.	Gaya-gaya yang bekerja pada sumbu x pada elemen fluida kecil tak hingga yang bergerak	27
Gambar 3.4.	Tegangan geser dan tegangan normal	28
Gambar 3.4	Pemodelan model kapal dan tangki percobaan	39
Gambar 3.5	Gambar pemodelan model kapal	40
Gambar 3.6	Gambar meshing pandangan atas	41
Gambar 3.7	Gambar penampakan elemen disekitar model kapal solution	41
Gambar 4.1	Kurva pengaruh jumlah elemen terhadap koefisien tahanan gesek model kapal	45
Gambar 4.2	Kurva koefisien tahanan gesek $F_n = 0.291$	52
Gambar 4.3	Kurva koefisien tahanan gesek $F_n = 0.583$	56
Gambar 4.4	Kurva koefisien tahanan gesek $F_n = 0.874$	60
Gambar 4.5	Kurva koefisien tahanan gesek $F_n = 1.166$	64
Gambar 4.6	Kurva koefisien tahanan gesek untuk semua bilangan koefisien <i>blockage</i>	66

Gambar 4.7	Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil Perhitungan untuk $m = 2.469 \%$	69
Gambar 4.8	Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil Perhitungan untuk $m = 3.048 \%$	70
Gambar 4.9	Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil Perhitungan untuk $m = 3.417 \%$	71
Gambar 4.10	Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil Perhitungan untuk $m = 3.858 \%$	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel tipe tangki	19
Tabel 2.2.	Koefisien untuk perbandingan lebar dan kedalaman tangki yang berbeda	20
Tabel 3.1.	Geometri pemodelan tangki percobaan	40
Tabel 4.1	Grid Independen	44
Tabel 4.2	Data jumlah iterasi dan waktu running	46
Tabel 4.3	Koefisien gaya gesek untuk $F_n=0.291$	51
Tabel 4.4	Koefisien gaya gesek untuk $F_n=0.583$	55
Tabel 4.5	Koefisien gaya gesek untuk $F_n=0.874$	60
Tabel 4.6	Koefisien gaya gesek untuk $F_n=1.166$	64
Tabel 4.7	Koefisien tahanan gesek model dari masing-masing koefisien <i>blockage</i>	65
Tabel 4.8	Koefisien tipe tangki $w/h = 3/1.8$	68
Tabel 4.9	Tambahan kecepatan untuk $w/h = 3/1.8$	68
Tabel 4.10	Koreksi kecepatan untuk $m = 2.469$	69
Tabel 4.11	Koreksi kecepatan untuk $m = 3.048$	70
Tabel 4.12	Koreksi kecepatan untuk $m = 3.417$	70
Tabel 4.13	Koreksi kecepatan untuk $m = 3.858$	71



BAB 1
PENDAHULUAN

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Percobaan model yang dilakukan di tangki percobaan untuk memprediksi besarnya gaya, tekanan, momen dan beberapa parameter lain yang akan digunakan pada benda sebenarnya. Untuk mendapatkan karakteristik yang sama maka model kapal tersebut dibuat menyerupai model sebenarnya dengan skala yang lebih kecil, kemudian hasil yang didapatkan diestimasi.

Metode perhitungan, akurasi peralatan pengukuran dan faktor perbedaan aliran menyebabkan hasil yang dimiliki memiliki sejumlah error sehingga memerlukan beberapa koreksi terhadap hasil yang didapatkan. Untuk memenuhi akurasi/ketepatan nilai koreksi itulah seringkali percobaan dilakukan dengan menggunakan model dengan skala yang besar untuk memenuhi angka Reynolds.

Besar model maksimum yang bisa dipakai akan dibatasi oleh ukuran tangki yang dibatasi dinding atas dan bawah. Kondisi batas atau dinding yang membatasi aliran disekitar model menghasilkan nilai pengukuran dari parameter-parameter tersebut akan berbeda dengan kondisi di udara bebas. Hal yang mungkin dilakukan adalah membatasi ukuran model maksimum yang bisa dipakai sehingga kondisi pengetesan menyerupai kondisi perairan bebas atau yang diinginkan. Ukuran ini akan dipengaruhi oleh ukuran tangki percobaan. Perbandingan antara luasan melintang model terhadap

luasan melintang tangki disebut blockage. Sedangkan efek yang ditimbulkannya disebut blockage effect.

Blockage ini dapat didefinisikan sebagai rasio [Durgun & Kafali,1991]

$$m = \frac{A_b}{A_c} \quad (1.1)$$

dimana A_b dan A_c luasan potongan melintang model dan tangki percobaan.

Salah satu efek yang mungkin ditimbulkan oleh blockage ini adalah adanya penambahan kecepatan disekitar model. Studi secara teori dan eksperimen seringkali digunakan untuk menggambarkan bertambahnya kecepatan atau rasio bertambahnya kecepatan yang timbul akibat dari blockage effect. Disekitar body yang bergerak dalam tangki dengan kecepatan U , sebuah aliran terjadi menyerupai aliran yang mengelilingi body yang bergerak di perairan tak terbatas dengan kecepatan $U + \Delta u$.

Salah satu cara untuk mengukur pengaruh tersebut adalah menghitung besarnya tahanan yang diterima model. Karena jika ada penambahan tahanan pada kecepatan yang sama berarti ada penambahan kecepatan yang terjadi disekitar model kapal. Untuk mencari besarnya tahanan dapat dilakukan dengan melakukan percobaan di Laboratorium Hidrodinamika ITS atau melakukan analisa secara numerik. CFD (computational fluid dynamics) menawarkan teknik baru untuk menyelidiki persoalan aliran fluida yang dalam hal ini juga bisa digunakan sebagai salah satu alternatif untuk menghitung tahanan. Selain lebih murah jika dibandingkan dengan eksperimen, CFD mampu menganalisa sistem yang kompleks dimana relatif



sulit jika dilakukan dengan teknik eksperimen dengan hasil yang lengkap dalam jumlah yang dapat dikatakan tidak terbatas. [Durgun & Kafali,1991]

Dengan menggunakan data-data yang ada di laboratorium Hidrodinamika maka dapat dilakukan pendekatan nilai hasil numerik dengan terhadap kondisi percobaan yang seharusnya dilakukan.

1.2. Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan ini adalah:

1. Untuk mengetahui besarnya pengaruh perbedaan perairan terhadap besarnya kecepatan kapal.
2. Untuk mengetahui besarnya penambahan kecepatan atau rasio bertambahnya kecepatan yang timbul akibat dari Blockage Effect.

1.3. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah diberikan untuk mempermudah analisa dimana pada penulisan ini untuk:

- ◆ Pemodelan CFD 3D suatu model kapal yang digunakan, menggunakan ukuran model yang mendekati satu ukuran model kapal di Laboratorium Hidrodinamika ITS.
- ◆ Jumlah pemodelan model kapal 1 dengan perbedaan 3 ukuran tangki yang dibuat berubah secara geosim dari ukuran yang sebenarnya dan satu tangki bantu.
- ◆ Penambahan tangki bantu dilakukan untuk memperkecil domain hasil blockage yang dicurigai terjadi.

- ◆ Kecepatan dianggap konstan dan uniform pada inlet dengan variasi kecepatan 1.0 m/dt hingga 4 m/dt dengan interval 1.
- ◆ Domain aliran yang digunakan dalam simulasi adalah aliran eksternal.
- ◆ Perangkat lunak yang dipergunakan untuk Computational Fluid Dynamics adalah ANSYS Flotran CFD release 5.7.
- ◆ Tahanan model yang diambil adalah tahanan total model yang tercelup dibawah permukaan air.

1.4. Metodologi dan Analisa

Metode yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini adalah:

a. Identifikasi masalah.

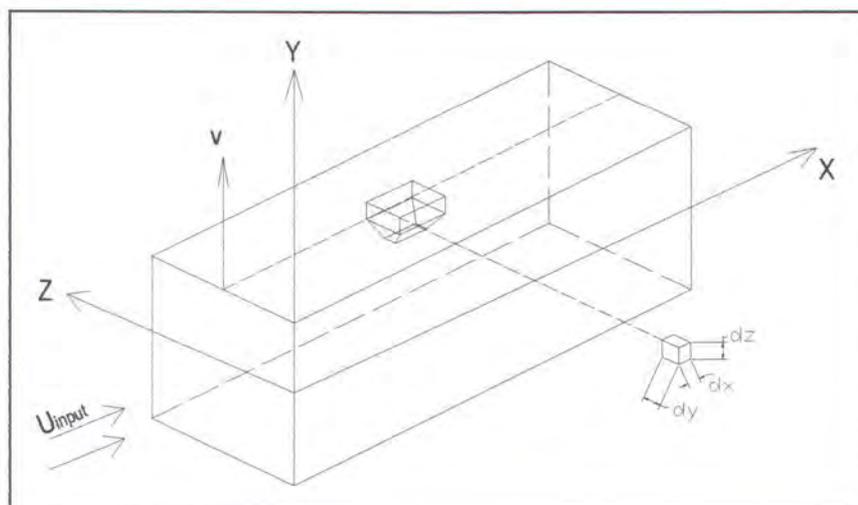
Menentukan masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini, yaitu menganalisa besarnya blockage effect di Laboratorium Hidrodinamika ITS dengan menggunakan teknik CFD

b. Studi Literatur

Penulisan tugas akhir berdasarkan literatur-literatur yang sesuai dengan permasalahan yang ada.

c. Solusi dengan CFD

✓ Pemodelan. Dilakukan untuk mendapatkan model yang sesuai dengan kondisi benda yang ingin diketahui hasil analisa proses aliran yang terjadi. Model dikondisikan terbenam seluruhnya (bentuk tidak dipengaruhi oleh permukaan bebas).



Gambar 1.1 Gambar sistem pemodelan

- ✓ Meshing. Proses pembagian model menjadi beberapa elemen untuk memperoleh acuan nodes yang terbebani oleh aliran. Pemilihan elemen menggunakan prinsip perbandingan geometri dan *spacing ratio* yang tetap untuk mendapatkan kerapatan yang sama untuk setiap pemodelan yang berbeda.
- ✓ Flotran Set-up. Melakukan pengesetan karakteristik fluida di tangki percobaan sebenarnya maupun tambahan output yang diinginkan, seperti shear stress, pressure coefficient, stream, flux dan lainnya. Pada bagian ini pula ditentukan jumlah iterasi yang akan dilakukan.
- ✓ Loads. Pemberian beban untuk masing-masing kondisi batas, dalam hal ini kecepatan di masing-masing dinding tangki dengan model kapal dan tekanan di output aliran.

Untuk kecepatan input = V_i = kecepatan variasi 1 ~ 4 m/dt

Untuk tekanan output = $P_o = 0$

Untuk kecepatan di dinding samping dan atas maupun permukaan model kapal = 0 m/dt

- ✓ Run. Model yang sudah di set tersebut di run untuk mendapatkan hasil yang diinginkan (data numerik yang dihasilkan)

d. Solusi Matematis dengan CFD

- Menghitung besarnya koefisien tahanan dari masing-masing kondisi.
- Membuat kurva hubungan antara koefisien tahanan dan angka Froude.
- Membuat kurva konversi masing-masing angka perbandingan blockage dan koefisien tahanan model.
- Menganalisa kurva yang terjadi dari hubungan tersebut diatas.

- e. Membandingkan hasil dengan formula yang ada. Hasil yang didapat dibandingkan dengan hasil yang didapatkan dari perhitungan menggunakan pendekatan formula yang ada. Pendekatan ini dilakukan mengingat percobaan untuk model yang sebenarnya belum dilakukan.

1.5 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Berisi penjelasan mengenai latar belakang permasalahan, tujuan, pembatasan masalah dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori dasar yang berkenaan dengan permasalahan yang dibahas serta metode penyelesaian yang dipakai

BAB III CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

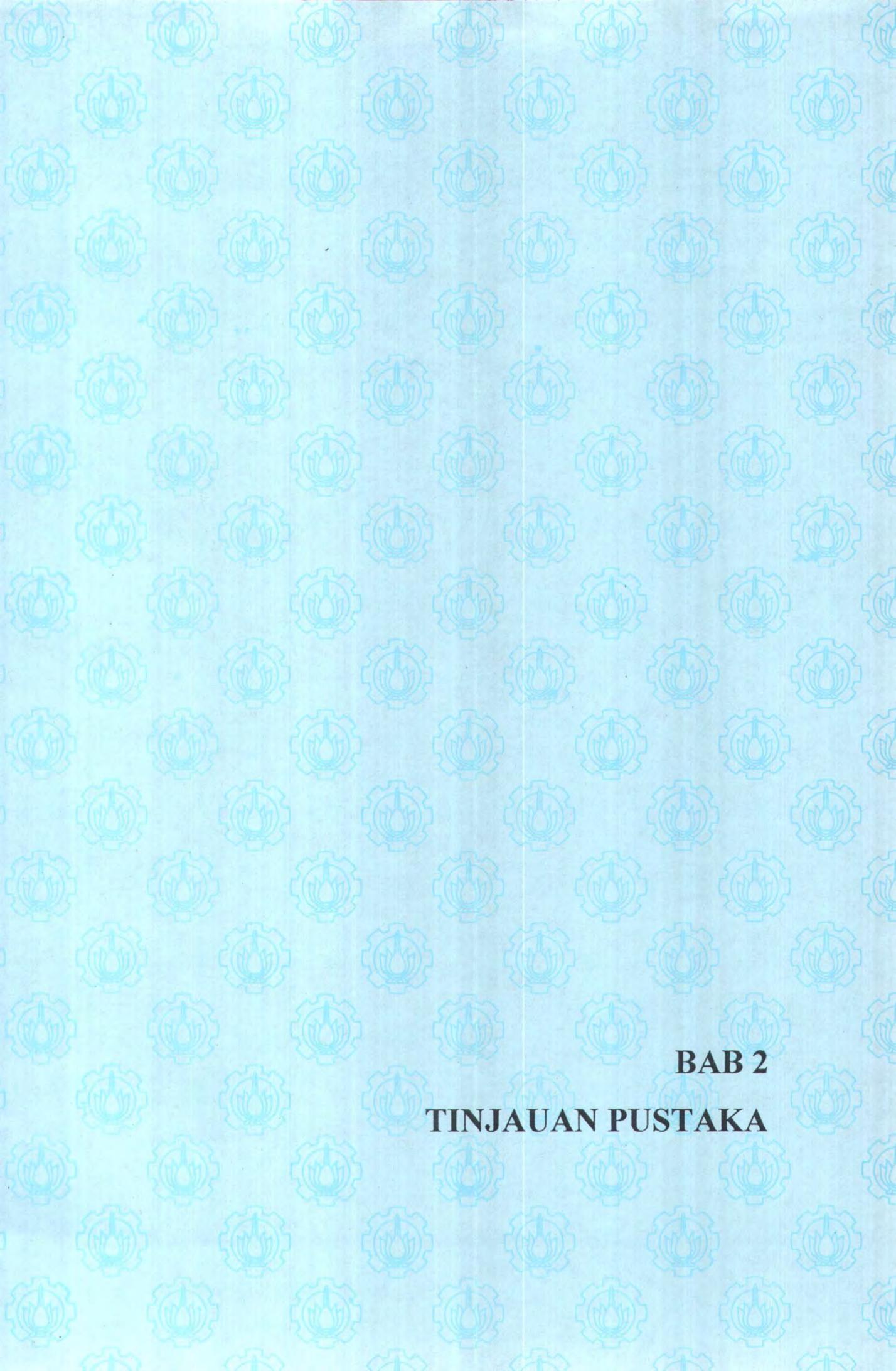
Menjelaskan teori dasar dalam CFD, bagian-bagian Flotran CFD ANSYS 5.7 dan pemodelan 3D model kapal.

BAB IV ANALISA HASIL

Berisi data-data eksperimen dan hasil yang didapatkan dari simulasi CFD beserta analisisnya.

BAB V PENUTUP

Berisi kesimpulan dari penelitian dan saran-saran untuk penelitian selanjutnya.



BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

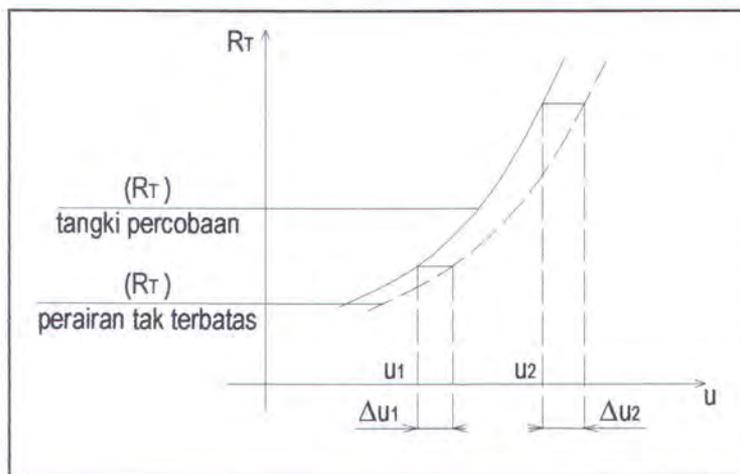
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Studi penentuan Blockage Effect

Studi secara teori dan eksperimen seringkali digunakan untuk menggambarkan bertambahnya kecepatan atau rasio bertambahnya kecepatan yang timbul akibat dari Blockage Effect. Disekitar body yang bergerak dalam tangki percobaan dengan kecepatan U , sebuah aliran terjadi menyerupai aliran yang mengelilingi body yang bergerak di perairan tak terbatas dengan kecepatan $U + \Delta u$. [Durgun & Kafali, 1991]

Jika kecepatan bertambah Δu dapat digambarkan, tahanan dalam tangki percobaan pada kecepatan U bisa diambil dengan pendekatan seperti pada tahanan di perairan tak terbatas dengan kecepatan $U + \Delta u$ (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Kurva koreksi tahanan di tangki percobaan dan diperairan tak terbatas, [Durgun & Kafali, 1991]

Sehingga, jika kecepatan bertambah sebesar Δu dapat dihasilkan dengan menggunakan suatu metode koreksi blockage, variasi tahanan di perairan tak terbatas dapat dihasilkan dari pengetesan tanki percobaan.

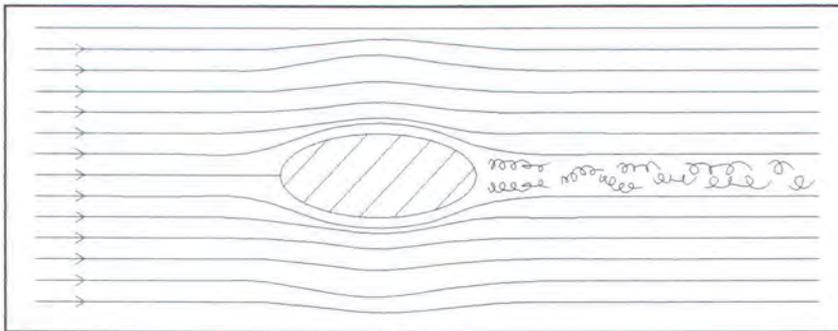
Metode koreksi blockage diperlukan untuk satu dari tujuan berikut:

1. Untuk koreksi data tangki sebenarnya (atau untuk memprediksi koreksi yang telah ada).
2. Untuk koreksi ukuran tangki yang belum dibuat.
3. Untuk memperkirakan besarnya gaya, tekanan dan tahanan yang terjadi.

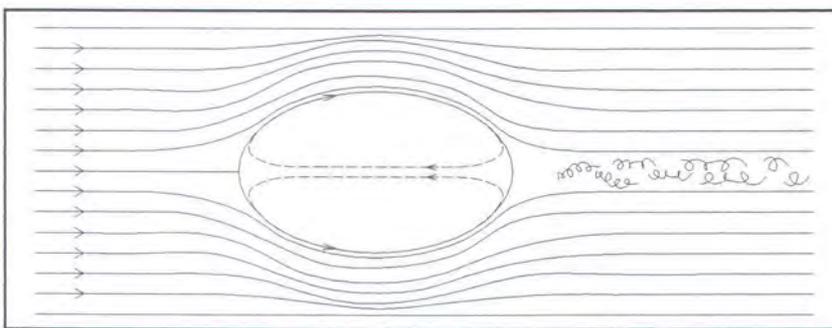
Efek blockage dapat dihindari hanya jika model yang dipakai sangat kecil dibandingkan dengan besarnya tangki. (bisa dikatakan besarnya blockage 1%).

Dalam studi teknik, ukuran dari kebutuhan model yang besar untuk memenuhi angka Reynolds, sehingga memenuhi akurasi/ketepatan nilai koreksi. Konsekuensinya blockage ratio yang dipakai umumnya 5% atau bahkan 10 hingga 15 %, membutuhkan koreksi yang cukup besar. [ESDU 80024, Nopember 1980]

Secara umum aliran yang melalui suatu benda dapat digambarkan sebagai aliran streamlines (Gambar 2.2). Sedangkan untuk aliran yang dibatasi oleh dinding yang dekat digambarkan sebagai aliran yang terbatas. Dalam hal ini bentuk aliran yang seharusnya stremlines daerah dekat dinding tangki akan memantul kembali ke arah model yang bergerak seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Aliran streamlines



Gambar 2.3 Aliran streamlines yang terbatas

2.1.1 Studi eksperimen

Percobaan yang dilakukan Comstock dan Hancock (1942) adalah dengan merubah lebar dan kedalaman tangki percobaan dan melakukan percobaan model dalam tangki percobaan tersebut. Hughes (1957, 1961) dan Scott (1966a,b, 1970, 1976) melakukan penarikan beberapa model tetap, didalam tangki percobaan yang berbeda. Telfer (1953) mempunyai model-model pengelasan dengan bentuk yang mirip, tetapi ukuran yang berbeda, dengan tangki percobaan tangki percobaan yang sama. Mannen dan Lammeren (1956) dan Artjuskov (1968) menarik tipe model yang sama secara bersamaan. Tamura (1972) menggunakan sebuah tangki percobaan dengan ukuran potongan melintang tangki yang berbeda-beda. Percobaan yang dilakukan Durgun dan Kafali [1991] yaitu mengubah ukuran tangki percobaan dengan pengesetan sekat kayu.

2.1.2. Studi secara teori

Studi secara teori terhadap efek blockage dapat dikelompokkan menjadi (i) teori aliran balik, (ii) teori aliran rata-rata dan (iii) teori aliran potensial.

Teori aliran balik pertamakali dikembangkan untuk terowongan angin oleh Lock (1929) dan kemudian diperluas pada tangki percobaan model kapal oleh Lamb (1929) dan Young dan Squire (1945). Tamura (1972) mengerjakan pada masalah yang serupa.

2.2. Teori aliran rata-rata

Pada persamaan Bernoulli, suatu pertambahan kecepatan dihasilkan oleh model kapal yang digerakkan dipermukaan bebas yaitu sebesar :

$$\Delta u = \frac{U * m}{1 - m - F_h^2} \quad (2.1)$$

dimana m = blockage ratio dan

$$F_h = \frac{U}{\sqrt{gh}} = \text{depth Froude Number} \quad (2.2)$$

metode ini disebut teori aliran rata-rata

Dalam teori potensial, teori ini mengasumsikan bahwa fluida adalah inviscid, incompressible yang mana pergerakannya irrotational. Sehingga suatu solusi dilihat pada persamaan Laplace $\nabla^2\phi=0$, dengan beberapa kondisi batas.

Metode penyelesaian yang seringkali dipakai adalah teori lapisan tipis, loncatan potensial, pendekatan body adalah slender dan metode elemen hingga. Pada aproksimasi lapisan tipis yang diaplikasikan oleh Havelock (1943), Wigley (1949), Lunde (1951), Kirsch (1966) dan Kostyukov (1968), bentuk kapal 3D

diambil seolah menyerupai plat tipis vertikal, efek dari dinding tangki percobaan diselidiki dengan metode image. Newman (1977) dan Bai (1979) mengembangkan metode loncatan potensial yang mana dari penunjukan yang menyerupai teori aliran rata-rata yang telah disebutkan. Metode elemen hingga juga diaplikasikan pada masalah permukaan bebas, seperti yang dilakukan Mei and Chen (1976) dan Bai (1978).

Beberapa metode yang disebutkan diatas tidak dapat diaplikasikan pada percobaan praktek model kapal, karena akan membutuhkan waktu *running* komputer yang lama.

Tuck (1964, 1966, 1967) mengaplikasikan pendekatan slender body (badan kapal menyerupai pelat tipis) pada perpindahan body di perairan tak terbatas, perairan dangkal dan tangki percobaan.

Pada penelitian ini pendekatan slender body didekatkan pada bentuk persegi enam diaplikasikan pada masalah blockage effect dan formula koreksi kecepatan pada tangki percobaan dengan perbedaan rasio lebar-kedalaman, akan didapatkan.

2.3 Metode teori pendekatan

2.3.1 Konsep *body equivalen* dari pandangan efek *blockage*.

Jika sebuah model 3D dengan bentuk yang berbeda pada tangki percobaan akan dibutuhkan waktu yang lama untuk pengesetan komputer terhadap model-model tersebut untuk menggambarkan naiknya kecepatan dengan pengaruh terhadap perairan tak terbatas.

Konsep ini menyetengahkan metode untuk blockage effect, dimana sebuah body yang ekuivalen (cocok) dengan model kapal terhadap putarannya dimasukkan perhitungan. Sebagai pendekatan bentuk-bentuk yang besarnya blokage ratio dan bilangan Froude-nya sama dianggap ekuivalen dalam pandangan blockage effect.

Pada penelitian yang dilakukan Durgun dan Kafali [1991], benda ellips yang berputar diambil seolah body yang ekuivalen dan gerakannya dibawah permukaan bebas dalam tangki percobaan dipelajari sebagai pendekatan slender body.

Evaluasi numerik pada integral yang timbul pada gambaran kecepatan yang diberikan pada bagian 2.2. dan 2.3. menggunakan metode perhitungan yang diaplikasikan untuk gerakan elips yang berputar dalam tangki percobaan yang beragam. Kemudian nilai kecepatan dihasilkan dengan menggunakan analisa perhitungan secara numerik. Kemudian hasilnya diaplikasikan kedalam bentuk kurva dengan metode kuadrat terkecil. Formula kenaikan kecepatan yang berbeda pada masing-masing channel dengan ratio lebar-kedalaman yang telah dibuat. Metode ini kenaikan kecepatan diberikan sebagai fungsi ratio blockage dan besarnya bilangan Froude.

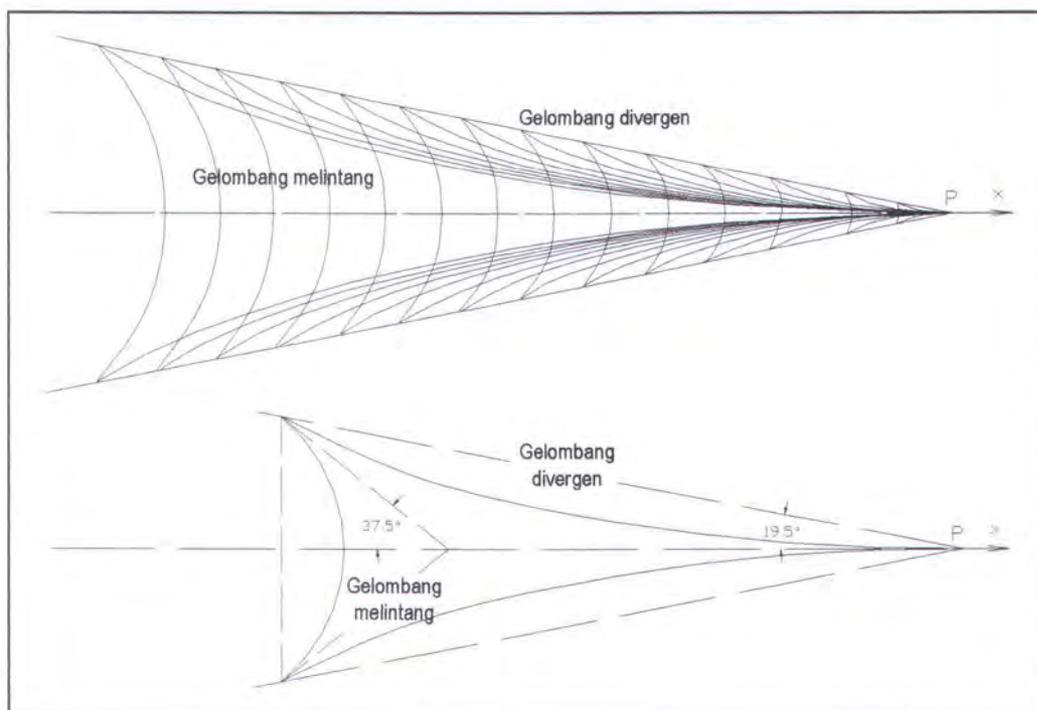
2.3.2 Sistem Gelombang

Bila suatu benda digerakkan dalam fluida ideal maka kecepatan partikel didalam fluida, titik-titik didalamnya akan berubah. Menurut persamaan Bernoulli (persamaan 2.3), hal ini berarti bahwa tekanan didalam fluida dari tiap titik ikut berubah. Karena itu, benda yang bergerak horizontal didaerah berpemukaan bebas akan menimbulkan gangguan terhadap permukaan tersebut.

Variasi tekanan yang timbul diwujudkan sebagai perubahan tinggi permukaan ini bergerak dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan benda itu sendiri.

$$p - p_0 = \frac{1}{2} \rho (U_0^2 - U_s^2) \quad (2.3)$$

Sekitar tahun 1900 Lord Kelvin melakukan penelitian mengenai terjadinya gelombang. Ia mengamati sebuah titik tekanan tunggal yang bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan air. Gerakan titik tersebut menimbulkan sejumlah gelombang yang bergabung membentuk suatu pola yang khas. Pola ini terdiri dari sistem gelombang melintang dan sistem gelombang divergen yang menyebar dari titik tersebut. Gambar 2.4 menunjukkan pola gelombang tersebut.

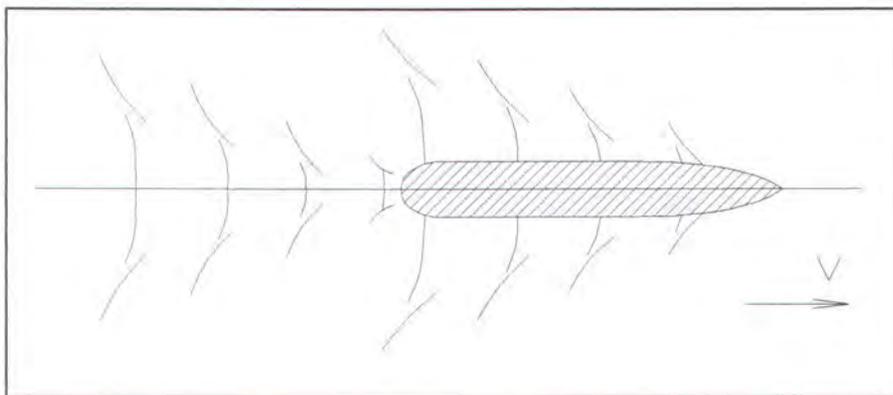


Gambar 2.4. Puncak gelombang dari kelompok gelombang Kelvin yang ditimbulkan oleh usikan yang bergerak di P

Seluruh bagian pola itu berada diantara dua garis lurus yang berawal dari titik tersebut dan masing-masing, pada sisi yang berbeda, membentuk sudut 19.5°

dengan garis gerakan. Jarak antara satu gelombang melintang berikutnya sangat tergantung pada kecepatan gerakan titik itu sendiri.

Pola gelombang Kelvin memberikan banyak gambaran dan kejelasan mengenai ciri khas kapal sistem gelombang. Di depan kapal ada daerah yang bertekanan tinggi, sehingga disitu timbul gelombang haluan yang cukup meyolok. Gelombang ini merupakan bagian dari sistem gelombang melintang dan gelombang divergen. Didekat lambung, garis puncak (crest line) gelombang melintang mempunyai kedudukan tegak lurus arah gerakan kapal. Begitu mendekati sistem gelombang divergen garis puncak tersebut berbelok balik dan akhirnya lenyap didalam sistem divergen. Pada bahu lambung dan pada buritan juga terbentuk sistem gelombang. Sketsa pola gelombang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema diagram sistem gelombang haluan

Sistem gelombang buritan sering tidak tampak dengan jelas. Ini disebabkan karena adanya usikan dari buritan itu sendiri. Sebagaimana disebutkan sebelumnya, secara keseluruhan pola gelombang tersebut bergerak mengikuti kapal. Ini berarti pada kecepatan yang tetap, profil sistem gelombang melintang disepanjang kapal akan selalu tetap.

2.3.3 Pergerakan benda elips berputar pada tangki

Jika sebuah slender body bergerak dengan kecepatan U pada channel, komponen kecepatan $u(x)$ sebagai berikut:

(Tuck (1967) dan Durgun (1983))

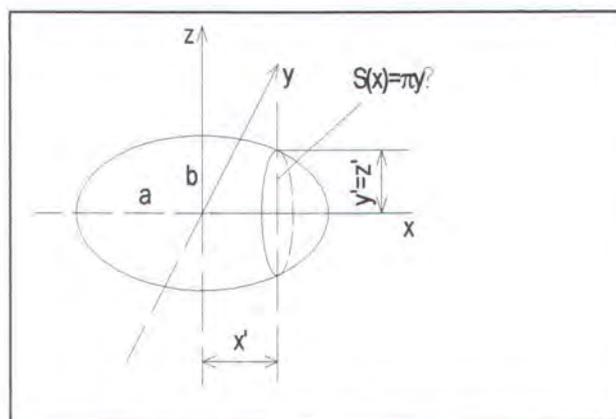
$$u(x) = \frac{-U}{4\pi h \sqrt{1 - F_h^2}} \int_{-x}^x e^{-ikx} |k| \cdot S^*(k) \cdot \coth\left(\frac{1}{2} W \sqrt{1 - F_h^2} |k|\right) \cdot dk \quad (2.4)$$

dalam hal ini transformasi luasan melintang body didefinisikan sbb:

$$S^*(k) = \int_L S(x) e^{ikx} dx \quad (2.5)$$

dimana W, h, F_h adalah lebar tangki percobaan, kedalaman tangki percobaan dan kedalaman bilangan froude. Komponen kecepatan di mid-section diaproksimasikan sama dengan naiknya kecepatan Δu .

Kita ambil sistem koordinat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Sistem koordinat silinder

Luasan melintang elips berdasarkan fungsi x dapat dituliskan

$$S^*(k) = \pi y^2 = \pi b^2 - \frac{\pi b^2}{a^2} x^2 \quad (2.6)$$

Sehingga, kenaikan kecepatan pada potongan melintang

$$u(0) = \frac{-U}{4\pi h \sqrt{1-F_h^2}} \int_{-x}^{+x} |k| \coth\left(\frac{1}{2} w \sqrt{1-F_h^2} |k|\right) S^*(k) \cdot dk \quad (2.7)$$

$$S^*(k) = \int_{x=-a}^a \left(\pi b^2 - \frac{\pi b^2}{a^2} x^2 \right) e^{ikx} dx \quad (2.8)$$

Besarnya kecepatan sebenarnya dan bagian sebenarnya dari integral diatas diambil:

$$S^*(k) = \int_{x=-a}^a \left(\pi b^2 - \frac{\pi b^2}{a^2} x^2 \right) \cos kx dx \quad (2.9)$$

$$S^*(k) = -\frac{4\pi b^2}{a} \frac{\cos ka}{k^2} + \frac{4\pi b^2}{a^2} \frac{\sin ka}{k^3} \quad (2.10)$$

$$u(0) = \frac{-2Ub^2}{h\sqrt{1-F_h^2}} \left\{ -\frac{1}{a} \int_0^x \frac{\cos ak}{k} \coth\left(\frac{1}{2} w \sqrt{1-F_h^2} k\right) dk + \frac{1}{a^2} \int_0^x \frac{\sin ak}{k} \coth\left(\frac{1}{2} w \sqrt{1-F_h^2} k\right) dk \right\}$$

(2.11)

integral pertama bisa didapatkan dari table integral dan didapatkan:

$$\int_0^x \frac{\cos ak}{k} \coth\left(\frac{1}{2} w \sqrt{1-F_h^2} k\right) dk = -\ln\left(2 \cdot \sinh \frac{a\pi}{2\beta}\right) = I(a) \longrightarrow \beta = \frac{1}{2} w \sqrt{1-F_h^2} \quad (2.12)$$

dan integral kedua diperoleh

$$\int_0^x \frac{\sin ak}{k} \coth(k\beta) dk = J(a) \quad (2.13)$$

$$J'(a) = I(a) \quad (2.14)$$

$$J(a) = \int_0^a I(a) da = \int_0^a I(x) dx = - \int_0^a \ln \left(2 \sinh \frac{\pi x}{2\beta} \right) dx \quad (2.15)$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2\beta} = \frac{\pi}{w\sqrt{1-F_h^2}} \quad (2.16)$$

$$J(a) = - \int_0^a \ln(2 \sinh \lambda x) dx = - \int_0^a \ln(e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}) dx \quad (2.17)$$

Jika ditransformasikan

$$e^{\lambda x} - e^{-\lambda x} = e^u \quad (2.18)$$

dimasukkan ke persamaan terakhir

$$J(a) = - \int_{-\infty}^{\ln(e^{2a} - e^{-2a})} \frac{u}{\lambda(4 + e^{2u})^{\frac{1}{2}}} e^u du \quad (2.19)$$

integral ini akan mengecil karena u mendekati $-\infty$. Sehingga persamaan sebelumnya dapat dengan mudah dihitung dengan menggunakan aturan Simpsons, dan batas bawah integral diambil <-20 .

Dengan menggunakan hasil perhitungan tiga persamaan terakhir, persamaan yang dihasilkan:

$$u(0) = \frac{-2Ub^2}{h\sqrt{1-F_h^2}} \left\{ \frac{1}{a} \ln(2 \sinh a\lambda) - \frac{1}{a^2} \frac{1}{\lambda} I_2(a) \right\} \quad (2.20)$$

$$\lambda = \frac{\pi}{w\sqrt{1-F_h^2}} \quad (2.21)$$

$$I_2(a) = \int_{-\infty}^{\ln(e^{2a}-e^{-2a})} \frac{u}{\lambda(4+e^{2u})^{\frac{1}{2}}} e^u du \quad (2.22)$$

a,b merupakan fungsi elipsoid

w,h merupakan ukuran tangki percobaan

U merupakan kecepatan elipsoid

2.4. Aplikasi Numerik

Untuk gerakan suatu ellips di tangki percobaan, naiknya kecepatan pada potongan melintang tengah $u(0)$ sebagaimana disebutkan di persamaan 2.20, Durgun & Kafali [1991] menyajikan suatu program perhitungan berdasarkan fungsi pendekatan perbandingan ukuran lebar dan kedalaman tangki (w/h) dimana w merupakan lebar dan h adalah kedalaman tangki. Perbandingan ukuran w/h yang disajikan adalah sebagai berikut:

tipe tangki	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w/h	4	3	2	1.5	1	1/1.25	1/1.5	1/1.75	1/2

Tabel 2.1 Tabel tipe tangki

Dengan menggunakan perhitungan secara numerik dan pendekatan persamaan kuadrat, persamaan naiknya kecepatan untuk tangki percobaan yang berbeda dengan perbandingan lebar dan kedalamannya diperoleh bentuk.

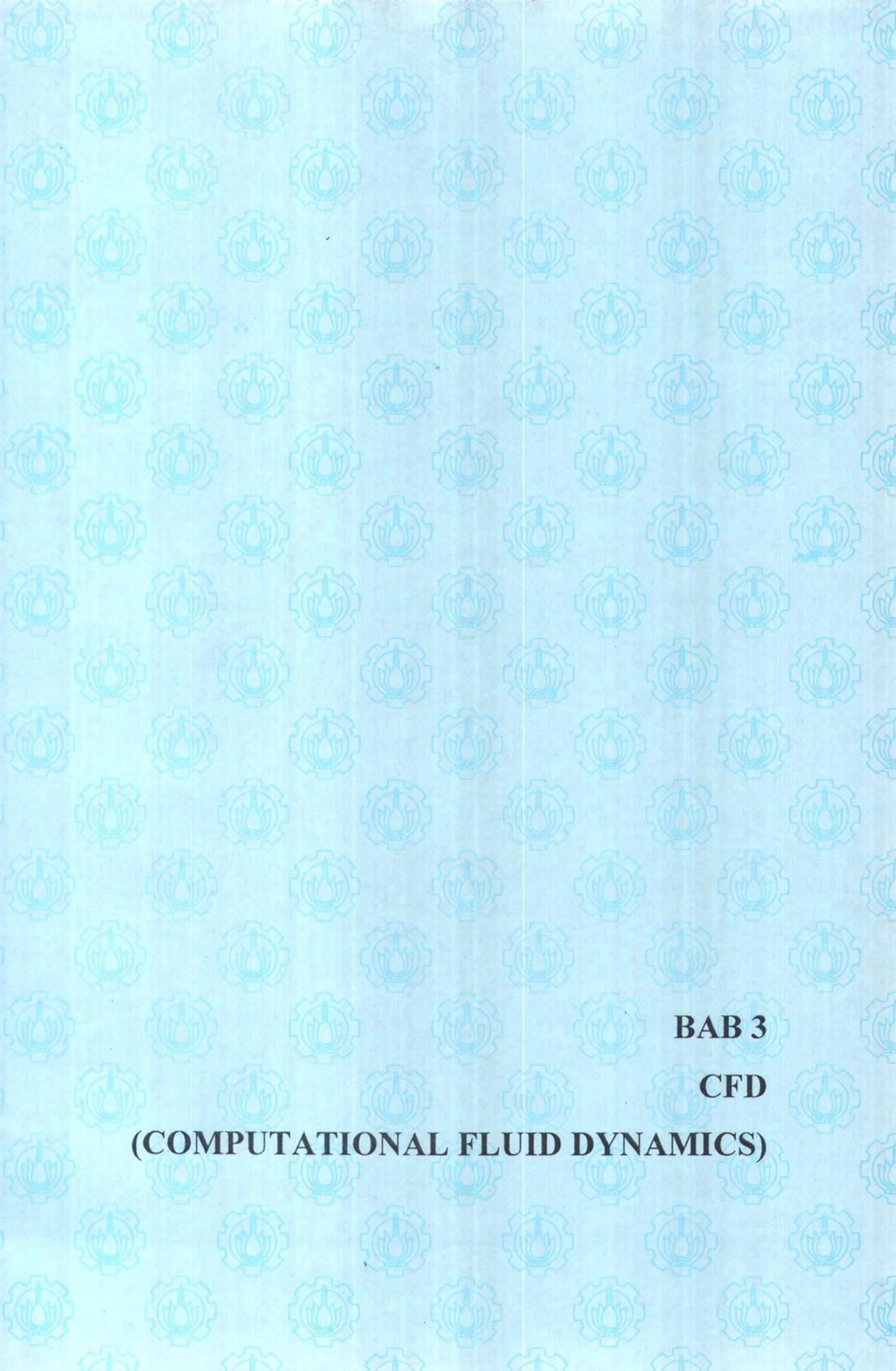
$$\Delta u = \frac{Um}{\sqrt{1-Fh^2}} \left[(A_1 + B_1 m + C_1 m^2) + (A_2 + B_2 m + C_2 m^2) Fh + (A_3 + B_3 m + C_3 m^2) Fh^2 \right] \quad (2.23)$$

Pada persamaan 2.23 naiknya kecepatan sebagai fungsi dari perbandingan blockage dan angka Froude fungsi kedalaman tangki (h). Perhitungan koefisien A, B dan C diberikan dalam Tabel 2.2.

Persamaan 2.23 dapat juga diaplikasikan pada model kapal berdasarkan konsep *equivalen body* seperti yang disebutkan diatas. Jika diketahui harga perbandingan blockage $m = Ab/Am$ dan angka Froude kedalaman untuk suatu model kapal, naiknya kecepatan di tangki percobaan dengan ukuran $w \times h$ bisa didapatkan dengan persamaan 2.23. Sementara besarnya kecepatan diperairan tak terbatas didapatkan dari tahanan di tangki percobaan, dengan mengacu pada metode-metode yang ada.

Channel type w/h	A ₁	B ₁	C ₁	A ₂	B ₂	C ₂	A ₃	B ₃	C ₃
4/1	4.543	-115.584	1690.899	-1.831	137.803	-3738.797	1.571	-95.757	3080.035
3/1	3.585	-70.403	868.575	-1.772	97.329	-2132.879	1.530	-61.984	1717.972
2/1	2.641	-34.751	337.215	-1.728	59.010	-932.304	1.618	-34.592	736.631
1.5/1	2.224	-21.796	175.894	-1.798	43.634	-522.583	1.804	-25.653	411.633
1/1	1.866	-11.948	72.361	-1.881	29.299	-233.061	2.054	-18.248	185.479
1/1.25	1.748	-8.846	44.988	-1.894	23.414	-149.163	2.133	-14.941	119.357
1/1.5	1.673	-6.926	30.425	-1.865	19.097	-102.525	2.148	-12.281	82.260
1/1.75	1.658	-5.999	22.643	-1.961	17.239	-77.265	2.258	-11.398	62.286
1/2	1.622	-5.067	17.056	-1.927	14.771	-58.547	2.242	-9.747	47.204

Tabel 2.2. Koefisien untuk perbandingan lebar dan kedalaman tangki yang berbeda



BAB 3
CFD
(COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

BAB 3

CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan pendekatan ilmu sains dalam penyelesaian numerik permasalahan dinamika fluida. CFD adalah pendekatan ketiga dalam studi dan pengembangan bidang dinamika fluida selain pendekatan teori dan eksperimen murni.

Pada abad ketujuh belas, dasar-dasar dinamika fluida eksperimental diperkenalkan di Inggris dan Perancis. Pada abad kedelapan belas dan kesembilan belas memperlihatkan pengembangan dinamika fluida secara teoritis. Kemudian sepanjang abad kedua puluh studi dan praktik dalam dinamika fluida melibatkan penggunaan teori murni disisi lainnya. Hal ini terjadi hingga awal tahun 1960-an. Pada akhirnya di tahun 1970 dikembangkan CFD dengan berbagai keterbatasan. Namun seiring dengan perkembangan, CFD modern bisa diterapkan dalam semua disiplin ilmu yang berhubungan dengan analisa aliran fluida.

Pada saat ini, terdapat banyak perangkat lunak CFD yang dapat digunakan dalam analisa fluida diantaranya FLUENT, CFX, Ansys Flotran CFD dan lainnya. Pada percobaan ini digunakan software ANSYS CFD release 5.7 dengan salah satu kelebihanannya dapat menghitung integral permukaan (surface integral).

3.1 Persamaan Dasar Dinamika Fluida dalam CFD

Pada dasarnya semua jenis CFD didasarkan pada persamaan dasar (governing equations) dinamika fluida, yaitu persamaan kontinuitas,

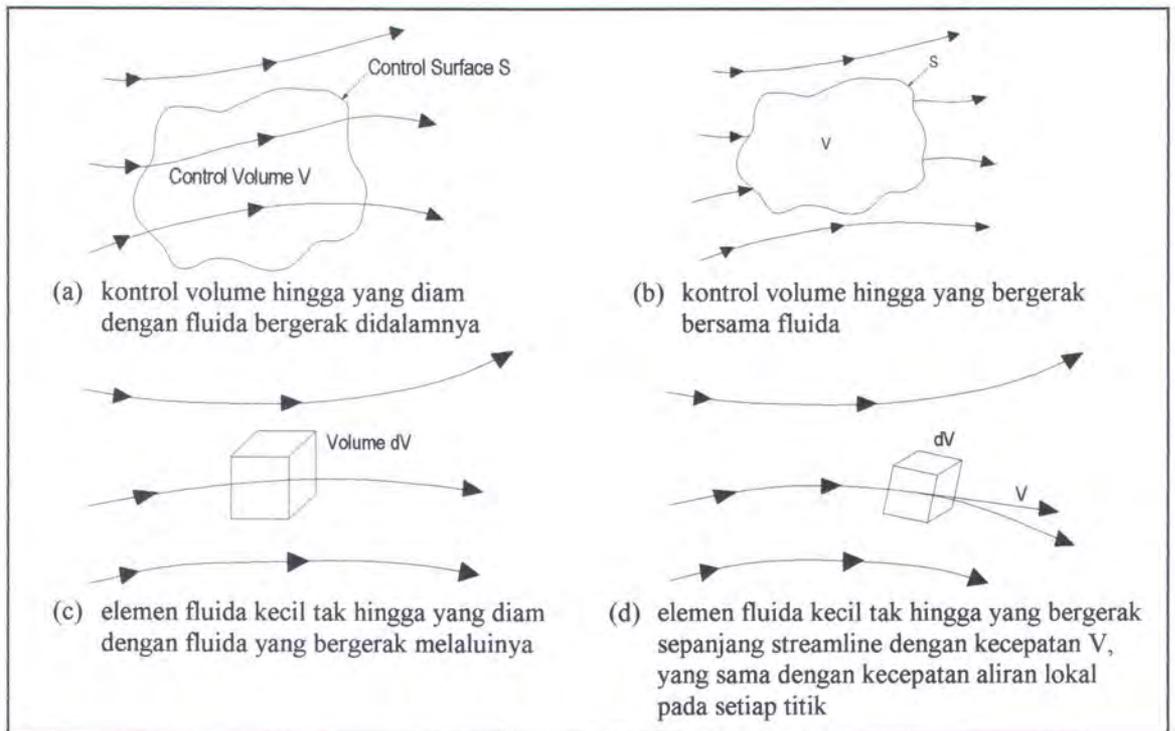
momentum dan energi. Persamaan-persamaan ini merupakan pernyataan matematis untuk tiga prinsip dasar fisika:

1. Hukum kekekalan massa (The conservation of mass)
2. Hukum kedua Newton (Newton's second law of motion)
3. Hukum kekekalan energi.

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

1. Memilih prinsip dasar fisika dasar dari hukum-hukum fisika (hukum kekekalan massa, hukum kedua Newton dan hukum kekekalan energi)
2. Menerapkan prinsip-prinsip fisika dalam model aliran.
3. Dari penerapan ini, diuraikan persamaan matematis yang meliputi prinsip-prinsip dasar 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 non conservation form. Hasil dari keempat model ini pada dasarnya akan menghasilkan persamaan yang sama, hanya dalam bentuk manipulasi matematis yang berbeda.



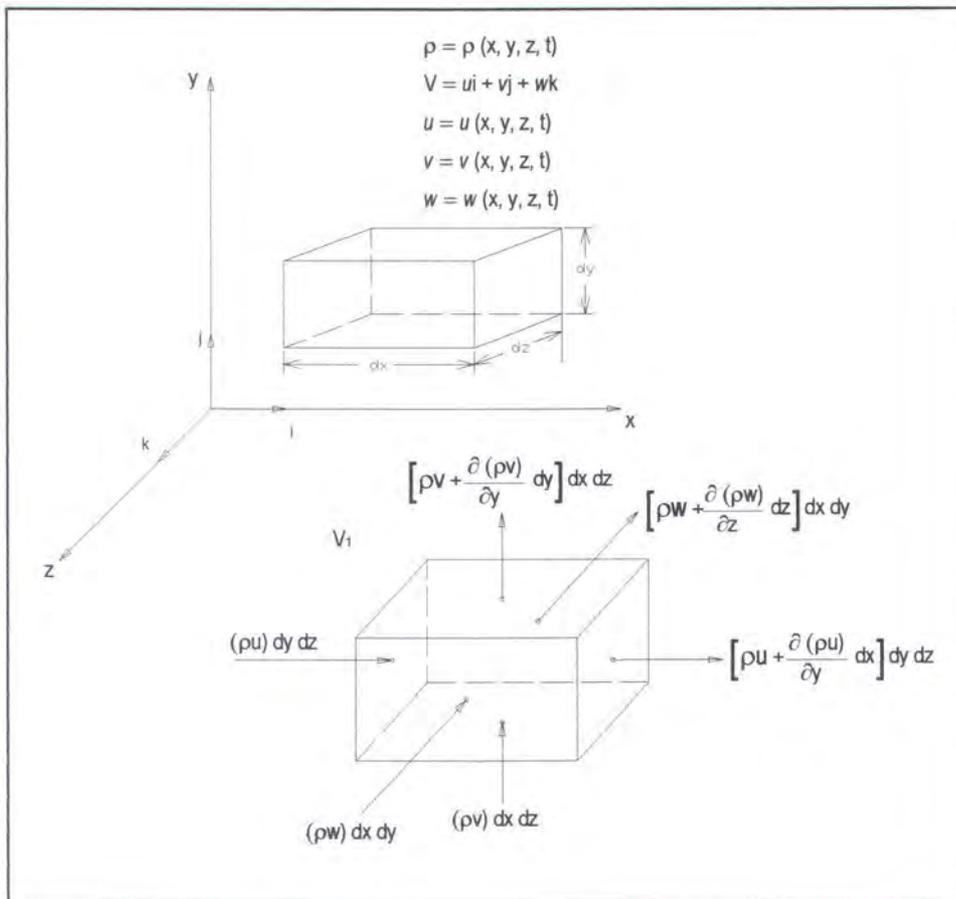
Gambar 3.1. Model-model aliran. (a & b) pendekatan kontrol volume hingga, (c & d) pendekatan elemen fluida kecil tak hingga

3.2. Persamaan aliran viscous (Persamaan Navier-Stokes)

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

3.2.1 Persamaan Kontinuitas

Pada gambar 3.1c diperlihatkan elemen kecil tak-hingga (infinitesimal fluid elemen) yang tetap dalam ruang dengan fluida yang bergerak disekitarnya. Model aliran ini secara detail terlihat pada Gambar 3.2. 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 dx , dy dan dz .



Gambar 3.2. Model elemen kecil tak hingga yang tetap dalam ruang

Gambar 3.2. memperlihatkan 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 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 $[\delta(\rho u) / \delta x] dx$. Karenanya, aliran massa melalui permukaan kanan dapat dinyatakan sebagai $\{\rho u + [\delta(\rho u) / \delta x] dx\} dy dz$. Dengan cara yang sama, aliran

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

Sesuai konvensi bahwa u , v , dan w bernilai positif pada arah sumbu x , y , dan z . Maka arah panah pada Gambar 3.2. 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 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 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 :

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

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

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

atau

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

Pada persamaan 2.23, 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 :

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.9)$$

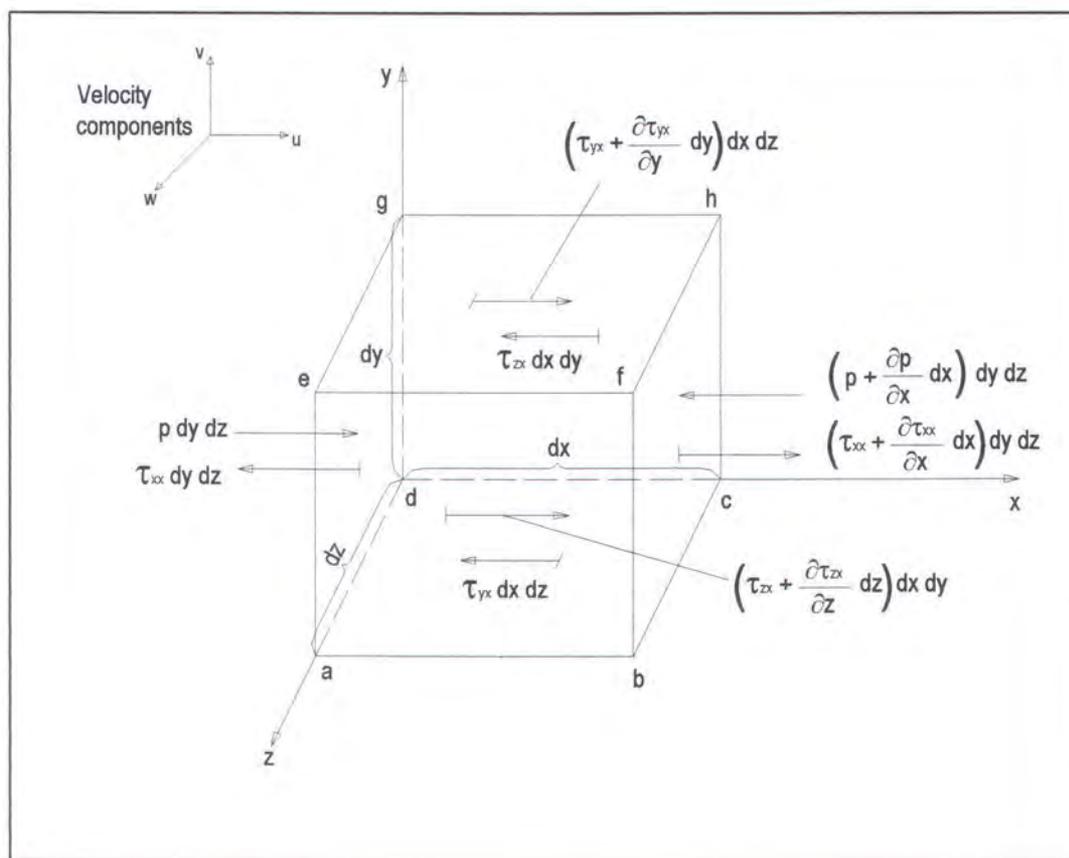
V adalah vektor kecepatan dalam koordinat Cartesian

$$\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k} \quad (3.10)$$

$\nabla \cdot V$ disebut sebagai convective derivative, yang secara fisik merupakan ukuran waktu terjadinya perubahan karena pergerakan elemen fluida dari suatu lokasi ke lokasi lainnya dalam bidang aliran, yang kondisinya relatif berbeda.

3.2.2 Persamaan Momentum

Dalam bagian ini, diterapkan prinsip dasar fisika yang lain kedalam model aliran, yaitu hukum Newton kedua. Seperti pada bagian A, disini digunakan model elemen fluida kecil tak hingga dengan fluida bergerak disekelilingnya. Model ini diperlihatkan dengan lebih jelas pada gambar berikut:



Gambar 3.3. Gaya-gaya yang bekerja pada sumbu x pada elemen fluida kecil tak hingga yang bergerak.

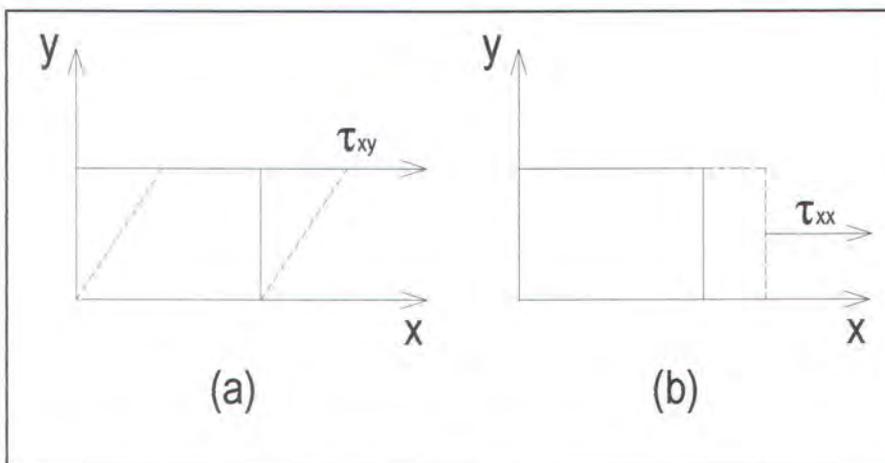
Hukum kedua Newton dalam arah x dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_x = m a_x \quad (3.11)$$

F_x dan a_x adalah komponen skalar arah x untuk gaya dan percepatan.

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

1. Gaya badan (body forces), yang akan 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 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 3.4. (a) tegangan geser (berkaitan dengan tingkat perubahan deformasi) dan (b) tegangan normal (berkaitan dengan tingkat perubahan volume)

Gaya badan perunit massa pada elemen fluida ditandai sebagai f , dan f_x sebagai f_x sebagai komponen gaya badan perunit massa yang searah sumbu x .

Volume adalah $(dx dy dz)$, sehingga:

$$\text{Gaya badan pada elemen fluida searah sumbu } x = \rho f_x (dx dy dz) \quad (3.12)$$

Tegangan normal dan geser dalam fluida terkait dengan tingkat perubahan (terhadap waktu) dari deformasi elemen fluida, seperti terlihat dalam gambar 3.4 (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 tegangan normal tergantung pada tingkat perubahan kecepatan dalam aliran. Dalam kebanyakan aliran viscous, tegangan normal seperti (τ_{xx}) jauh lebih kecil daripada tegangan geser dan seringkali diabaikan. Tegangan normal menjadi penting saat gradien kecepatan normal (misalnya $\delta x/\delta y$) nilainya sangat besar, seperti dalam gelombang kejut.

Gaya-gaya permukaan dalam arah- x diperlihatkan dalam Gambar 3.3. Disini 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 diatas permukaan $abcd$, sehingga gaya geser pada arah x di permukaan $efgh$ adalah $[\tau_{yz} + (\delta\tau_{yz} / \delta y) dy] dx dz$ dengan arah ke kanan (positif terhadap arah- x). Perlu ditekankan bahwa arah tegangan geser pada permukaan $abcd$ dan $efgh$ dipermukaan bawah, yaitu τ_{yx} arahnya ke kiri (negatif sumbu x), sedangkan pada permukaan atas, $\tau_{yz} + (\delta\tau_{yz} / \delta y) dy$ arahnya kekanan. Arah-arrah 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 3.3, u meningkat dalam arah y -positif. Kemudian,

pada permukaan $efgh$, u sedikit lebih tinggi diatas permukaan daripada 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-arrah dari seluruh tegangan viscous diperlihatkan dalam Gambar 3.3, termasuk τ_{xx} , bisa disusun dengan cara yang sama. Khusus di permukaan $dcgh$, τ_{zx} berlaku pada arah x-negatif, sedangkan pada permukaan $abfe$, $\tau_{zx} + (\delta\tau_{zx}/\delta z)dz$ berlaku pada arah x-positif. Dipermukaan $adhe$, 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 3.3, alasan kenapa τ_{xx} berada dalam permukaan $adhe$ adalah sebagai “engsel kiri” (left hinges) pada konvensi yang telah disepakati sebelumnya sebagai arah penambahan kecepatan. Disini sesuai konvensi, peningkatan positif dalam u adalah menuju ke arah x-positif. Karenanya, 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 pergeseran ke arah kiri yang ingin memperlambat gerak elemen fluida. Kebalikannya, pada permukaan $bcgf$, gaya tekan $[p + (\delta p/\delta x) dx] dy$ ditekan kedalam pada elemen fluida (dalam arah x-negatif), dan karena nilai u pada sisi kanan permukaan $bcgf$ lebih besar daripada nilai u di permukaan, terjadi “pengisapan” karena tegangan normal viscous yang mencoba untuk mendorong elemen ke kanan (dalam arah x-positif) dengan gaya setara

dengan $[\tau_{xx} + \delta\tau_{xx} / \delta x] dx] dy dz$. Dengan kerangka pikir seperti diatas, untuk elemen fluida yang bergerak ditulis:

Gaya permukaan bersih dalam arah x :

$$\left[\rho - \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx \right) \right] dydz + \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dydz + \quad (3.13)$$

$$\left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \quad (3.14)$$

Gaya total dalam arah x , F_x , diberikan oleh penjumlahan persamaan 3.13 dan 3.14, didapatkan :

$$F_x = \left[-\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \quad (3.15)$$

Massa elemen fluida yaitu :

$$m = \rho dx dy dz \quad (3.16)$$

Percepatan elemen fluida adalah tingkat perubahan waktu dari kecepatan.

Karenanya, komponen percepatan dalam arah $-x$ (a_x), secara sederhana merupakan perubahan u terhadap waktu sejak kita mengikuti elemen fluida yang bergerak. Tingkat perubahan terhadap waktu ini diberikan oleh *derivative* dasar sebagai berikut :

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (3.17)$$

Dengan menggunakan persamaan 3.11, 3.15, 3.16, dan 3.16, maka didapatkan :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.18)$$

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

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

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.19)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.20)$$

Persamaan 3.18, 3.19, dan 3.20 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 3.18 sampai 3.20 merupakan bentuk nonconservation. Persamaan-persamaan ini merupakan persamaan skalar dan disebut sebagai persamaan Navier-Stokes.

Persamaan Navier-Stokes bisa didapatkan dalam bentuk conservative sebagai berikut. Sisi kiri persamaan 3.18 ditulis dalam bentuk derivative dasar :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \nabla u \quad (3.21)$$

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

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \rho \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.22)$$

Menggunakan identitas vektor untuk men-divergen-kan hasil skala 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 :

$$\rho \mathbf{V} \cdot \nabla u = \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) - u \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \quad (3.23)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 3.22 dan 3.23 kedalam persamaan 3.21,

$$\text{didapatkan : } \rho \frac{Du}{Dv} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) + \nabla \cdot (\rho u V)$$

$$\rho \frac{Du}{Dv} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) \right] + \nabla \cdot (\rho u V) \quad (3.24)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 3.8 kedalam persamaan 3.24, didapatkan :

$$\rho \frac{Du}{Dv} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) \quad (3.25)$$

Substitusi persamaan 3.25 ke 3.18 menghasilkan :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.26)$$

Dengan cara yang sama persamaan 3.19 dan 3.20 menjadi :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.28)$$

Persamaan 3.26 sampai 3.28 adalah persamaan Navier-Stokes dalam bentuk *conservation*.

Pada akhir abad 17, Isaac Newton menyatakan bahwa tegangan geser pada fluida adalah proposional 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, darah contohnya). Dalam kebanyakan praktik aerodinamika, fluida bisa diasumsikan sebagai newtonian. Untuk fluida ini, Stokes mendapatkan :

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.29)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.30)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.31)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (3.32)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right] \quad (3.33)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (3.34)$$

Untuk μ adalah koefisien viskositas molekul 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 3.29 ~ 3.34 ke persamaan 3.26 ~ 3.28 didapatkan persamaan lengkap Navier~Stokes sebagai berikut

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_z \quad (3.37)$$

3.3. ANSYS Flotran CFD 5.7

Dalam penyelesaian pemodelan ini menggunakan ANSYS Flotran CFD release 5.7 yang terdiri dari 3 tahap, yaitu Preprocessor, Solution (Flow Solver), dan General Postprocessor.

A. Preprocessor

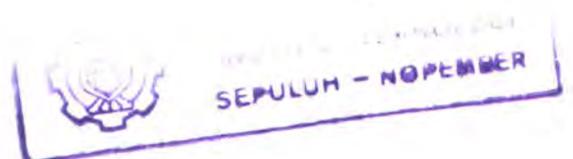
Pada tahapan ini dilakukan langkah utama sebagai berikut:

1. Element Type : pemilihan type elemen fluida yang akan dilakukan, yaitu elemen Fluid 141 untuk permasalahan yang diselesaikan dengan pendekatan elemen dua dimensi dan Fluid 142 untuk tiga dimensi.
2. Modelling : pendefinisian geometri dari model yang dibuat dengan domain fluida yang sesuai dengan kebutuhan.
3. Meshing : membagi model dan domain fluida yang telah dibuat menjadi sejumlah elemen, penentuan tingkat kerapatannya, dan penentuan bentuk elemen serta sifat meshing.

B. Solution

Pada tahap ini terdiri dari dua input utama yaitu masukan untuk kondisi batas dan properties dari model (flotran setup)

1. Loads



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

2. Flotran Set up

- a. Solution options : - steady state atau transient
- b. Execution control : penentuan jumlah iterasi dan tingkat konvergensi.
- c. Additional output : hasil tambahan yang ingin diketahui besarnya. Misalnya koefisien tekanan dan tegangan geser.
- d. Penentuan sifat-sifat fluida yaitu density dan viscosity.
- 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 tingkat konvergensi 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 output (hasil tambahan) juga bisa didapatkan sesuai dengan yang diminta pada tahap solution.

Tahap Validasi

1. Convergen

Pada proses iterasi perhitungan akan selalu dikontrol dengan persamaan pengendali. Proses dikatakan baik jika variabel-variabelnya tidak mengalami perubahan yang besar atau grafik iterasi berfluktuasi secara stabil.

2. Grid Independence

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

3. Verifikasi dengan teori atau data lain

Hasil perhitungan dengan pendekatan CFD dibandingkan dengan teori atau data lain yang sudah ada untuk mengetahui tingkat keakurasiannya.

Verification memberikan dua hasil:

- Menunjukkan kualitas suatu hasil (tanpa kesalahan pengetesan);
- Menunjukkan kualitas model secara teori (bentuk eksperimen dari suatu kondisi batas)

3.4 Pemodelan model kapal 3D

Untuk keperluan analisa ini digunakan pendekatan tiga dimensi untuk kapal. Potongan melintang model berbentuk segi enam dengan pertimbangan untuk mendekati potongan model badan kapal. Langkah pembuatan model yaitu:

1. Tahap Preprocessor

- Type Element : FLUID 142
- Geometri:

Pendefinisian geometri dari domain permasalahan merupakan hasil kombinasi dari domain permasalahan untuk kondisi aliran eksternal (external flow). Menurut Utama (1999), kondisi optimum yang bekerja pada model pada keadaan aliran eksternal adalah:

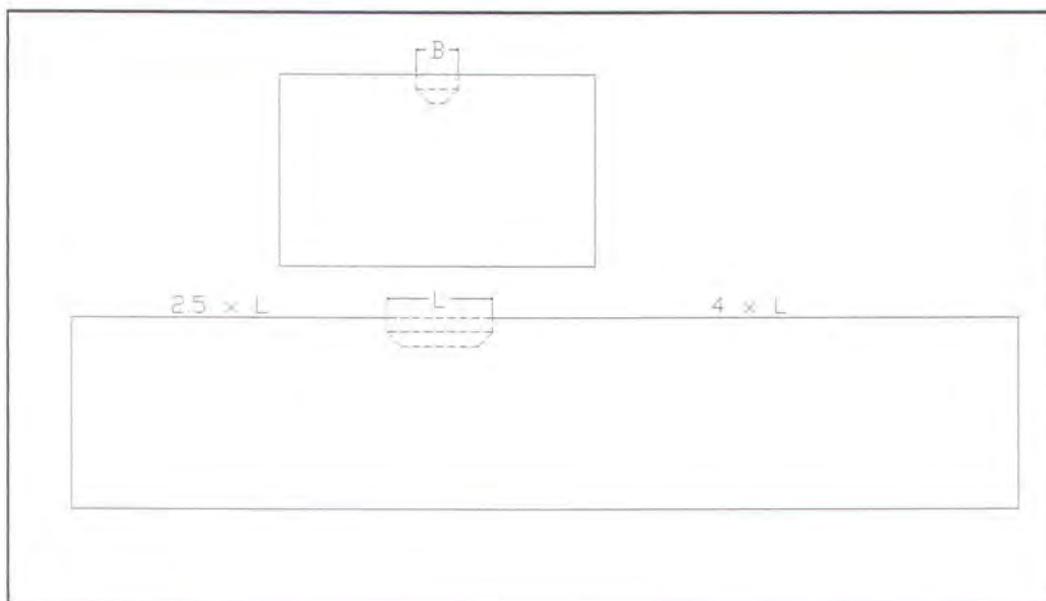
- Jarak sisi depan (inlet) terhadap model berkisar $2L \sim 3L$
- Jarak samping model $\geq 2L$
- Jarak sisi belakang (outlet terhadap model berkisar $3L \sim 5L$)

Dengan mengadopsi dan mengkombinasikan referensi bentuk domain diatas, maka domain untuk permasalahan ini dibuat. Namun karena dalam hal ini penelitian yang dilakukan berhubungan dengan permasalahan keterbatasan domain aliran, maka akan disesuaikan dengan ukuran kondisi domain yaitu ukuran tangki laboratorium yang kemudian disimulasi dengan keterbatasan jika perbandingan domain dan model itu tetap. Namun pengaturan geometri ukuran domain yang lain menyesuaikan dengan kondisi

optimum yang diminta dalam hal ini pembatasan panjang dimuka dan dibelakang model dibuat simulasi yang optimum yaitu:

- Jarak inlet ke ujung depan model kapal adalah $2.5 L$
- Jarak outlet keujung belakang model pelat datar adalah $4 L$
- Jarak model ke samping sisi dan bawah menyesuaikan dengan ukuran tangki maksimum di Laboratorium dan mengecil secara geosim untuk pemodelan berikutnya.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4 Pemodelan model kapal dan tangki percobaan

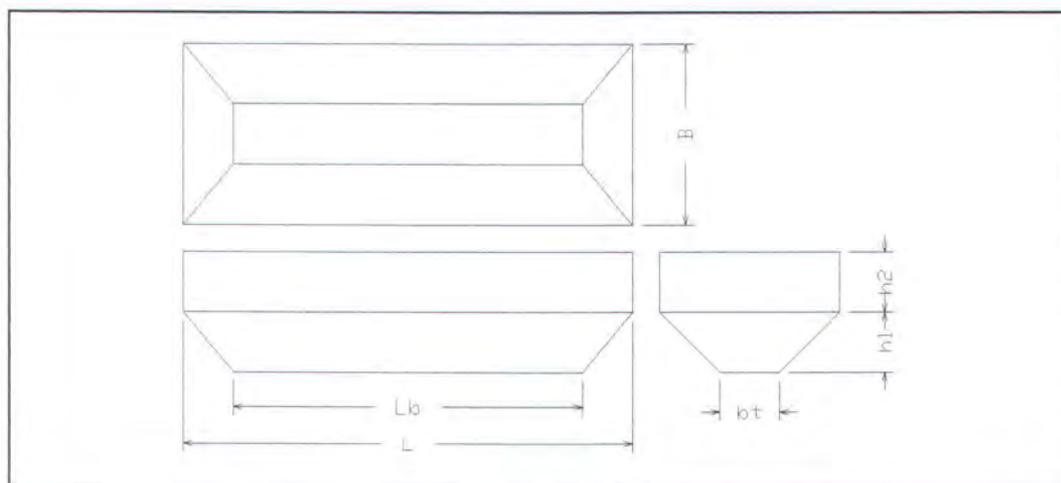
Kemudian perubahan besarnya blockage dengan variasi model tetap namun ukuran tangki yang dibuat mengecil secara geosim. Ukuran tangki (channel) Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS yang disimulasi geosim terhadap ukuran sebelumnya yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tangki	Sarat (T)	Lebar (H)	m [%]
1*	1.80	3.00	2.469
2	1.62	2.70	3.048
2~3	1.53	2.55	3.417
3	1.44	2.40	3.858

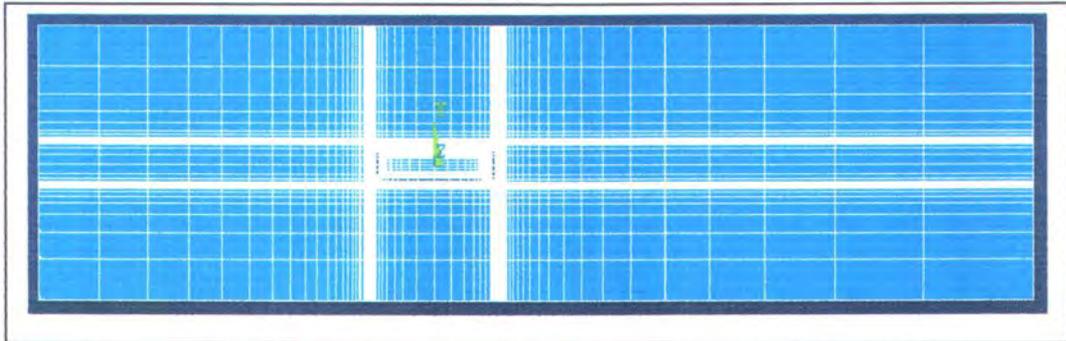
*Ukuran tangki sebenarnya

Tabel 3.1. Geometri pemodelan tangki percobaan

Ukuran tangki 1 merupakan potongan melintang dari tangki Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS sebenarnya sedangkan tangki 2 geosim diambil 90 % dari ukuran pertama. Tangki 3 diambil 80 % dari ukuran tangki, sedangkan Tangki 2~3 merupakan pendekatan ukuran tangki 2 dan 3. Ukuran model kapal yang dimodelkan adalah $L = 1.200 \text{ m}$, $L_b = 0.96 \text{ m}$, $B = 0.40 \text{ m}$, $bt = 0.1333 \text{ m}$, $h1 = 0.20 \text{ m}$, $h2 = 0.2 \text{ m}$. Dari ukuran tersebut maka besarnya Luasan melintang model adalah 0.1333 m^2 . Detail model kapal dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut:



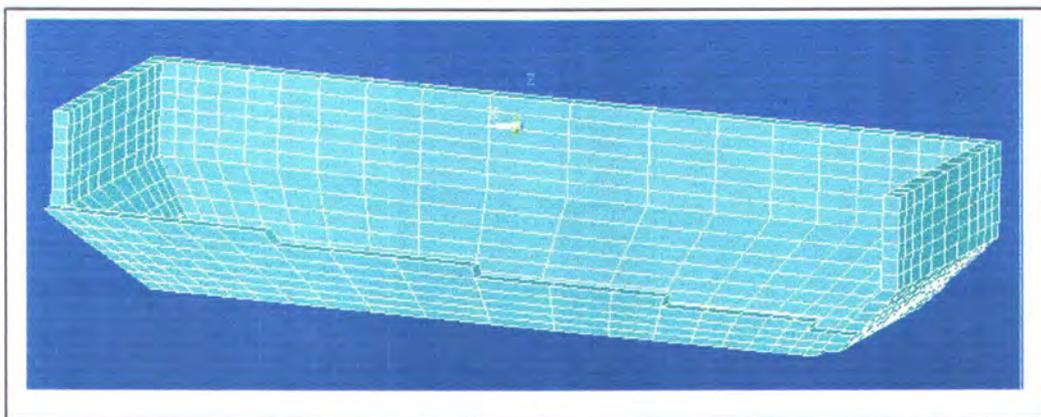
Gambar 3.5 Gambar pemodelan model kapal



Gambar 3.6 Gambar meshing pandangan atas

- Meshing, yaitu membagi geometri model dengan elemen–elemen seperti pada metode elemen hingga. Bentuk elemen yang digunakan kotak dengan pembagian yang semakin mengecil mendekati model yang dipakai. (dapat dilihat pada Gambar 3.6).

Hasil meshing akan menghasilkan elemen-elemen terpakai seperti halnya pada elemen hingga. Penggambaran elemen yang nampak disekitar model kapal terlihat pada Gambar 3.7 berikut:



Gambar 3.7 Gambar penampakan elemen disekitar model kapal

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

Pada batas inflow dan side,

Area inlet, $v = 1, 2, 3$ dan 4 m/dt

Area outlet, pressure = 0

Area batas luar yang lain, $v = 0$ m/dt

- Flotran Set-up
 - Solution options : steady state, adiabatic, turbulent, incompressible.

$$Re = \frac{\rho V L}{\nu}$$

$$Re = \frac{996.75486 \cdot 1,0 \cdot 1,2}{8,544 \cdot 10^{-7}} = 1.1666 \cdot 10^7$$

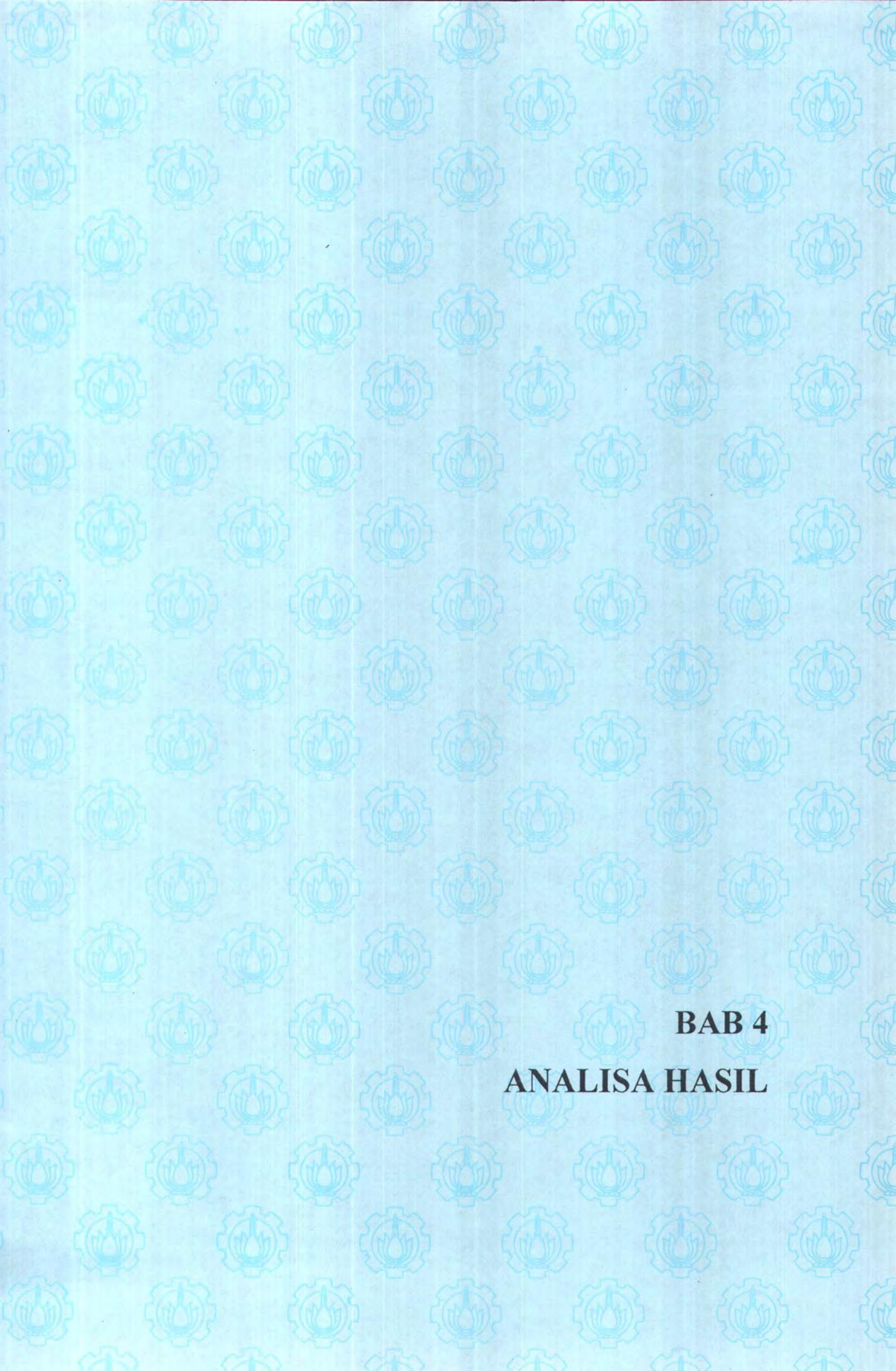
Dipilih aliran turbulent karena angka reynold perhitungan $\geq 10^5$.

- Execution control : $P = 0.01$
- Additional output : Hasil output tambahan yang diinginkan.
Semakin banyak output tambahan yang dipilih akan semakin lama pula waktu untuk proses iterasi. Tambahan output untuk mencari besarnya tahanan kekentalan yang dipilih adalah pressure coeff. (koefisien tekanan) dan wall shear stress (tegangan geser dinding).
- Fluid properties = liquid (996.75486 kg/m^3)
Viskositas = liquid ($8.544 \cdot 10^{-7}$)
Flow environment : tekanan = 1 atm

- Run, model yang sudah di set tersebut di run untuk mendapatkan hasil (output berupa data-data numerik, untuk menghitung besarnya tahanan). Hasil berupa tegangan geser dan koefisien tekanan dimana hasil integrasinya untuk mendapatkan besarnya tahanan pada model.

3.5. Perhitungan Tahanan Pada Model Kapal

Untuk mendapatkan hasil tahanan dengan simulasi CFD ini, model diasumsikan sebagai model yang tercelup didalam tangki dengan mengabaikan pengaruh permukaan bebas (tidak ada pemodelan diluar fluida air). Data yang didapatkan dari hasil running langsung didapatkan dari proses Post Processor (General Post Proc,) dimana didalamnya terdapat fasilitas perhitungan integral luasan dari titik (node) pada suatu luasan atau permukaan. Setelah semua luasan yang ingin dicari dipilih, proses perhitungan akan dilakukan sendiri oleh program. Dalam hal ini node yang dipilih dari 9 permukaan luasan model yang dicari.



BAB 4
ANALISA HASIL

BAB 4

ANALISA HASIL

4.1. Grid Independen

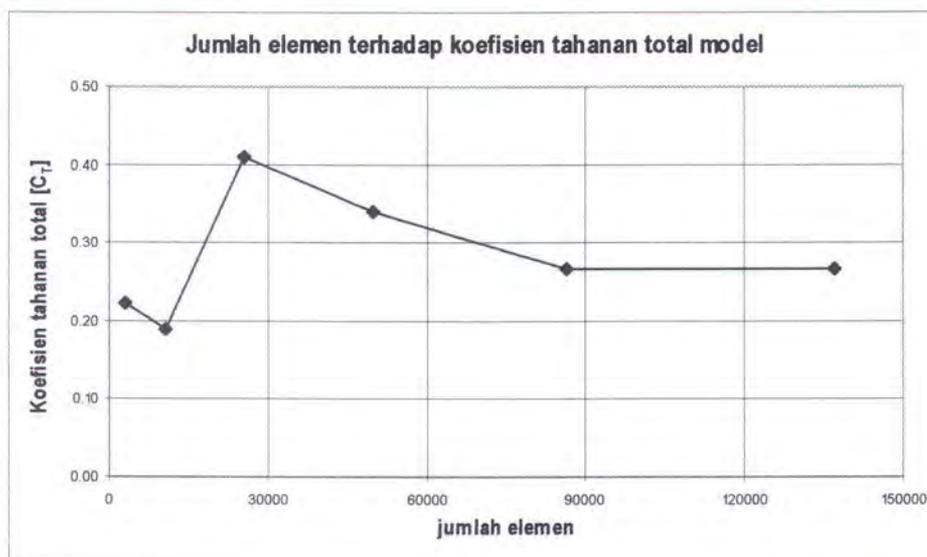
Tujuan dari proses grid independence, yaitu untuk mendapatkan jumlah elemen hingga dalam bentuk mapped atau free yang efektif, yaitu data yang dihasilkan mempunyai keakurasian yang baik serta jumlah elemen terpakai efisien, yaitu tidak memakan waktu yang lama dalam proses iterasi dan tidak membutuhkan space harddisk yang sangat besar.

Pengujian dilakukan dengan berbagai variasi jumlah elemen antara lain 3200, 10800, 25600, 50000, 86400 dan 137200. Elemen-elemen ini memiliki perbandingan pembagian elemen yang linier dan different ratio yang tetap, sehingga besar penyebaran node pada setiap pemodelan tetap.

Hasil pengujian grid independence disajikan dalam tabel dan kurva berikut:

Jumlah Elemen	3200	10800	25600	50000	86400	137200
Tahanan (N)	2503.84655	2142.43430	4615.09277	3834.22498	3010.34952	3009.50000

Tabel 4.1 Grid Independen



Gambar 4.1 Kurva pengaruh jumlah elemen terhadap koefisien tahanan total model kapal

Dari Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 di atas menunjukkan, bahwa elemen dengan jumlah 86400 memiliki perbedaan koefisien tahanan yang cukup kecil dengan elemen yang berikutnya (penambahan elemen berikutnya menghasilkan besar koefisien tahanan cenderung sama besarnya). Hal ini ditandai dengan besar slope yang kecil yaitu sebesar -0.028% . Hal ini tidak terjadi pada elemen yang sebelumnya yang cenderung terjadi slope yang besar. Sehingga model dengan jumlah elemen 86400 yang digunakan untuk *running* berikutnya dengan variasi kecepatan yang berbeda.

4.2. Data, jumlah iterasi dan waktu running

Proses running dilakukan dengan menggunakan fasilitas komputer dengan spesifikasi yaitu Processor Pentium 4-1.6 GHz, kapasitas hard disk 40 GB dengan space hard disk yang masih kosong ± 13 GB dan memori sebesar 256 MB. Proses running berhenti dengan tingkat konvergensi $10^{-3} \sim 10^{-5}$ atau iterasi telah

mengalami kestabilan. Dimana model yang menggunakan jumlah elemen yang tinggi akan membutuhkan waktu running yang lama.

Jumlah Elemen (buah)	3200	10800	25600	50000	86400	137200
Waktu running (jam)	3.67767	3.96667	9.04713	18.30883	13.61217	9.41333

Tabel 4.2 Data jumlah iterasi dan waktu running

4.3. Hasil analisa tahanan dan penambahan kecepatan yang terjadi pada model.

Dari hasil running CFD didapatkan hasil berupa distribusi tekanan (p) dan distribusi tegangan geser (τ). Untuk mendapatkan nilai tahanan dalam hal ini adalah tahanan kekentalan (sama dengan drag untuk benda terbenam seluruhnya) digunakan persamaan :

$$D' = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) ds + \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) ds \quad (4.1)$$

dimana ds merupakan derivasi dari arah gaya yang ditinjau dalam hal ini terhadap sumbu x , y , dan z sehingga untuk masing-masing luasan yang ditinjau akan didapatkan hasil integrasi terhadap masing-masing sumbu koordinat.

$$P_x = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx \quad (4.2)$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \quad (4.3)$$

$$P_y = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dy \quad (4.4)$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \quad (4.5)$$

$$P_z = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dz \quad (4.6)$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \quad (4.7)$$

sehingga

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dz \right)^2} \quad (4.8)$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} \quad (4.9)$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} \quad (4.10)$$

Dalam kasus ini model berupa benda 3 dimensi yang memiliki 9 luasan permukaan yang terbenam ke dalam air sehingga akan dihitung besarnya tahanan adalah total drag dari masing masing permukaan. Dengan menggunakan persamaan diatas akan didapatkan besarnya Drag total pada model.

Untuk kecepatan $v = 1.0$ m/dt, maka $Fn = 0.291$

Untuk tangki dengan $m = 2.469$ %

$$P_x = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx = 148.31713$$

$$P_y = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dy = -0.28138$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -124.01164$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 0.74816$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.00191$$

$$\tau z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.03243$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 193.33116$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 0.74886$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 194.08002$$

Untuk tangki dengan $m = 3.048 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 152.39314$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = 8.40979$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -114.71838$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 0.65184$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.00732$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = 0.00616$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dz \right)^2} = 190.93114$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 0.65191$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 191.58305$$

Untuk tangki dengan $m = 3.417\%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx = 190.87858$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dy = 2.31397$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dz = -141.09010$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 0.80753$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.01587$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.03968$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dz \right)^2} = 237.37397$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz\right)^2} = 0.80866$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 238.18263$$

Untuk tangki dengan $m = 3.858 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 211.23158$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = 2.19223$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -147.62134$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 0.77860$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = 0.00496$$

$$\tau z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.04702$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz\right)^2} = 257.71233$$

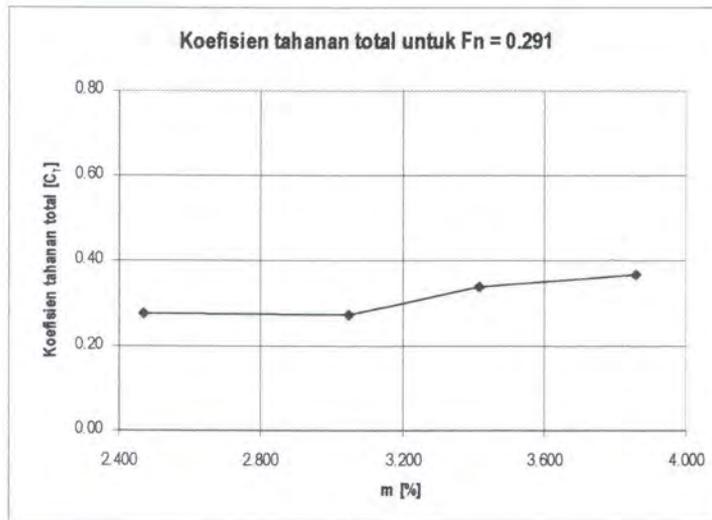
$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz\right)^2} = 0.78004$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 258.49237$$

m [%]	2.469	3.048	3.417	3.858
D'	194.08002	191.58305	238.18263	258.49237
C _T	0.27588	0.27233	0.33857	0.36743

Tabel 4.3 Koefisien tahanan total untuk $F_n=0.291$

Sehingga dalam bentuk kurva, masing-masing koefisien tahanan dapat digambarkan pada Gambar 4.2. Pada $F_n = 0.291$, menunjukkan hampir tidak ada perubahan untuk $m = 2.469\%$ dan $m = 3.048\%$. Sedangkan untuk $m = 3.417\%$ mulai terjadi penambahan tahanan. Dan pada $m = 3.858\%$ penambahan koefisien tahanan memiliki kecenderungan penambahan kembali. Ini terlihat dari slope yang terjadi cukup besar. Dari tabel 4.3 dapat dilihat bahwa besarnya penambahan harga C_T untuk $m = 3.417\%$ sebesar 0.0627 atau sebesar 18.516%. Bila dikonversikan dalam bentuk penambahan kecepatan maka besarnya koreksi adalah 4.3%. Dan penambahan harga C_T untuk $m = 3.858\%$ sebesar 0.09156 atau sebesar 24.92% dan 4.99% untuk koreksi penambahan kecepatan. Hal ini menunjukkan bahwa pada $m = 3.417\%$ sudah tidak memenuhi batas maksimum *blockage* yang dapat digunakan. Sedangkan $m = 3.048\%$ masih dapat memenuhi batas maksimum. Sehingga besarnya *blockage* maksimum yang bisa memenuhi adalah $m = 3.048\%$.



Gambar 4.2 Kurva koefisien tahanan total $F_n = 0.291$

Untuk kecepatan $v = 2.0$ m/dt, $F_n = 0.583$

Untuk tangki dengan $m = 2.469$ %

$$P_x = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx = 614.37399$$

$$P_y = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dy = -3.98330$$

$$P_z = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dz = -504.80954$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 2.57757$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.00351$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.16498$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz\right)^2} = 795.17541$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz\right)^2} = 2.58285$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 797.75826$$

Untuk tangki dengan $m = 3.048 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 612.46292$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = -3.09712$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -504.84241$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 2.56984$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.00840$$

$$\tau z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.18080$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz\right)^2} = 793.71675$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz\right)^2} = 2.57620$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 796.29295$$

Untuk tangki dengan $m = 3.417 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 738.41852$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = -11.75114$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -556.38226$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 3.02052$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.03447$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.14015$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 924.64113$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 3.02396$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 927.66510$$

Untuk tangki dengan $m = 3.858 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 792.08065$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = -5.08898$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -574.48983$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 2.87410$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.03749$$

$$\tau z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.14108$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 978.49692$$

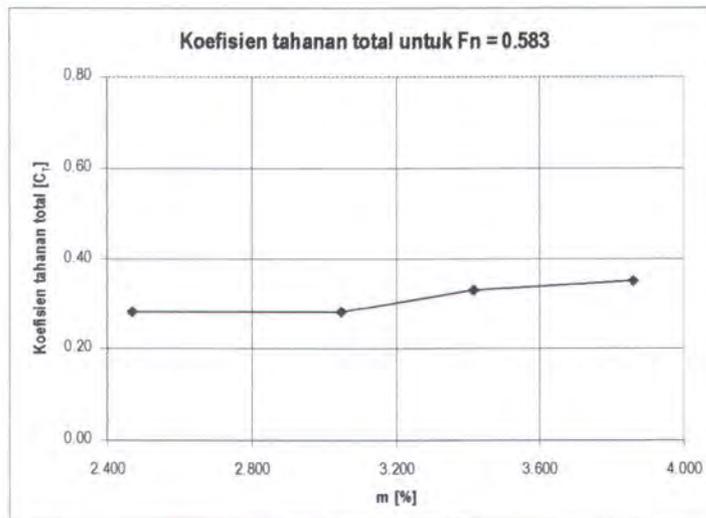
$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 2.87781$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 981.37472$$

m [%]	2.469	3.048	3.417	3.858
D'	797.75826	796.29295	927.66510	987.49472
C _T	0.28349	0.28297	0.32966	0.35092

Tabel 4.4 Koefisien tahanan total untuk Fn=0.583

Sehingga dalam bentuk kurva, masing-masing koefisien tahanan total dapat digambarkan pada Gambar 4.3. Pada kecepatan Fn = 0.583, menunjukkan hampir tidak ada perubahan untuk m = 2.469 % dan m = 3.048 %. Sedangkan untuk m = 3.417 % mulai terjadi penambahan tahanan.



Gambar 4.3 Kurva koefisien tahanan total $F_n = 0.583$

Ini terlihat dari slope yang terjadi cukup besar. Dari tabel 4.4 dapat dihitung besarnya penambahan harga C_T untuk $m = 3.417\%$ sebesar 0.04616 atau sebesar 14.004 %. Bila dikonversikan dalam bentuk penambahan kecepatan maka besarnya koreksi adalah 3.74 %. Dan penambahan harga C_T untuk $m = 3.858\%$ sebesar 0.06743 atau sebesar 19.21 % dan 4.38 %. Hal ini menunjukkan bahwa pada $m = 3.417\%$ sudah tidak memenuhi batas maksimum *blockage* yang dapat digunakan. Sedangkan $m = 3.048\%$ masih dapat memenuhi batas maksimum. Sehingga besarnya *blockage* maksimum yang bisa memenuhi adalah $m = 3.048\%$.

Untuk kecepatan $v = 3.0$ m/dt, $F_n = 0.874$

Untuk tangki dengan $m = 2.469\%$

$$P_x = \int_{LE}^{TE} (p_l - p_u) dx = 1282.26535$$

$$P_y = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = -1.55838$$

$$P_z = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -1118.27048$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 5.46437$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = 0.04042$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.39297$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 1701.3923$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 5.47863$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 1706.87092$$

Untuk tangki dengan $m = 3.048 \%$

$$P_x = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 1234.62652$$

$$P_y = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = 19.56715$$

$$P_z = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -1116.77487$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 5.67405$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = 0.08797$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.34629$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 1664.8939$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 5.68529$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 1670.57916$$

Untuk tangki dengan $m = 3.417\%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 1295.43765$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = 68.17402$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -1165.10364$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 6.30089$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.22466$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.43830$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz\right)^2} = 1743.6378$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz\right)^2} = 6.32011$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 1749.95795$$

Untuk tangki dengan $m = 3.858 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 1749.34685$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = 1.64139$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -1282.91611$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 6.35644$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.01508$$

$$\tau z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.22373$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz\right)^2} = 2169.3526$$

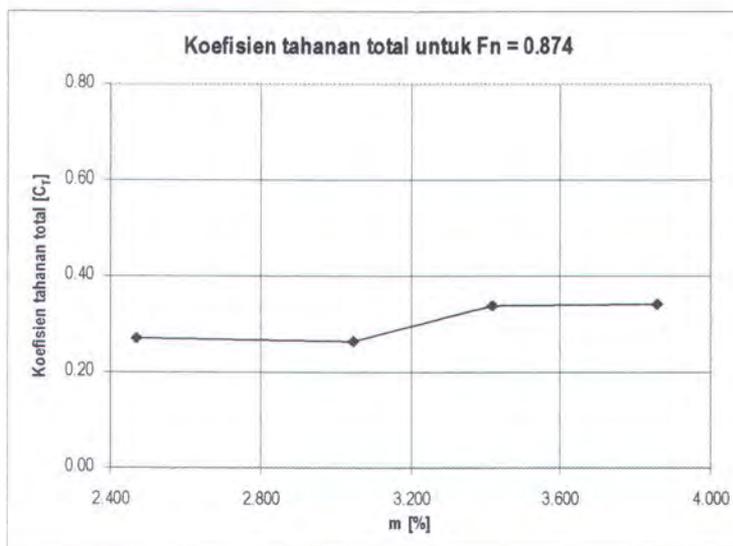
$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy\right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz\right)^2} = 6.36039$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 2175.71303$$

Sehingga dalam bentuk kurva, masing-masing tahanan dapat digambarkan pada Gambar 4.4. Pada $F_n = 0.874$ menunjukkan hampir tidak ada perubahan untuk $m = 2.469\%$ dan $m = 3.048\%$. Sedangkan untuk $m = 3.417\%$ mulai terjadi penambahan tahanan. Ini terlihat dari slope yang terjadi cukup besar. Dari tabel 4.5 dapat dihitung besarnya penambahan harga C_T untuk $m = 3.417\%$ sebesar 0.06918 atau sebesar 20.42 %.

m [%]	2.469	3.048	3.417	3.858
D'	1706.87092	1670.57916	2144.59853	2175.71303
C_T	0.26958	0.26385	0.33872	0.34363

Tabel 4.5 Koefisien tahanan total untuk $F_n = 0.874$



Gambar 4.4 Kurva koefisien tahanan total $F_n = 0.874$

Bila dikonversikan dalam bentuk penambahan kecepatan maka besarnya koreksi adalah 4.52 %. dan penambahan harga C_T untuk $m = 3.858\%$ sebesar

0.07405 atau sebesar 21.55 % dan 4.64 % untuk koreksi penambahan kecepatan. Hal ini menunjukkan bahwa pada $m = 3.417$ % sudah tidak memenuhi batas maksimum *blockage* yang dapat digunakan. Sedangkan $m = 3.048$ % masih dapat memenuhi batas maksimum. Sehingga besarnya *blockage* maksimum yang bisa memenuhi adalah $m = 3.048$ %.

Untuk kecepatan $v = 4.0$ m/dt, $Fn = 1.1658$

Untuk tangki dengan $m = 2.469$ %

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 2256.08249$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = 2.47993$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -1978.91064$$

$$\tau_x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 9.32323$$

$$\tau_y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = 0.02124$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.69880$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 3001.0001$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 9.34940$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 3010.34952$$

Untuk tangki dengan $m = 3.048 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 2438.89729$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = 14.09872$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -2058.25230$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 9.46102$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.04168$$

$$\tau z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.78943$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 3191.3667$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 9.49399$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 3200.86067$$

Untuk tangki dengan $m = 3.417 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 3015.40711$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = -50.50304$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -2250.00762$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 10.86878$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = -0.17011$$

$$\tau z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.66036$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 3762.6806$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 10.89015$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 3773.57070$$

Untuk tangki dengan $m = 3.858 \%$

$$Px = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx = 3281.13365$$

$$Py = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy = -18.89101$$

$$Pz = \int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz = -2326.14010$$

$$\tau x = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx = 11.07679$$

$$\tau y = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy = 0.24071$$

$$\tau_z = \int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz = -0.36475$$

$$P_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\rho_l - \rho_u) dz \right)^2} = 4022.0794$$

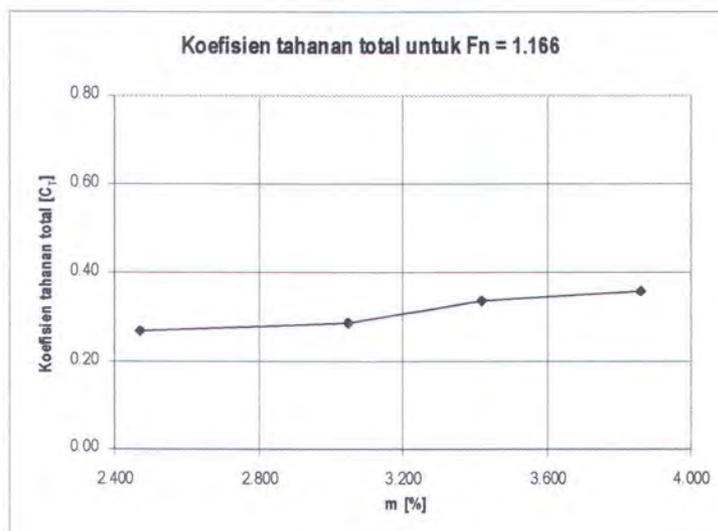
$$\tau_{total} = \sqrt{\left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dx \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dy \right)^2 + \left(\int_{LE}^{TE} (\tau_u - \tau_l) dz \right)^2} = 11.08541$$

$$D'_{total} = P_{total} + \tau_{total} = 4033.16480$$

m [%]	2.469	3.048	3.417	3.858
D'	3010.34952	3200.86067	3773.57070	4033.16480
C _T	0.26744	0.28437	0.33525	0.35831

Tabel 4.6 Koefisien tahanan total untuk Fn=1.166

Sehingga dalam bentuk kurva, masing-masing tahanan dapat digambarkan pada Gambar 4.5.

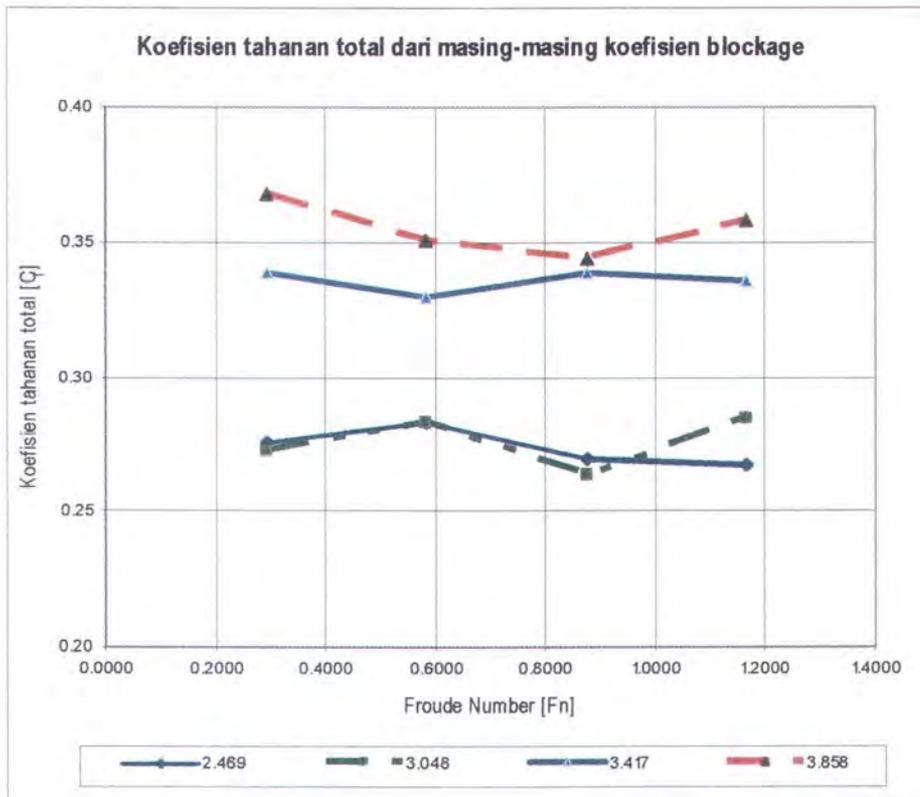


Gambar 4.5 Kurva koefisien tahanan total Fn = 1.166

Pada $F_n = 1.166$, menunjukkan adanya penambahan untuk koefisien *blockage* berikutnya. Penambahan ini semakin besar untuk harga m yang semakin bertambah. Penambahan harga m yang seharusnya cenderung tetap tidak berlaku untuk $v = 4$ m/dt. Dari tabel 4.6 dapat dilihat bahwa besarnya penambahan harga C_T untuk $m = 3.417$ % sebesar 0.01693 atau sebesar 5.952 %. Bila dikonversikan dalam bentuk penambahan kecepatan maka besarnya koreksi adalah 2.44 %. Untuk besarnya penambahan harga C_T untuk $m = 3.417$ % sebesar 0.06781 atau sebesar 20.22 % atau 4.5 % untuk koreksi penambahan kecepatan. Dan penambahan harga C_T untuk $m = 3.858$ % sebesar 0.09087 atau sebesar 25.36 % atau sebesar 5.04 % untuk koreksi penambahan kecepatan. Untuk lebih jelasnya dapat kita lihat perbandingan kurva fungsi dari masing-masing koefisien dan penambahan yang terjadi dengan mentabulasi masing-masing koefisien *blockage* pada Tabel 4.7 dan digambarkan pada Gambar 4.6.

Fn (m/dt)	Koefisien tahanan total [C _T]			
	2.469	3.048	3.417	3.858
0.2915	0.27588	0.27233	0.33857	0.36743
0.5829	0.28349	0.28297	0.32966	0.35092
0.8744	0.26958	0.26385	0.33877	0.34363
1.1658	0.26744	0.28437	0.33525	0.35831

Tabel 4.7 Koefisien tahanan total model dari masing-masing koefisien *blockage*



Gambar 4.6 Kurva koefisien tahanan total untuk semua bilangan koefisien *blockage*

Dari hasil Gambar 4.6 besarnya koefisien tahanan (C_T) pada angka Froude 0.291 hingga 0.874 menunjukkan bahwa besarnya koefisien tahanan pada $m = 2.469$ % dan $m = 3.048$ % memiliki kecenderungan yang sama (besar koefisien yang terjadi hampir sama). Namun pada $Fn = 1.166$ sudah menunjukkan besarnya kenaikan. Untuk $Fn = 0.291$ hingga 0.874 memiliki kecenderungan yang sama pada $m = 2.469$ % dan $m = 3.048$ %. Adanya perbedaan kecil tersebut dapat dikarenakan perbedaan jumlah elemen yang terpakai untuk model berbeda. Namun kerapatan untuk model kapal tetap (jumlah elemen dan kerapatan sekitar model badan kapal tetap). Maka untuk $m = 3.048$ % masih memenuhi besaran maksimum yang diijinkan untuk $Fn = 0.874$. Sehingga batas maksimum koefisien

blockage yang memenuhi pada $F_n = 0.874$ menggunakan $m = 3.048$ %.

Sedangkan untuk $F_n = 1.166$, koefisien *blockage* yang terpakai $m = 2.469$ %.

4.4. Validasi Hasil

Validasi dilakukan dengan membandingkan dari formula pendekatan program yang dilakukan oleh Durgun dan Kafali [1991]. Dengan menggunakan persamaan 2.23. dan estimasi koefisien A, B, C pada tabel 2.2, ukuran tangki laboratorium yang dipakai akan didapatkan besarnya kenaikan kecepatan yang timbul.

Ukuran tangki yang terpakai dengan lebar 3 m dan kedalaman 1.8 m. Sehingga pemakaian koefisien yang diambil menggunakan pendekatan persamaan regresi poninomial koefisien tersebut menjadi sebagai berikut (perhitungan lengkap dapat dilihat pada Lampiran):

$$A_1 \rightarrow A_1 = -0.0316x^3 + 0.2835x^2 + 0.1376x + 1.4801$$

$$A_2 \rightarrow A_2 = 0.0266x^5 - 0.2592x^4 + 0.8956x^3 - 1.3787x^2 + 1.0746x - 2.2272$$

$$A_3 \rightarrow A_3 = -0.0284x^4 + 0.252x^3 - 0.6372x^2 + 0.1544x + 2.2997$$

$$B_1 \rightarrow B_1 = 0.3078x^3 - 7.8411x^2 - 1.8743x - 2.3631$$

$$B_2 \rightarrow B_2 = -0.1702x^3 + 3.7196x^2 + 21.427x + 3.6051$$

$$B_3 \rightarrow B_3 = -0.2891x^3 - 1.9039x^2 - 10.6x - 4.5589$$

$$C_1 \rightarrow C_1 = 6.9293x^3 + 86.724x^2 - 38.818x + 15.556$$

$$C_2 \rightarrow C_2 = 7.8981x^3 - 283.91x^2 + 82.787x - 34.105$$

$$C_3 \rightarrow C_3 = -0.8452x^3 + 207.2x^2 - 51.208x + 24.841$$

Sehingga untuk $w/h = 3/1.8$ sebagai koefisien x didapatkan

A ₁	B ₁	C ₁	A ₂	B ₂	C ₂	A ₃	B ₃	C ₃
1.4801	-2.3631	15.556	-2.2272	3.6051	-34.105	2.2997	-4.5589	24.841

Tabel 4.8 Koefisien tipe tangki w/h = 3/1.8

Dengan menggunakan persamaan 2.23 [formula simulasi komputer Durgun dan Kafali 1991] akan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan besarnya tambahan kecepatan pada masing-masing angka perbandingan blockage. Untuk lebih jelasnya dapat kita baca di Tabel 4.9.

Luasan model	Kecepatan	lebar tangki	kedalaman tangki	blockage ratio	tambahan kecepatan	Depth Froude
	[m/dt]	[m]	[m]	(%)	[m/dt]	number
0.1333	1.0	3	1.8	0.02469	0.043079	0.2380
0.1333	2.0	3	1.8	0.02469	0.094962	0.4759
0.1333	3.0	3	1.8	0.02469	0.194532	0.7139
0.1333	4.0	3	1.8	0.02469	0.689016	0.9519
0.1333	1.0	2.7	1.62	0.03048	0.051365	0.2508
0.1333	2.0	2.7	1.62	0.03048	0.116913	0.5017
0.1333	3.0	2.7	1.62	0.03048	0.257448	0.7525
0.1333	4.0	2.7	1.62	0.03048	-	1.0034
0.1333	1.0	2.55	1.53	0.03417	0.056431	0.2581
0.1333	2.0	2.55	1.53	0.03417	0.130962	0.5162
0.1333	3.0	2.55	1.53	0.03417	0.302349	0.7744
0.1333	4.0	2.55	1.53	0.03417	-	1.0325
0.1333	1.0	2.4	1.44	0.03858	0.062296	0.2661
0.1333	2.0	2.4	1.44	0.03858	0.147816	0.5321
0.1333	3.0	2.4	1.44	0.03858	0.361798	0.7982
0.1333	4.0	2.4	1.44	0.03858	-	1.0643

Tabel 4.9 Tambahan kecepatan untuk w/h = 3/1.8

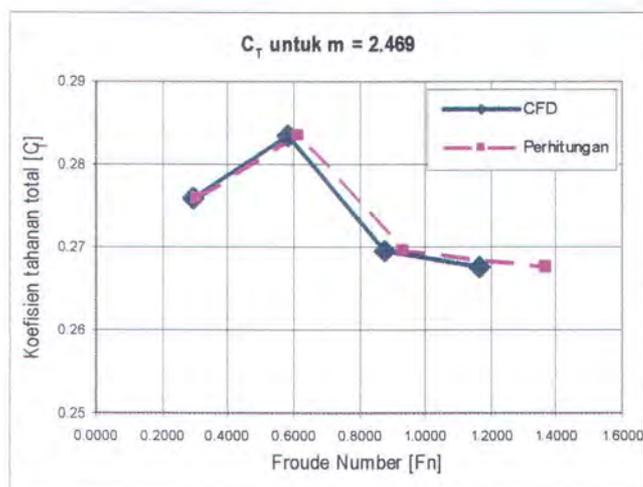
Besarnya tambahan kecepatan dari Tabel 4.9 akan dikonversikan kembali menjadi $u + \Delta u$. Dari hasil tersebut akan diperoleh besarnya angka Froude model dari kecepatan model u yang berubah menjadi $u + \Delta u$. Perbandingan antara hasil CFD dengan percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.7 hingga 4.10.

Validasi hasil dinyatakan dengan koreksi kesalahan dan kecenderungan kurva yang terjadi pada percobaan dengan menggunakan ANSYS 5.7 (Tabel 4.10 ~ Tabel 4.13)

$$\text{Koreksi} = \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil CFD}}{\text{Hasil CFD}} \times 100\%$$

m = 2.469	
C_T	Koreksi
0.27588	4.13
0.28349	4.53
0.26958	6.09
0.26744	14.69

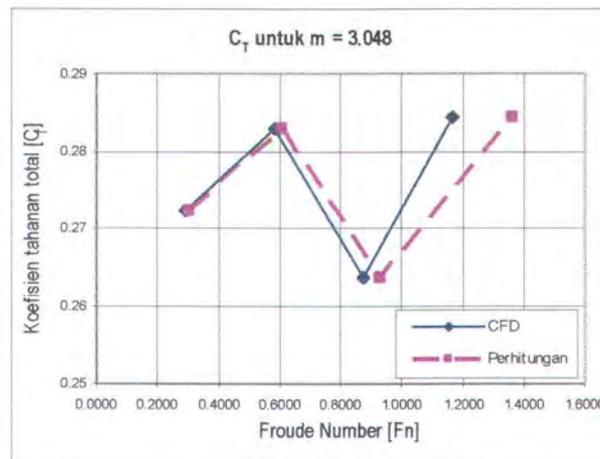
Tabel 4.10 Koreksi kecepatan untuk $m = 2.469$



Gambar 4.7 Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil perhitungan untuk $m=2.469$ %

m = 3.048	
C_T	Koreksi
0.27233	4.89
0.28297	5.52
0.26385	7.90
0.28437	-

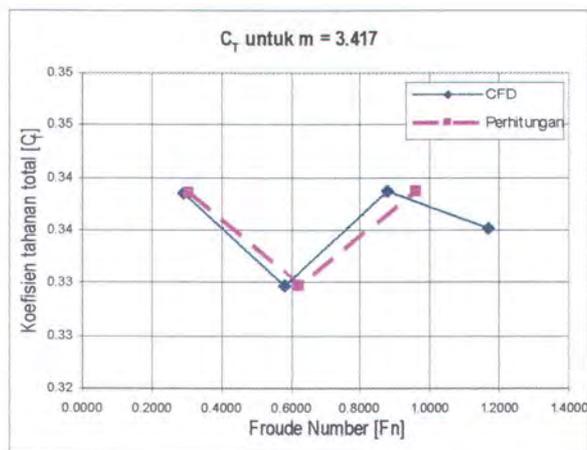
Tabel 4.11 Koreksi kecepatan untuk m = 3.048



Gambar 4.8 Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil perhitungan untuk m=3.048 %

m = 3.417	
C_T	Koreksi
0.33857	5.34
0.32966	6.15
0.33877	9.16
0.33525	-

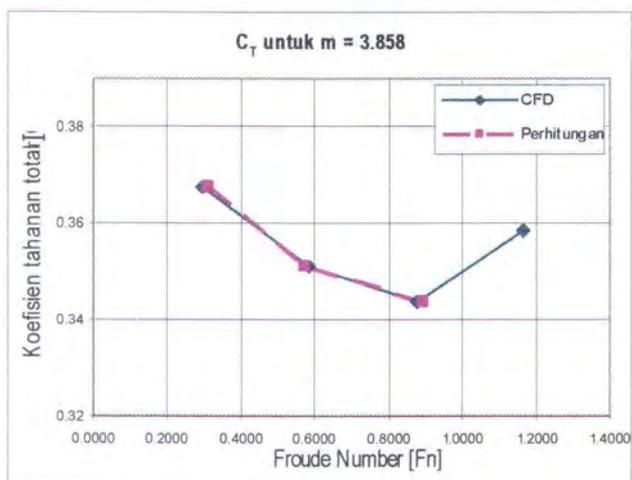
Tabel 4.12 Koreksi kecepatan untuk m = 3.417



Gambar 4.9 Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil perhitungan untuk $m=3.417\%$

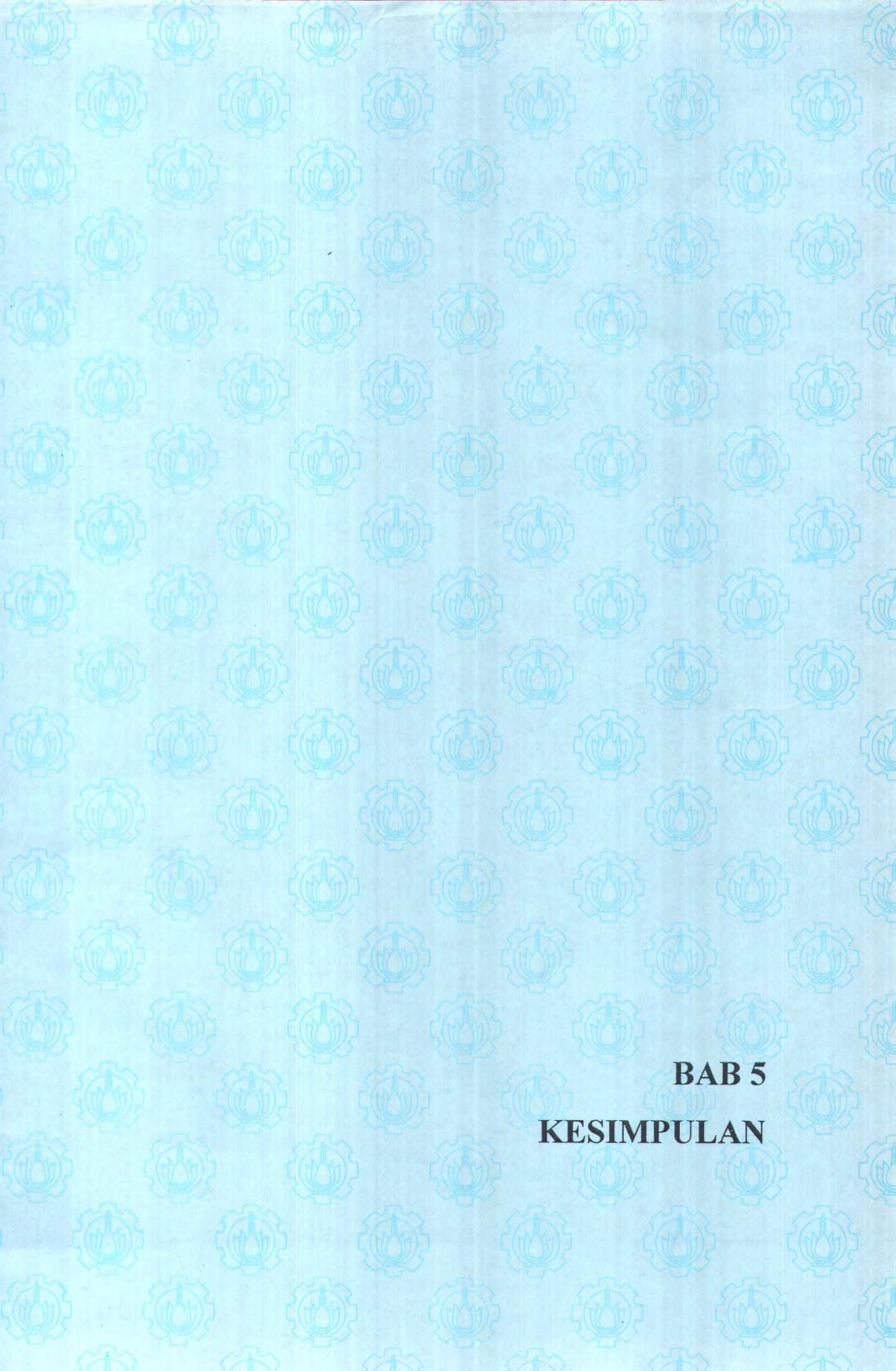
m = 3.858	
C _T	Koreksi
0.36743	5.86
0.35092	-2.01
0.34363	2.24
0.35831	-

Tabel 4.13 Koreksi kecepatan untuk $m = 3.858$



Gambar 4.10 Kurva perbandingan antara hasil ANSYS CFD dan hasil perhitungan untuk $m=3.858\%$

Dari koreksi yang didapat pada Tabel 4.10 hingga Tabel 4.13 prosentase kesalahan yang didapat cukup besar dan untuk C_T yang tinggi (dihasilkan dari angka kedalaman Froude lebih dari satu). Hal ini diakibatkan oleh pemodelan yang berbeda dimana pemodelan oleh CFD berbentuk persegi sedangkan persamaan yang dipakai untuk pendekatan model elips. Hal lain yang mungkin terjadi meshing yang kurang baik, pendekatan penyelesaian yang kurang optimum untuk semua kasus dimana persamaan yang dipakai hanya akan bernilai real untuk angka kedalaman Froude kurang dari satu.



BAB 5
KESIMPULAN

BAB 5

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Dari pemodelan yang dilakukan dengan perangkat lunak Flotran CFD ANSYS 5.7 melalui pendekatan aliran tiga dimensi untuk pendekatan model kapal dan simulasi ukuran tangki percobaan dengan berbagai variasi kecepatan menunjukkan bahwa:

1. Koefisien perbandingan blockage yang tinggi pada batas tertentu akan menimbulkan penambahan kecepatan pada model kapal.
2. Untuk menghindari penambahan kecepatan yang tidak diinginkan, sebaiknya pemakaian model menghindari koefisien perbandingan blockage maksimal yang dihasilkan dari penelitian.
3. Koefisien perbandingan blockage maksimal sebesar 2.469 % dan 3.048 % memenuhi untuk kecepatan hingga 3.0 m/dt.
4. Untuk kecepatan 4.0 m/dt ratio blockage yang memenuhi adalah sebesar 2.469 %.
5. Penambahan kecepatan yang timbul akibat dari Blockage Effect yang terjadi untuk penambahan sebesar 12 % ukuran luasan adalah 3.74 ~ 5.04 %.

5.2. Saran kedepan

Dalam penelitian yang dilakukan menunjukkan kecenderungan angka ratio blockage yang sama untuk beberapa kecepatan. Dimana besarnya kecepatan yang

berbeda seharusnya menunjukkan besarnya ratio blockage yang berbeda (meskipun nilainya relatif kecil). Oleh karena itu untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk memperkecil interval perubahan koefisien perbandingan blockage, sehingga hasil yang didapatkan lebih presisi. Untuk lebih baiknya jika percobaan dilakukan di Laboratorium akan menghasilkan nilai perbandingan yang lebih terutama karena bentuk model kapal dibagian haluan memiliki sudut masuk tertentu. Dalam hal ini efek lain yang mungkin terjadi karena ledakan pada bagian haluan dapat dihindari.



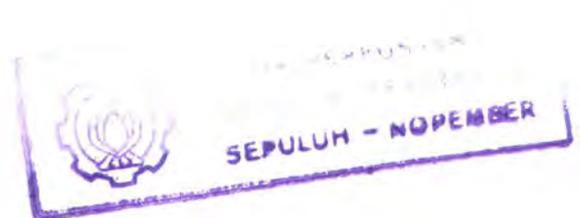
DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- ANDERSON Jr, JD, 1995. Computational Fluid Dynamics. The Basic with Applications. McGraw-hill International Editions, Singapore.
- BAI, K.J. 1978. A localized finite-element method for two dimensional steady potential flows with a free surface. J. ship Res. 22. 216-230.
- BAI, K.J. 1979. Blockage correction with a free surface. J. Fluid Mech. 94. 433-452.
- DURGUN, O and KAFALI, K, 1991. Blockage Correction. Pergamon Press plc, pp 269-282.
- ESDU, 1980. Blockage Correction for Bluff Bodies in Confined Flows. pp 1-41.
- HAVELOCK, T.H. 1943. The approximate calculation of wave resistance at high speeds. North East Coast Institute of Engineers and Shipbuilders, pp. 47-58.
- HERRIOT, J. G., 1950. Blockage corrections for three-dimensional-flow closed-throat wind tunnels, NACA Report 995.
- HUGHES, G. 1957. The effect of model and tank size in two series of resistance test. Royal Institute of Naval Architects, pp. 68-69.
- HUGHES, G. 1961. The boundary effect on model resistance. Royal Institute of Naval Architects, pp. 420-440.
- KOHNKE, P., 1998. Ansys Theory Reference Release 5.4., SAS IP, Inc., Philadelphia.
- KOSTYUKOV, A.A. 1968. Theory of Ship wave Resistance. Effective Communications, Iowa.
- LAMB, H. 1929, On the effect of the walls of an experimental tank on the resistance of a model. British ARC, R. and M. (No. 1010)
- LOCK, M. 1929. The Interference of a wind tunnel on a symmetrical body, British ARC, R. and M. (No. 1275).

- LUNDE, J.K. 1951. On the laminar theory of wave resistance of displacement ships in steady and accelerated motion. The society of Naval Architects and Marine Engineers, pp. 25-85
- MEI, C.C. and CHEN, H.S. 1976. A hybrid element method for steady linearised free surface flows. Int. J. Numerical Methods Engineering 10. 1153-1175
- MURDIJANTO, 1995. Hidrodinamika. Diktat Kuliah. Jurusan Teknik Perkapalan, FTK-ITS.
- NEWMAN, J.N. 1977. Blockage with a free surface. J. Ship Resistance 21. 199-203.
- NEWMAN, J.N. 1980. Marine Hydrodynamics. The MIT Press.
- ROSSEL, H.E. 1962. Principal of Naval Architecture. Sname.
- SISWANTO, D. dan ADRIANTO, P. 1996. Analisa Blockage Effect Model Kapal Patroli FPSR seri II pada Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Laporan Penelitian.
- SCOTT, J.R. 1966a. A shallow water speed corrector. Royal Institute of Naval Architects, pp. 431-444.
- SCOTT, J.R. 1966b. A Blockage corrector. Royal Institute of Naval Architects, pp. 153-163.
- SCOTT, J.R. 1970. On Blockage corrector and extrapolation to smooth ship resistance. The society of Naval Architects and Marine Engineers, pp. 288-326.
- SCOTT, J.R. 1976. Blockage corrector at sub-critical speeds. Royal Institute of Naval Architects, pp. 169-179.
- TAMURA, K. 1972. Study of blockage correction. Society of Naval Architects of Japan.
- TELFER, E.V. 1953. Ship-model correction and tank wall effect. North East Coast Institute of Engineers and shipbuilders, pp. 19-44.
- TUCK, E.O. 1964. A systematic asymptotic expansion procedure for slender ships. J. Ship Res. 8. 15-23
- TUCK, E.O. 1966. Shallow water flows past slender bodies. J. Fluid mech. 66. 81-95.

- TUCK, E.O. 1967. Shrinkage and trim in shallow water of finite width. Schiffstechnik Bd 14. 92-94.
- WIGLEY, W.C.S. 1949. L'etat actuel des calculs de resistance de vagues. Bull. Assoc. Tech. Mar. Aero. 513-545.
- YOUNG, A.D. and SQUIRE, H. B. 1945. Blockage correction in a closed rectangular tunnel. British ARC, R. and M. (No. 1984)





LAMPIRAN

Fn =		PCOE			TAUW		
0.2915		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	25.8639	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0011	0.0063
	2	4.0983	0.0000	2.4590	0.0265	-0.0001	-0.0442
	3	0.0000	0.0000	-43.4113	0.1630	-0.0001	0.0000
	4	67.7241	0.0000	-40.6345	0.0168	0.0002	0.0280
	5	50.6308	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0004	0.0150
	6	0.0000	42.2169	-21.1084	0.1667	-0.0100	-0.0200
	7	0.0000	35.5287	0.0000	0.1011	0.0000	-0.0003
	8	0.0000	-42.6329	-21.3164	0.1683	0.0096	-0.0192
	9	0.0000	-35.3940	0.0000	0.1057	0.0000	0.0020
$\Sigma =$	148.3171	-0.2814	-124.0116	0.7482	-0.0019	-0.0324	
Int.	193.33116			0.10572			
R =	193.43687						

Tabel A.1. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 2.469\%$, $F_n = 0.2915$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.5829		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	29.6902	0.0000	0.0000	0.0000	0.0016	-0.0014
	2	10.7462	0.0000	6.4477	0.0196	0.0033	-0.0326
	3	0.0000	0.0000	-43.0725	0.1293	-0.0007	0.0000
	4	60.7734	0.0000	-36.4641	0.0315	0.0041	0.0525
	5	51.1833	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0094	0.0232
	6	0.0000	44.4156	-22.2078	0.1606	-0.0105	-0.0210
	7	0.0000	35.2268	0.0000	0.0745	0.0000	-0.0033
	8	0.0000	-38.8436	-19.4218	0.1513	0.0043	-0.0086
	9	0.0000	-32.3890	0.0000	0.0850	0.0000	-0.0026
$\Sigma =$	152.3931	8.4098	-114.7184	0.6518	-0.0073	0.0062	
Int.	190.93114			0.65191			
R =	191.58305						

Tabel A.2. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 2.469\%$, $F_n = 0.5829$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.8744		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	28.6840	0.0000	0.0000	0.0000	0.0026	0.0008
	2	3.6845	0.0000	2.2107	0.0295	0.0004	-0.0491
	3	0.0000	0.0000	-47.5763	0.1853	0.0015	0.0000
	4	82.2192	0.0000	-49.3315	0.0217	-0.0062	0.0362
	5	76.2909	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0148	0.0203
	6	0.0000	46.6595	-23.3298	0.1829	-0.0104	-0.0207
	7	0.0000	41.4270	0.0000	0.1033	0.0000	-0.0016
	8	0.0000	-46.1265	-23.0633	0.1838	0.0111	-0.0221
	9	0.0000	-39.6460	0.0000	0.1011	0.0000	-0.0033
$\Sigma =$	190.8786	2.3140	-141.0901	0.8075	-0.0159	-0.0397	
Int.	237.37397			0.80866			
R =	238.18263						

Tabel A.3. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 2.469 \%$, $F_n = 0.8744$

Fn =		PCOE			TAUW		
1.1658		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	30.2472	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	-0.0024
	2	4.6443	0.0000	2.7866	0.0297	-0.0002	-0.0495
	3	0.0000	0.0000	-49.5533	0.1811	0.0007	0.0000
	4	88.0253	0.0000	-52.8152	0.0219	0.0001	0.0365
	5	88.3147	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030	0.0229
	6	0.0000	48.3829	-24.1914	0.1792	-0.0334	
	7	0.0000	42.2015	0.0000	0.0964	0.0000	-0.0030
	8	0.0000	-47.6961	-23.8480	0.1786	0.0119	-0.0238
	9	0.0000	-40.6960	0.0000	0.0917	0.0000	-0.0054
$\Sigma =$	211.2316	2.1922	-147.6213	0.7786	-0.0173	-0.0247	
Int.	257.71233			0.77919			
R =	258.49152						

Tabel A.4. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 2.469 \%$, $F_n = 1.1658$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.2915		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	112.02046	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00458	-0.00073
	2	12.07180	0.00000	7.24308	0.09968	-0.00034	-0.16613
	3	0.00000	0.00000	-176.28608	0.59758	0.00020	0.00000
	4	272.06676	0.00000	-163.24006	0.06656	0.00398	0.11093
	5	218.21497	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00307	0.05453
	6	0.00000	171.88538	-85.94269	0.60694	-0.03596	-0.07192
	7	0.00000	151.24366	0.00000	0.29676	0.00000	-0.01058
	8	0.00000	-173.16758	-86.58379	0.60941	0.03626	-0.07252
	9	0.00000	-153.94476	0.00000	0.30064	0.00000	-0.00855
$\Sigma =$	614.3740	-3.9833	-504.8095	2.5776	-0.0035	-0.1650	
Int.	795.17541			2.58285			
R =	797.75826						

Tabel A.5. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.2915$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.5829		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	117.5269	0.0000	0.0000	0.0000	0.0082	0.0067
	2	41.2057	0.0000	24.7234	0.0708	0.0108	-0.1181
	3	0.0000	0.0000	-175.2749	0.4762	-0.0034	0.0000
	4	233.6174	0.0000	-140.1704	0.1133	0.0101	0.1888
	5	178.6081	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0104	0.1015
	6	0.0000	179.7385	-89.8692	0.5932	-0.0385	-0.0770
	7	0.0000	147.7161	0.0000	0.2881	0.0000	-0.0083
	8	0.0000	-156.5682	-78.2841	0.5599	0.0150	-0.0300
	9	0.0000	-135.7858	0.0000	0.3300	0.0000	-0.0028
$\Sigma =$	570.9581	35.1006	-458.8752	2.4315	-0.0084	0.0608	
Int.	733.34284			2.43226			
R =	735.77510						

Tabel A.6. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.5829$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.8744		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	111.3132	0.0000	0.0000	0.0000	0.0047	0.0307
	2	16.0358	0.0000	9.6215	0.1092	-0.0012	-0.1819
	3	0.0000	0.0000	-188.4970	0.6851	-0.0040	0.0000
	4	322.6225	0.0000	-193.5735	0.0597	-0.0382	0.0995
	5	288.4471	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0381	0.0393
	6	0.0000	180.7280	-90.3640	0.6750	-0.0381	-0.0763
	7	0.0000	158.5533	0.0000	0.4016	0.0000	0.0030
	8	0.0000	-187.1384	-93.5692	0.6825	0.0359	-0.0719
	9	0.0000	-163.8940	0.0000	0.4002	0.0000	-0.0002
$\Sigma =$	738.4185	-11.7511	-556.3823	3.0132	-0.0791	-0.1579	
Int.	924.64113			3.01841			
R =	927.65954						

Tabel A.7. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.8744$

Fn =		PCOE			TAUW		
1.1658		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	120.089	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003
	2	17.622	0.000	10.573	0.109	0.000	-0.182
	3	0.000	0.000	-196.614	0.662	-0.002	0.000
	4	339.479	0.000	-203.687	0.070	0.012	0.117
	5	317.926	0.000	0.000	0.000	0.040	0.070
	6	0.000	190.541	-95.271	0.663	-0.044	-0.087
	7	0.000	163.039	0.000	0.356	0.000	-0.011
	8	0.000	-191.458	-95.729	0.664	0.042	-0.084
	9	0.000	-163.604	0.000	0.354	0.000	-0.011
$\Sigma =$	795.1165	-1.4822	-580.7279	2.8781	0.0498	-0.1855	
Int.	984.61024			2.88448			
R =	987.49472						

Tabel A.8. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.048 \%$, $F_n = 1.1658$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.2915		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	249.3991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	-0.0054
	2	24.8545	0.0000	14.9127	0.2138	0.0007	-0.3564
	3	0.0000	0.0000	-395.5683	1.2732	0.0015	0.0000
	4	582.9208	0.0000	-349.7525	0.1202	0.0111	0.2003
	5	425.0910	0.0000	0.0000	0.0000	0.0250	0.1020
	6	0.0000	388.2245	-194.1123	1.2921	-0.0749	-0.1498
	7	0.0000	346.9938	0.0000	0.6257	0.0000	-0.0178
	8	0.0000	-387.5001	-193.7501	1.2931	0.0754	-0.1509
	9	0.0000	-349.2766	0.0000	0.6463	0.0000	-0.0151
$\Sigma =$	1282.2653	-1.5584	-1118.2705	5.4644	0.0404	-0.3930	
Int.	1701.39229			5.47863			
R =	1706.87092						

Tabel A.9. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.417 \%$, $F_n = 0.2915$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.5829		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	252.4249	0.0000	0.0000	0.0000	0.0091	0.0421
	2	98.7691	0.0000	59.2615	0.1489	0.0213	-0.2481
	3	0.0000	0.0000	-390.6822	1.0181	-0.0072	0.0000
	4	533.0147	0.0000	-319.8088	0.2315	0.0074	0.3858
	5	428.8421	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.2442
	6	0.0000	398.1314	-199.0657	1.2910	-0.0828	-0.1656
	7	0.0000	315.5890	0.0000	0.7407	0.0000	0.0019
	8	0.0000	-350.5786	-175.2893	1.2048	0.0438	-0.0875
	9	0.0000	-291.9870	0.0000	0.8193	0.0000	0.0054
$\Sigma =$	1313.0508	71.1548	-1025.5846	5.4542	-0.0050	0.1781	
Int.	1667.62977			5.45711			
R =	1673.08688						

Tabel A.10. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.417 \%$, $F_n = 0.5829$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.8744		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	246.1629	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.0470
	2	35.0279	0.0000	21.0168	0.2290	0.0009	-0.3817
	3	0.0000	0.0000	-428.5552	1.4670	0.0042	0.0000
	4	739.9437	0.0000	-443.9662	0.1511	-0.0377	0.2518
	5	699.1123	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0171	0.1365
	6	0.0000	424.0314	-212.0157	1.4585	-0.0842	-0.1684
	7	0.0000	367.0815	0.0000	0.8756	0.0000	-0.0038
	8	0.0000	-412.7700	-206.3850	1.4471	0.0847	-0.1695
	9	0.0000	-347.2193	0.0000	0.8478	0.0000	-0.0004
$\Sigma =$	1720.2468	31.1236	-1269.9054	6.4761	-0.0471	-0.2885	
Int.	2138.42877			6.48272			
R =	2144.91148						

Tabel A.11. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.417 \%$, $F_n = 0.8744$

Fn =		PCOE			TAUW		
1.1658		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	244.5298	0.0000	0.0000	0.0000	0.0055	0.0712
	2	49.3794	0.0000	29.6276	0.2155	-0.0013	-0.3592
	3	0.0000	0.0000	-441.1356	1.4253	-0.0001	0.0000
	4	743.0106	0.0000	-445.8064	0.1468	-0.0164	0.2447
	5	712.4270	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0030	0.1966
	6	0.0000	426.4505	-213.2252	1.4290	-0.0889	-0.1777
	7	0.0000	346.9002	0.0000	0.8551	0.0000	-0.0091
	8	0.0000	-424.7531	-212.3765	1.4267	0.0890	-0.1781
	9	0.0000	-346.9562	0.0000	0.8579	0.0000	-0.0122
$\Sigma =$	1749.3469	1.6414	-1282.9161	6.3564	-0.0151	-0.2237	
Int.	2169.35264			6.36039			
R =	2175.71303						

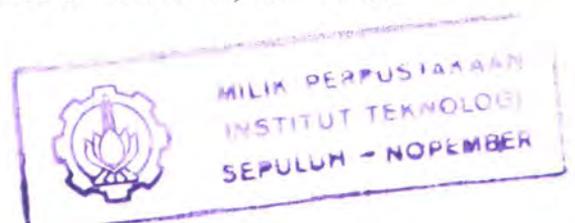
Tabel A.12. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.417 \%$, $F_n = 1.1658$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.2915		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	445.2749	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0063	-0.0005
	2	43.3919	0.0000	26.0352	0.3665	0.0012	-0.6108
	3	0.0000	0.0000	-703.6188	2.1864	-0.0046	0.0000
	4	1027.5346	0.0000	-616.5208	0.2113	-0.0100	0.3522
	5	739.8811	0.0000	0.0000	0.0000	0.0462	0.1514
	6	0.0000	688.0866	-344.0433	2.2197	-0.1310	-0.2621
	7	0.0000	607.2440	0.0000	1.0565	0.0000	-0.0425
	8	0.0000	-681.5259	-340.7630	2.2003	0.1257	-0.2514
	9	0.0000	-611.3247	0.0000	1.0825	0.0000	-0.0351
$\Sigma =$	2256.0825	2.4799	-1978.9106	9.3232	0.0212	-0.6988	
Int.	3001.00011			9.34940			
R =	3010.34952						

Tabel A.13. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.2915$

Fn =		PCOE			TAUW		
0.5829		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	451.9752	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0025	-0.0294
	2	53.6952	0.0000	32.2171	0.3760	0.0064	-0.6266
	3	0.0000	0.0000	-725.2204	2.2076	0.0031	0.0000
	4	1100.6812	0.0000	-660.4087	0.2108	0.0147	0.3513
	5	832.5456	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0607	0.1144
	6	0.0000	707.2987	-353.6494	2.1987	-0.1339	-0.2677
	7	0.0000	626.9937	0.0000	1.1481	0.0000	-0.0334
	8	0.0000	-702.3818	-351.1909	2.2067	0.1312	-0.2625
	9	0.0000	-617.8119	0.0000	1.1132	0.0000	-0.0355
$\Sigma =$	2438.8973	14.0987	-2058.2523	9.4610	-0.0417	-0.7894	
Int.	3191.36668			9.49399			
R =	3200.86066						

Tabel A.14. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.5829$



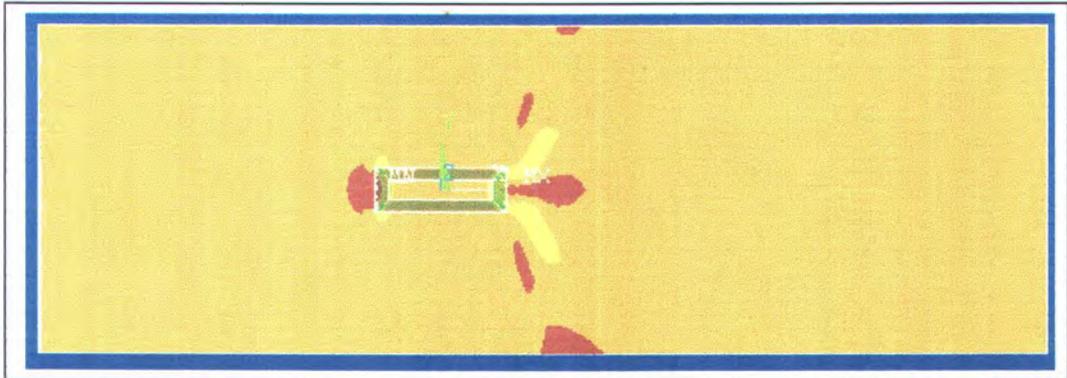
Fn =		PCOE			TAUW		
0.8744		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	453.5563	0.0000	0.0000	0.0000	0.0116	0.0250
	2	54.2661	0.0000	32.5596	0.4041	-0.0023	-0.6735
	3	0.0000	0.0000	-761.2433	2.5139	-0.0114	0.0000
	4	1306.1913	0.0000	-783.7148	0.2658	-0.0393	0.4430
	5	1201.3935	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1255	0.1700
	6	0.0000	725.4675	-362.7338	2.4568	-0.1483	-0.2965
	7	0.0000	634.5449	0.0000	1.3559	0.0000	-0.0098
	8	0.0000	-749.7509	-374.8755	2.4779	0.1450	-0.2900
	9	0.0000	-660.7646	0.0000	1.3943	0.0000	-0.0287
$\Sigma =$	3015.4071	-50.5030	-2250.0076	10.8688	-0.1701	-0.6604	
Int.	3762.68055			10.89015			
R =	3773.57070						

Tabel A.15. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.8744$

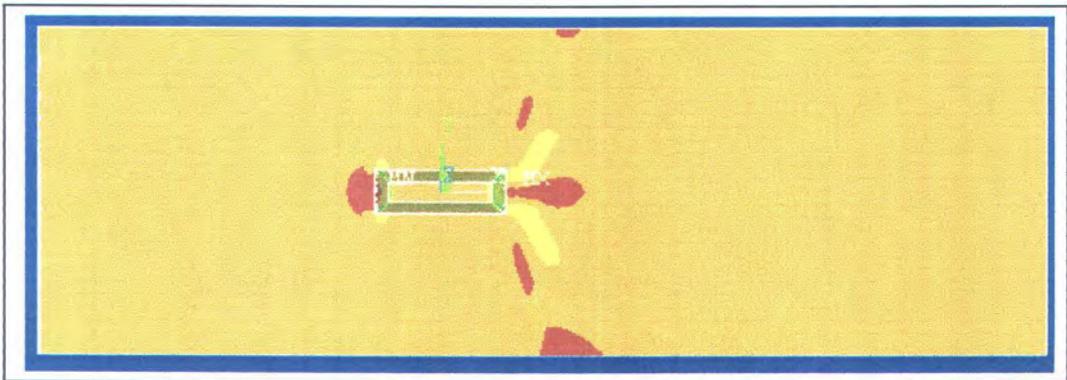
Fn =		PCOE			TAUW		
1.1658		δX	δY	δZ	δX	δY	δZ
SURFACE	1	452.1329	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0968
	2	86.1593	0.0000	51.6956	0.3776	0.0060	-0.6293
	3	0.0000	0.0000	-789.9530	2.4671	0.0040	0.0000
	4	1381.4545	0.0000	-828.8727	0.2715	0.1103	0.4524
	5	1361.3869	0.0000	0.0000	0.0000	0.1150	0.3725
	6	0.0000	754.9127	-377.4563	2.4846	-0.1543	-0.3087
	7	0.0000	623.1905	0.0000	1.4839	0.0000	-0.0179
	8	0.0000	-763.1074	-381.5537	2.4977	0.1578	-0.3156
	9	0.0000	-633.8868	0.0000	1.4944	0.0000	-0.0149
$\Sigma =$	3281.1337	-18.8910	-2326.1401	11.0768	0.2407	-0.3647	
Int.	4022.07940			11.08541			
R =	4033.16480						

Tabel A.16. Tabel hasil konvergenitas untuk $m = 3.858 \%$, $F_n = 1.1658$

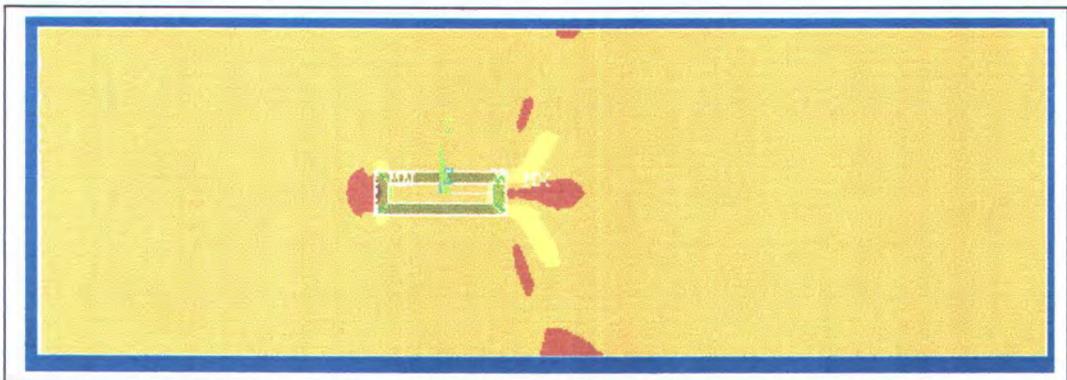
LAMPIRAN B



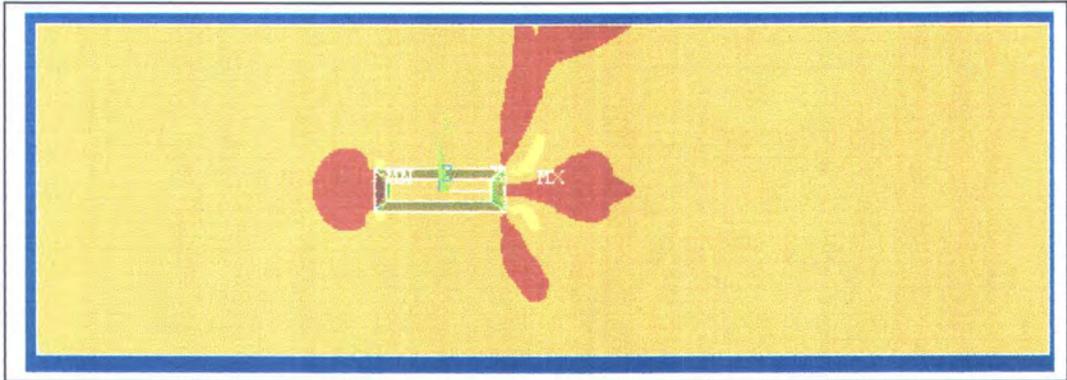
Gambar B.1. Contour Tekanan dengan $m = 2.469 \%$, $F_n = 0.291$



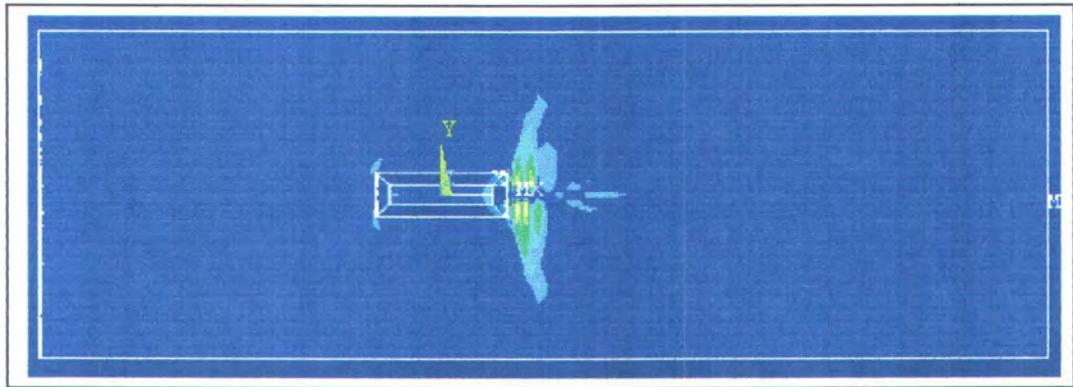
Gambar B.2. Contour Tekanan dengan $m = 2.469 \%$, $F_n = 0.583$



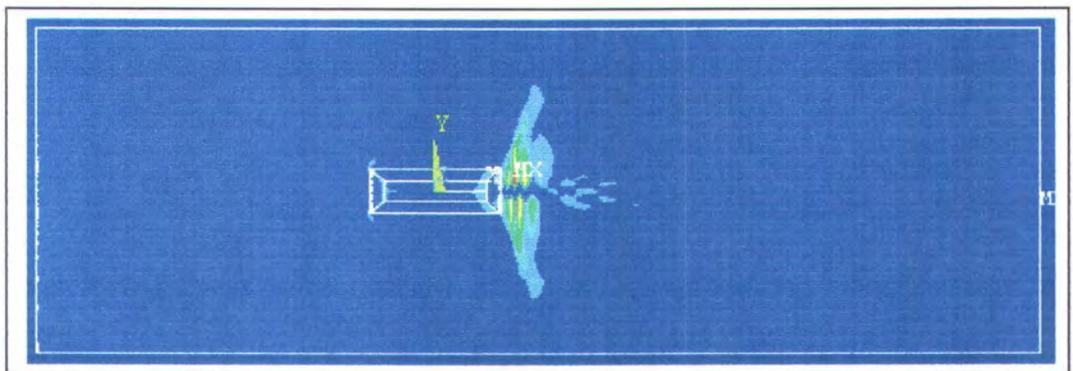
Gambar B.3. Contour Tekanan dengan $m = 0.291 \%$, $F_n = 0.874$



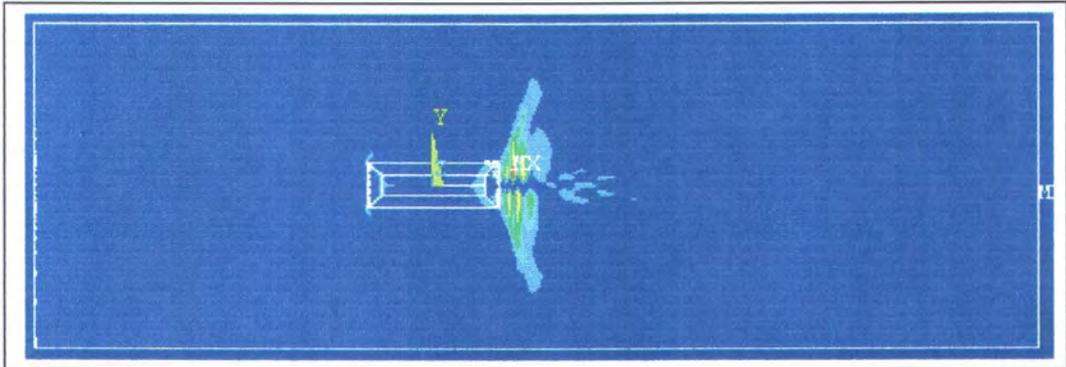
Gambar B.4. Contour Tekanan dengan $m = 2.469 \%$, $F_n = 1.1658$



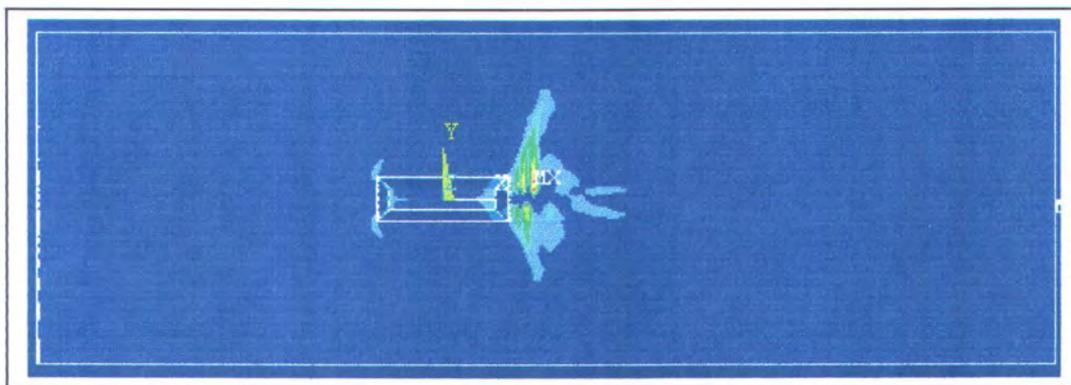
Gambar B.5. Contour Tegangan geser dengan $m = 2.469 \%$, $F_n = 0.291$



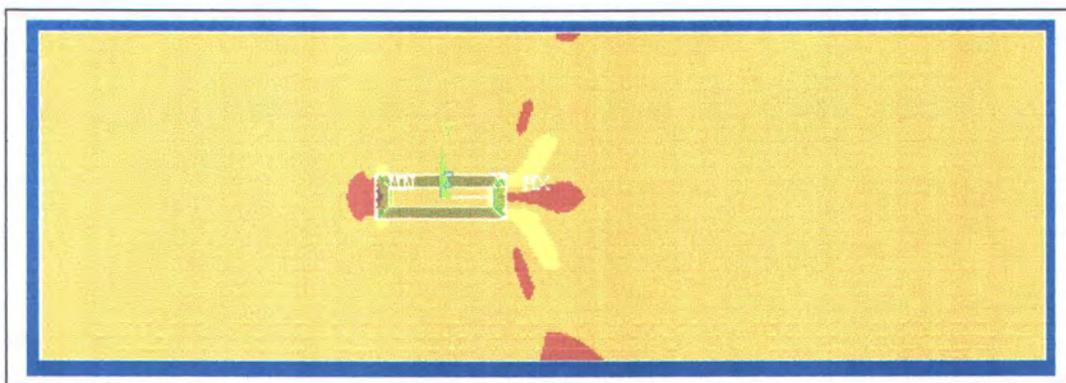
Gambar B.6. Contour Tegangan geser dengan $m = 2.469 \%$, $F_n = 0.583$



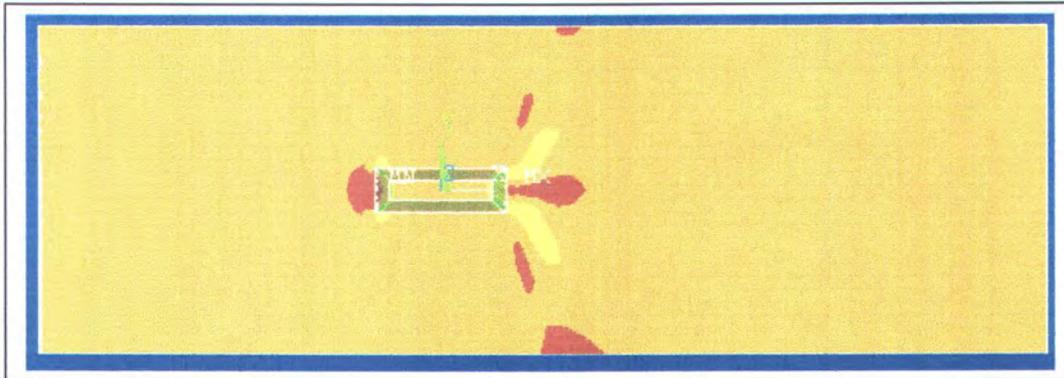
Gambar B.7. Contour Tegangan geser dengan $m = 2.469 \%$, $F_n = 0.874$



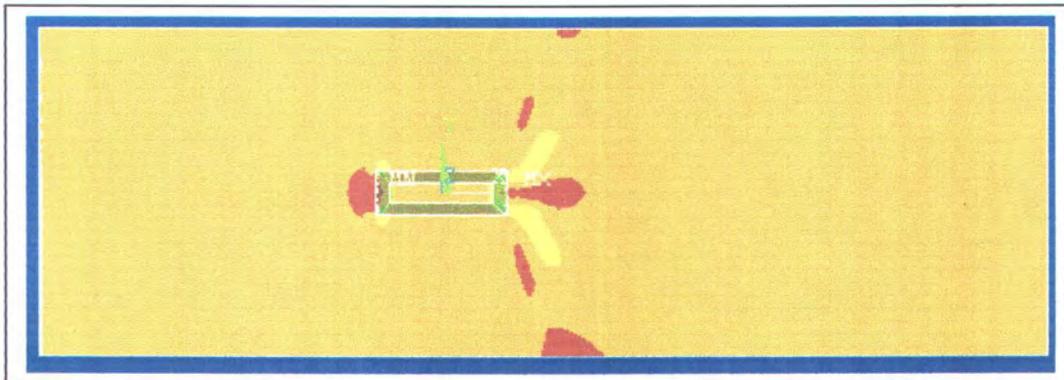
Gambar B.8. Contour Tegangan geser dengan $m = 2.469 \%$, $F_n = 1.1658$



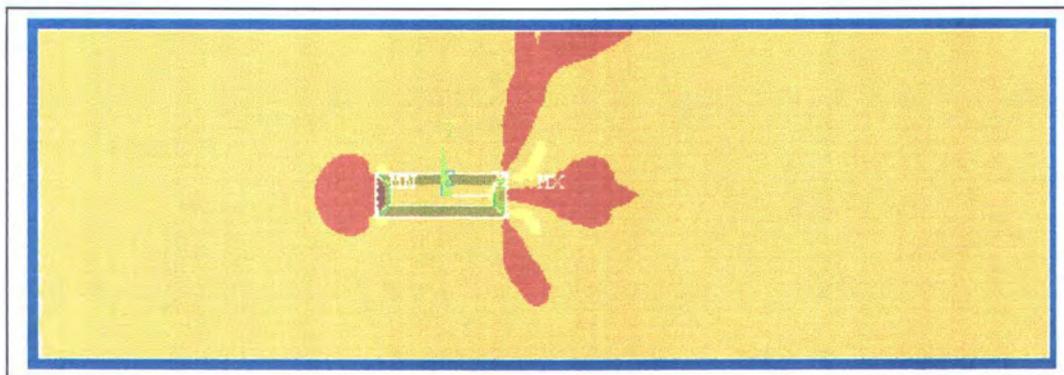
Gambar B.9. Contour Tekanan dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.291$



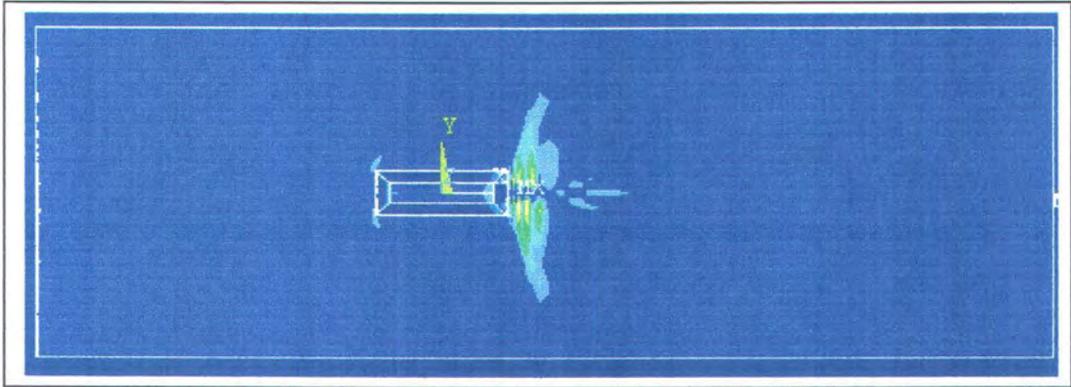
Gambar B.10. Contour Tekanan dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.583$



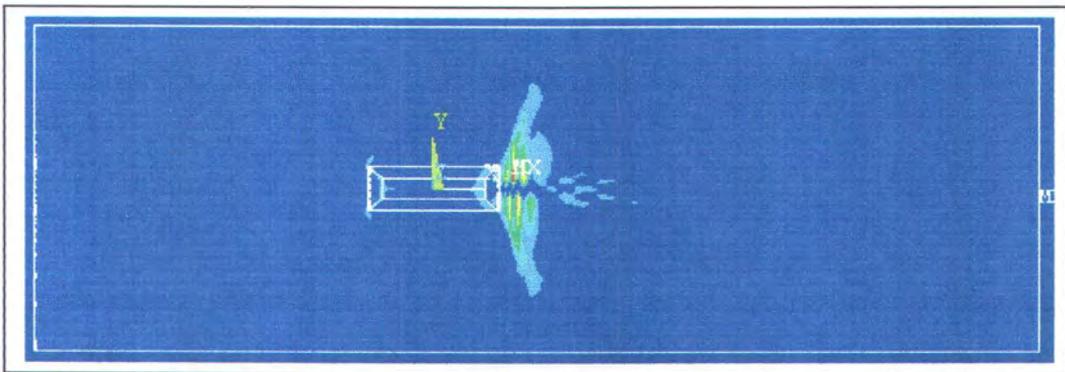
Gambar B.11. Contour Tekanan dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.874$



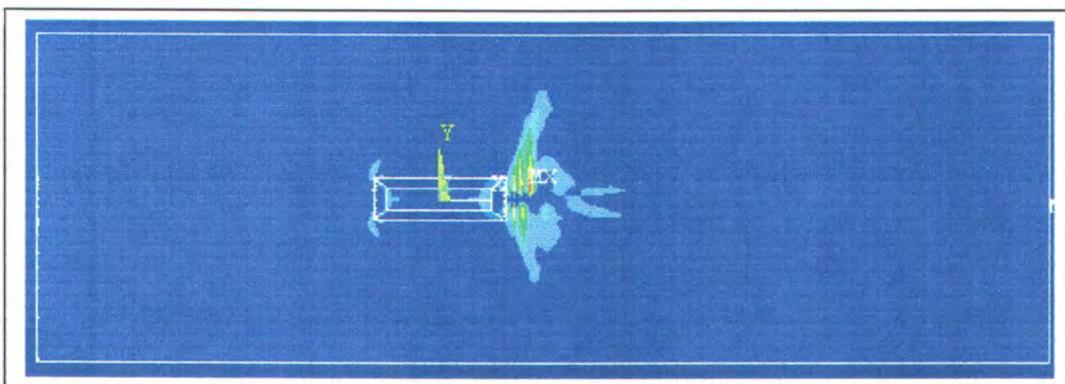
Gambar B.12. Contour Tekanan dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 1.1658$



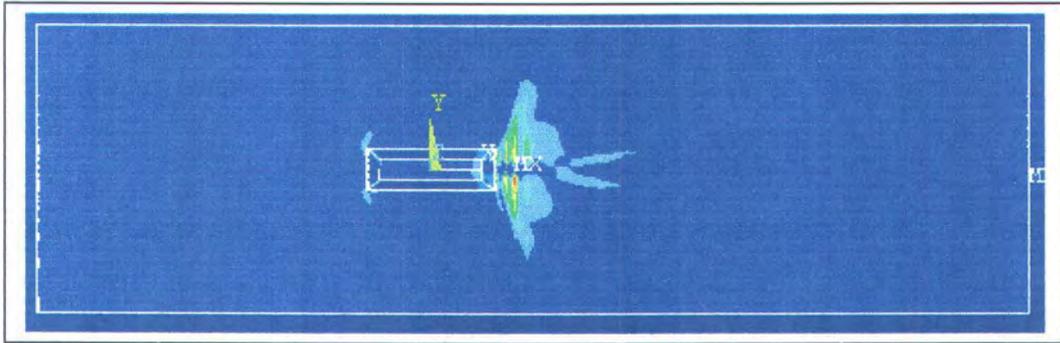
Gambar B.13. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.291$



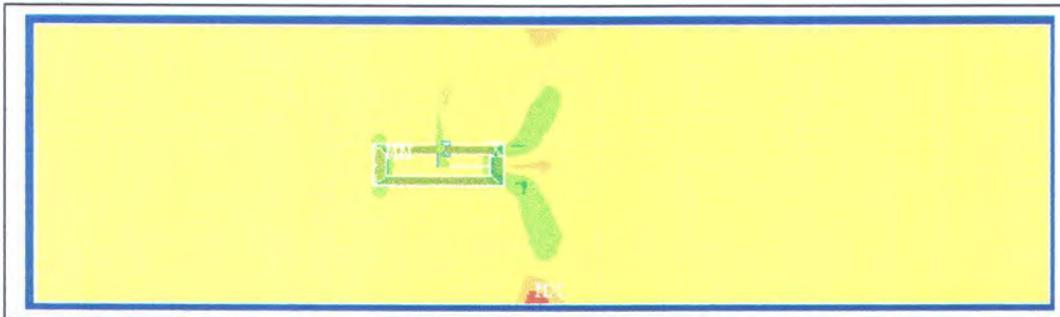
Gambar B.14. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.583$



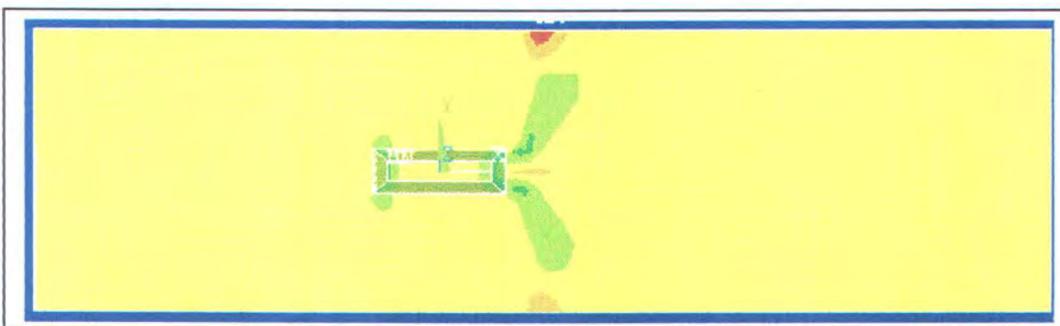
Gambar B.15. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 0.874$



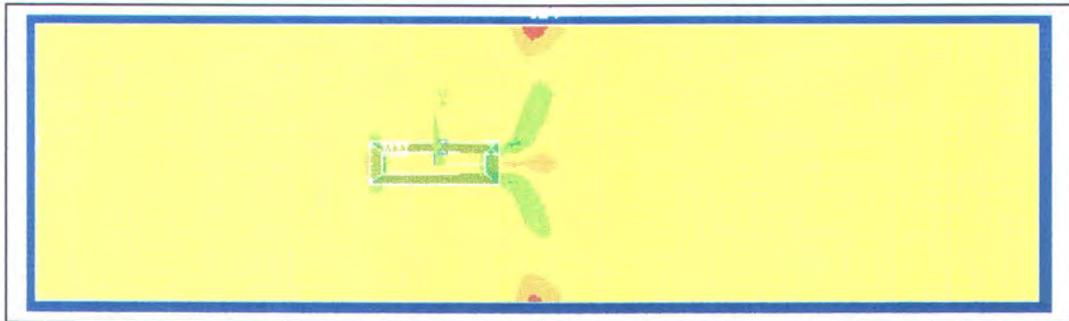
Gambar B.16. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.048 \%$, $F_n = 1.1658$



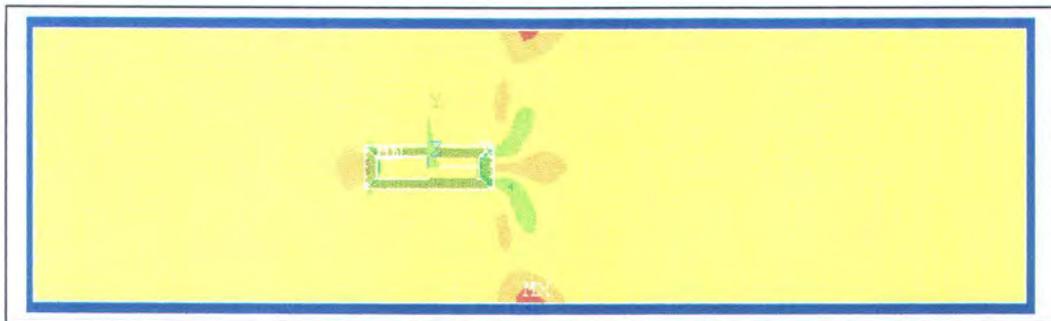
Gambar B.17. Contour Tekanan dengan $m = 3.417 \%$, $F_n = 0.291$



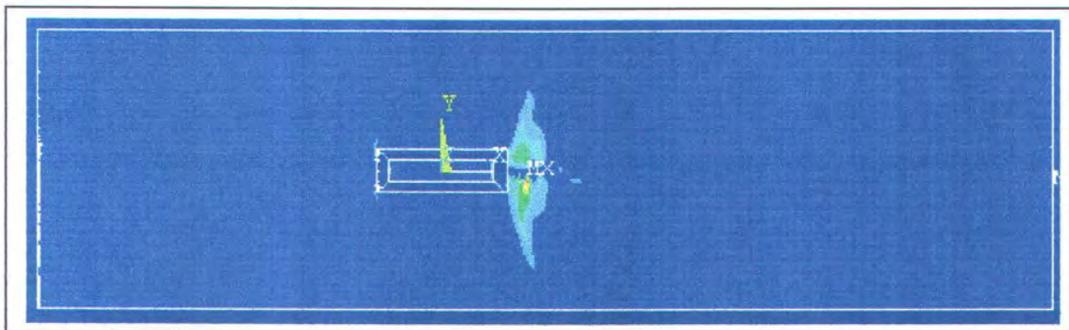
Gambar B.18. Contour Tekanan dengan $m = 3.417 \%$, $F_n = 0.583$



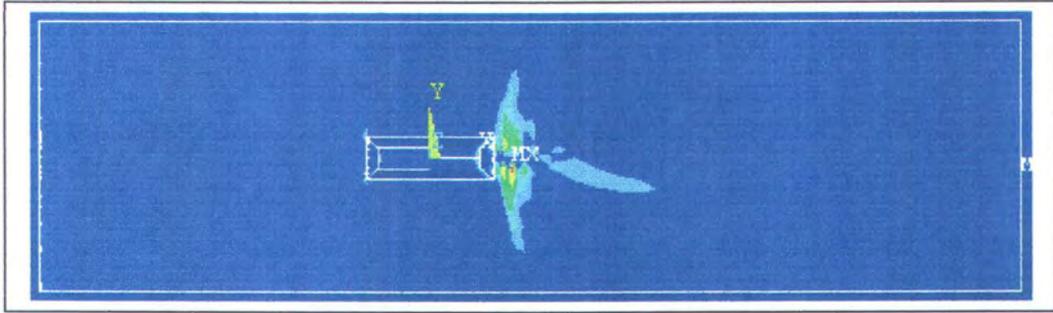
Gambar B.19. Contour Tekanan dengan $m = 3.417 \%$, $Fn = 0.874$



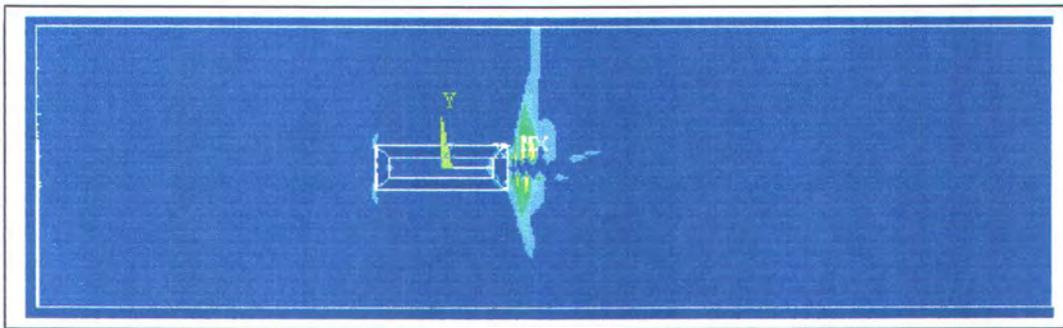
Gambar B.20. Contour Tekanan dengan $m = 3.417 \%$, $Fn = 1.1658$



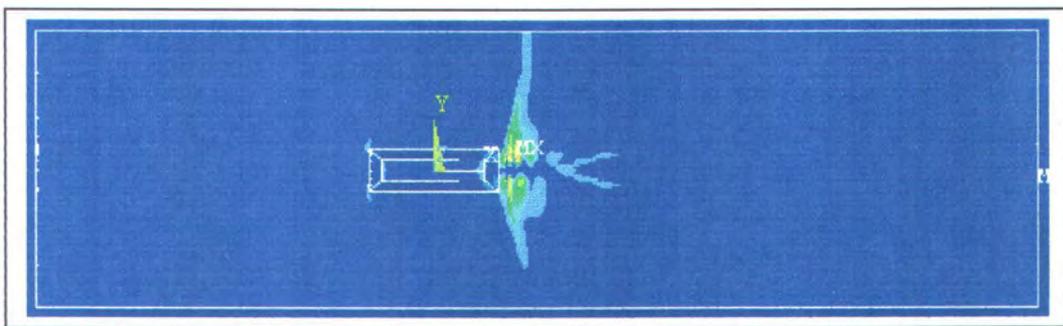
Gambar B.21. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.417 \%$, $Fn = 0.291$



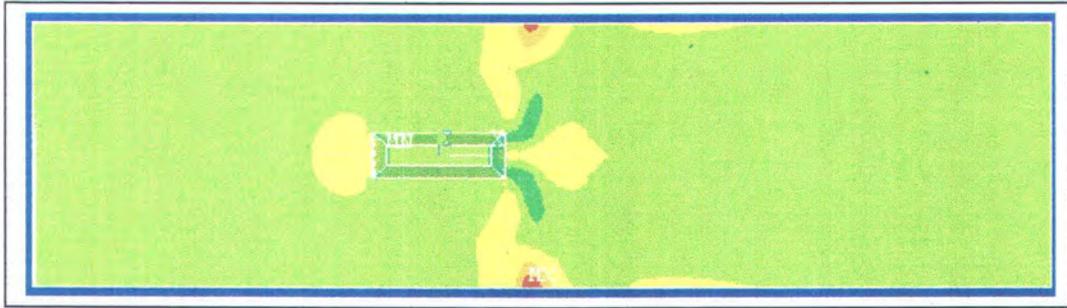
Gambar B.22. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.417\%$, $F_n = 0.583$



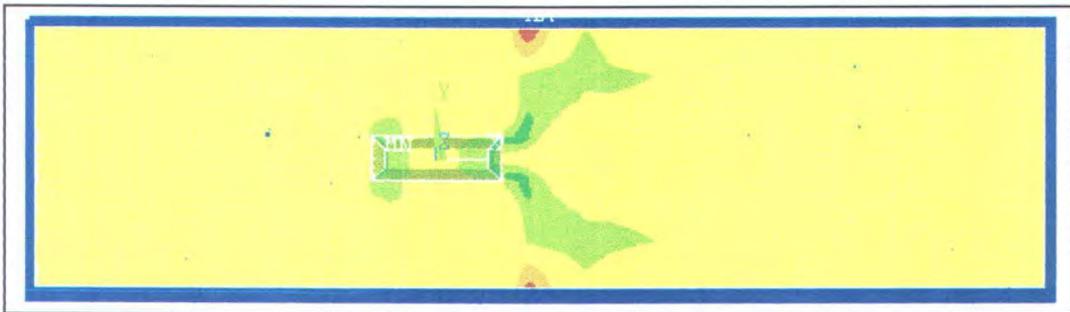
Gambar B.23. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.417\%$, $F_n = 0.874$



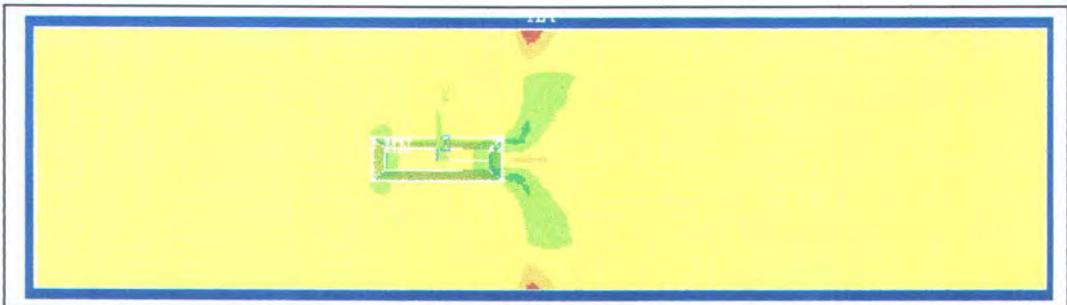
Gambar B.24. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.417\%$, $F_n = 1.1658$



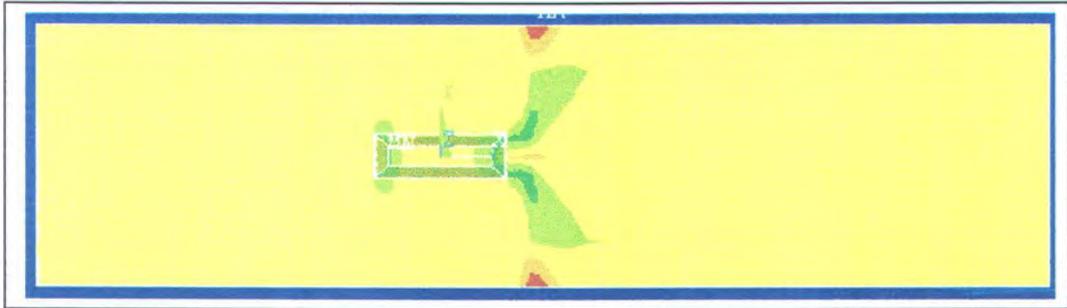
Gambar B.25. Contour Tekanan dengan $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.291$



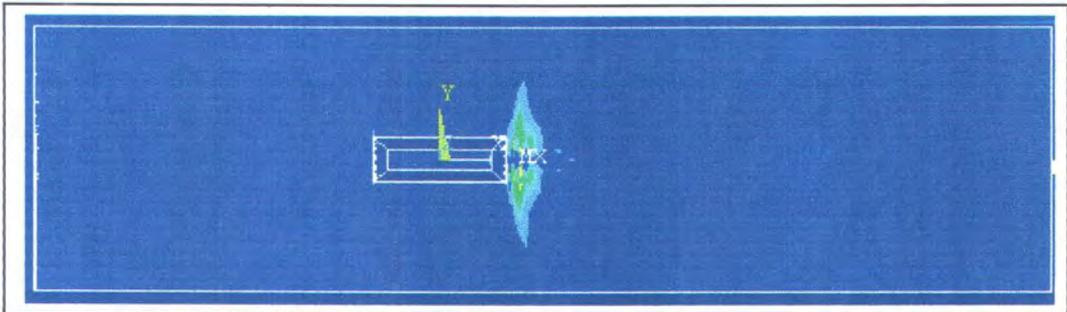
Gambar B.26. Contour Tekanan dengan $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.583$



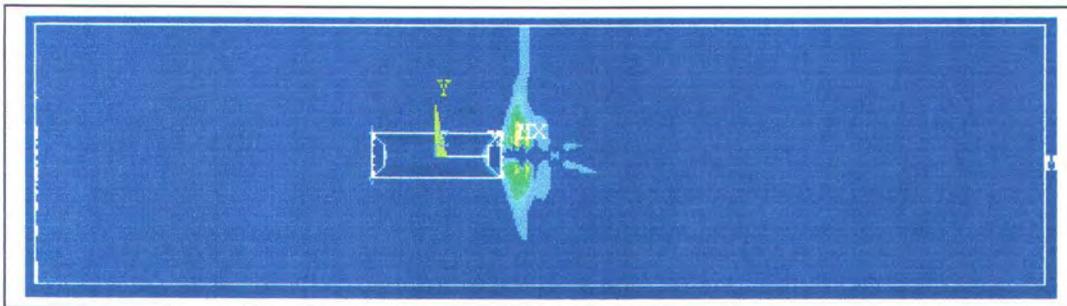
Gambar B.27. Contour Tekanan dengan $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.874$



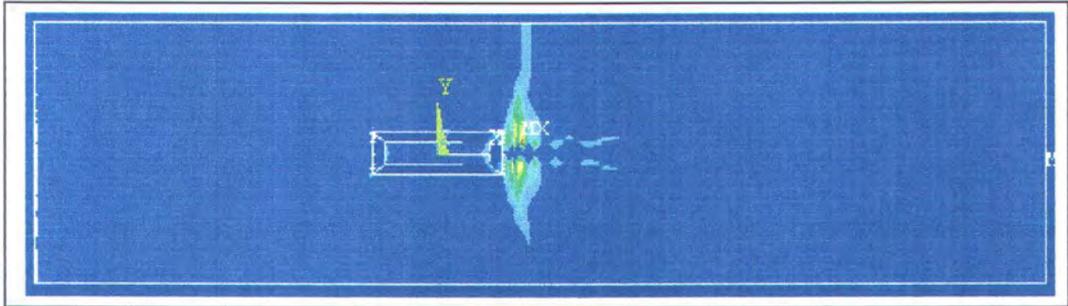
Gambar B.28. Contour Tekanan dengan $m = 3.858 \%$, $F_n = 1.1658$



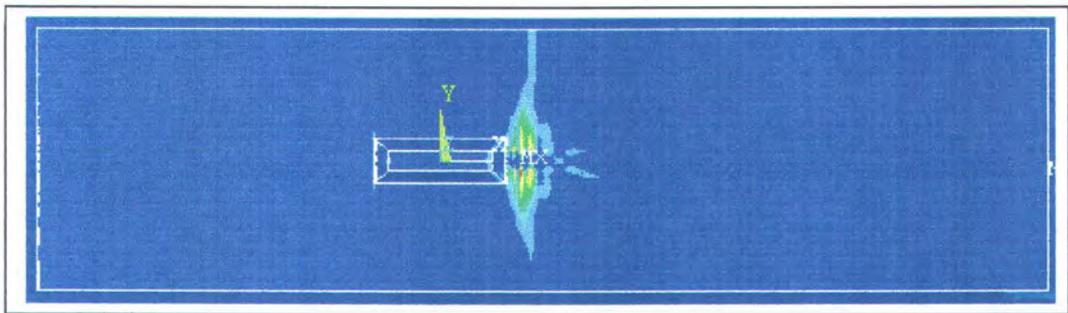
Gambar B.29. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.291$



Gambar B.30. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.858 \%$, $F_n = 0.583$



Gambar B.31. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.858 \%$, $Fn = 0.874$

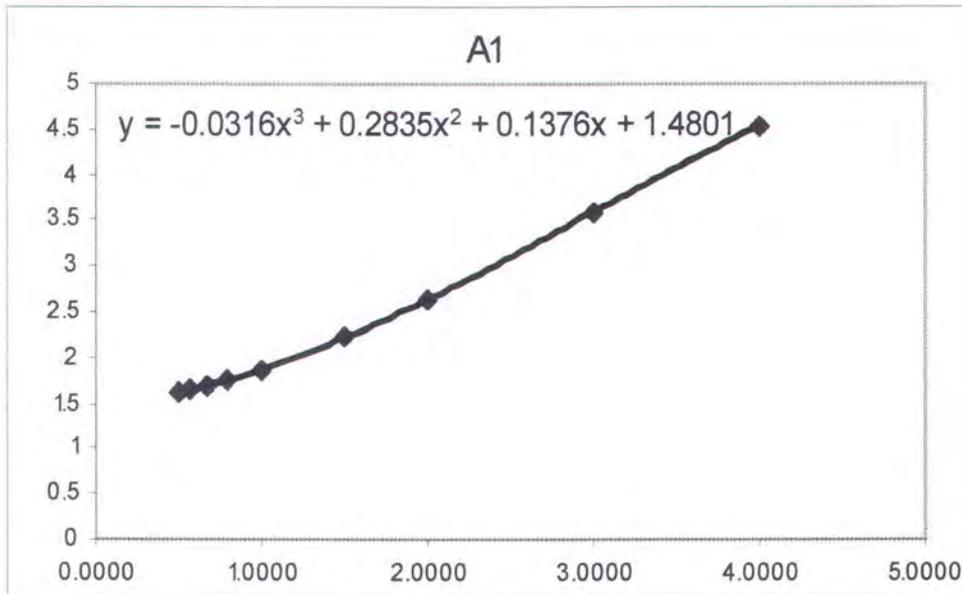


Gambar B.32. Contour Tegangan geser dengan $m = 3.858 \%$, $Fn = 1.1658$

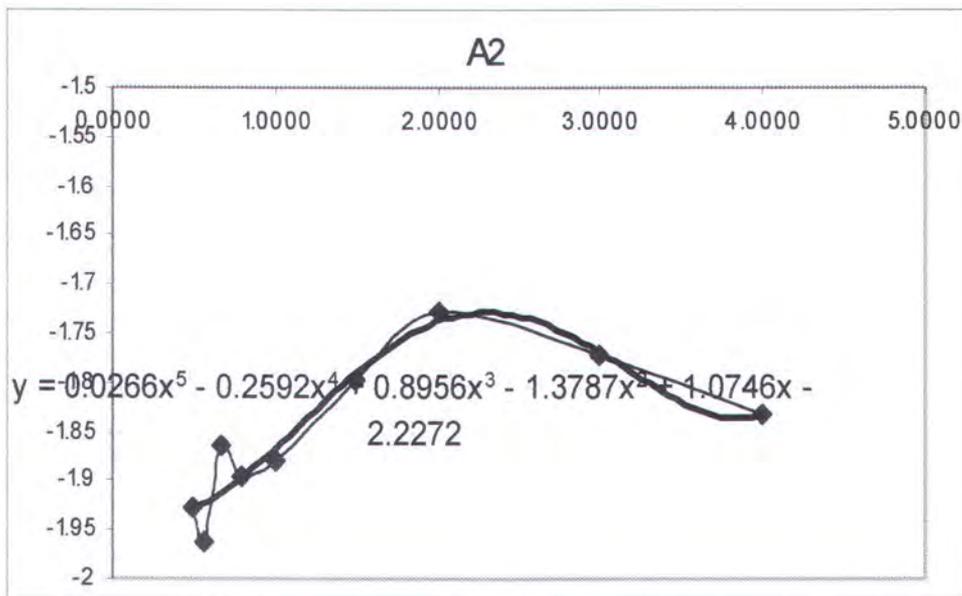
LAMPIRAN C

Tabel C.1 Data koefisien tipe-tipe tangki percobaan

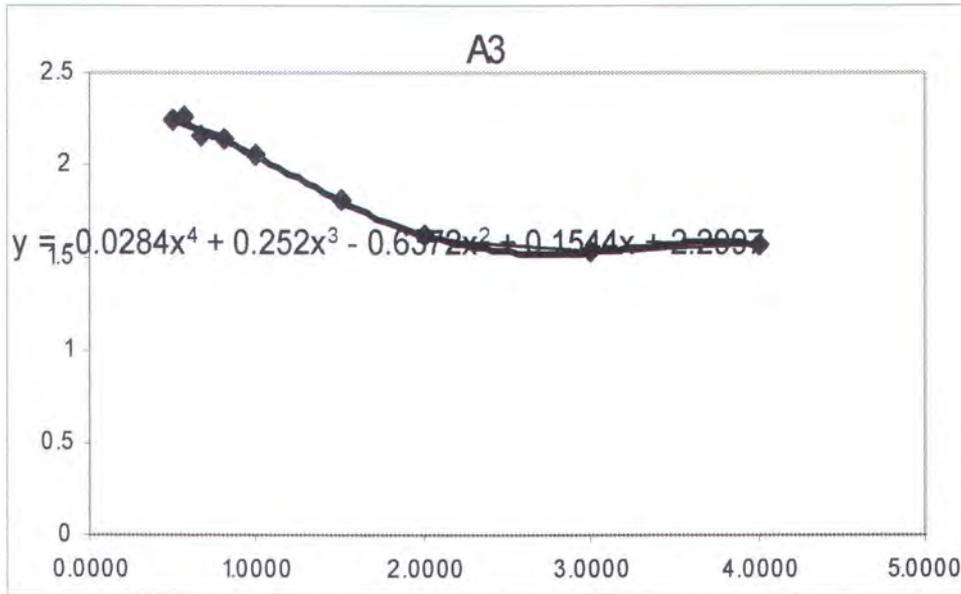
w	h	Channel type	A ₁	B ₁	C ₁	A ₂	B ₂	C ₂	A ₃	B ₃	C ₃
4	1	4.0000	4.543	-	1690.899	-1.831	137.803	3738.797	1.571	-95.757	3080.035
3	1	3.0000	3.585	-70.403	868.575	-1.772	97.329	2132.879	1.53	-61.984	1717.972
2	1	2.0000	2.641	-34.751	337.215	-1.728	59.01	-932.304	1.618	-34.592	736.631
1.5	1	1.5000	2.224	-21.796	175.894	-1.798	43.634	-522.583	1.804	-25.653	411.633
1	1	1.0000	1.866	-11.948	72.361	-1.881	29.299	-233.061	2.054	-18.248	185.479
1	1.25	0.8000	1.748	-8.846	44.988	-1.894	23.414	-149.163	2.133	-14.941	119.357
1	1.5	0.6667	1.673	-6.926	30.425	-1.865	19.097	-102.525	2.148	-12.281	82.26
1	1.75	0.5714	1.658	-5.999	22.643	-1.961	17.239	-77.265	2.258	-11.398	62.286
1	2	0.5000	1.622	-5.067	17.056	-1.927	14.771	-58.547	2.242	-9.747	47.204



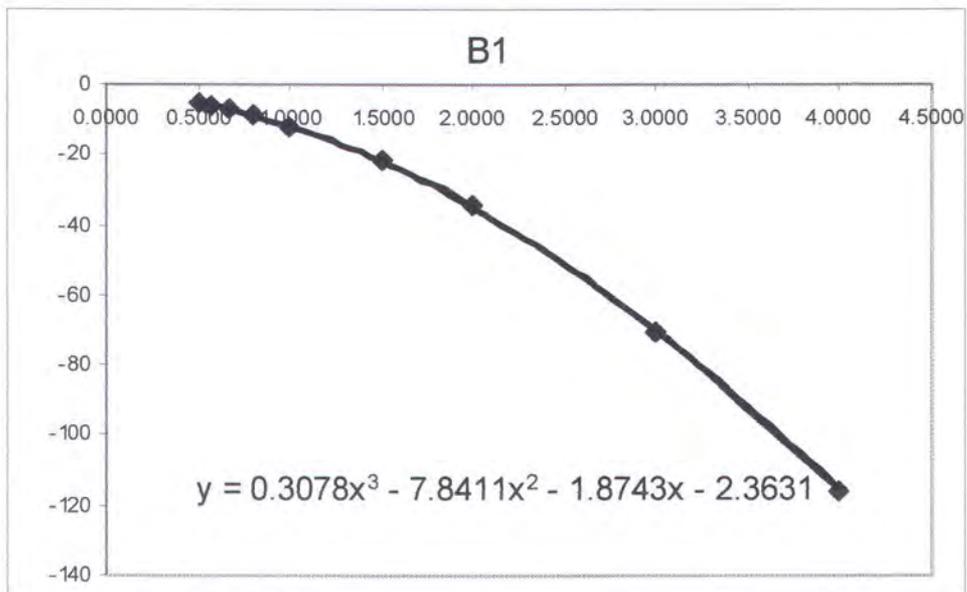
Gambar C.1. Gambar pendekatan poninomial koefisien A1 tipe-tipe tangki percobaan



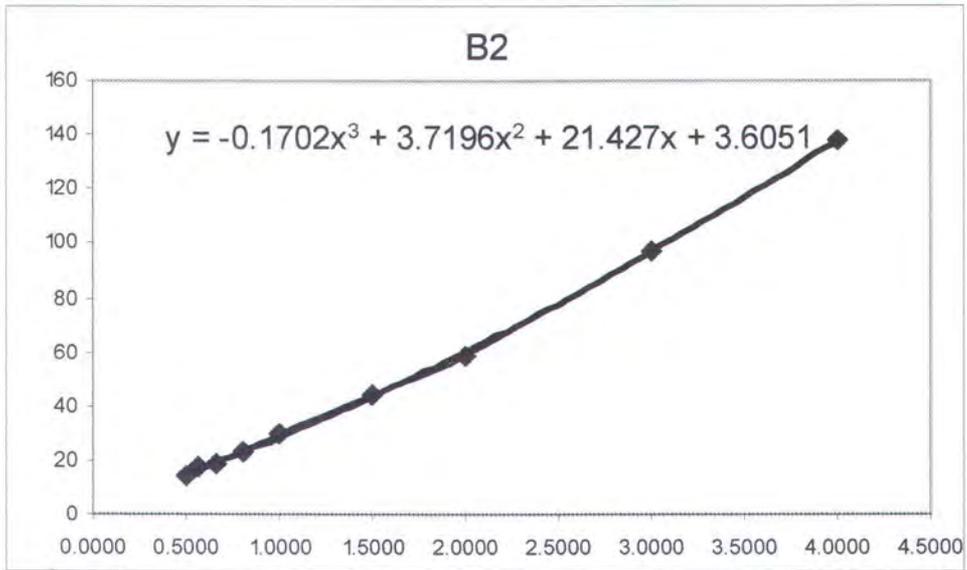
Gambar C.2. Gambar pendekatan poninomial koefisien A2 tipe-tipe tangki percobaan



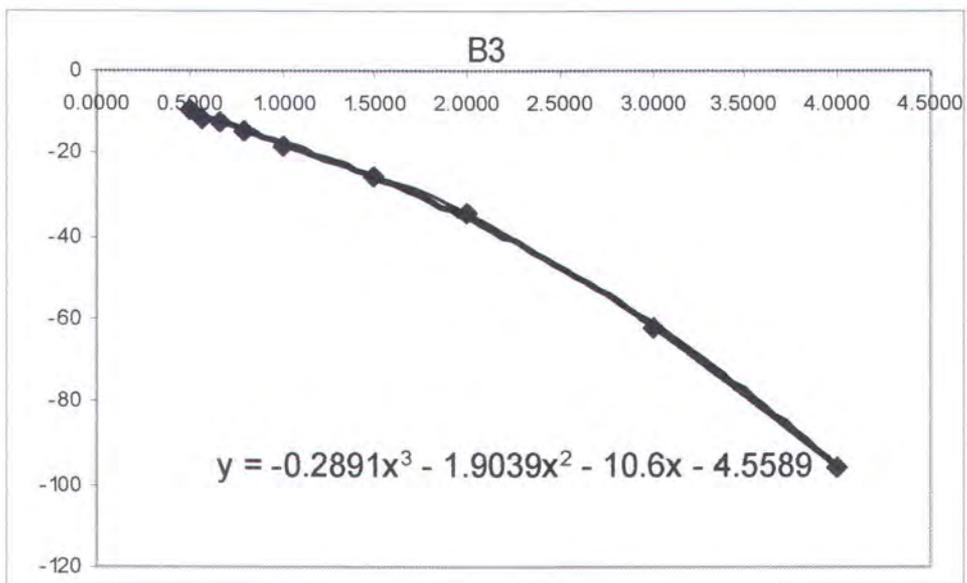
Gambar C.3. Gambar pendekatan poninomial koefisien A3 tipe-tipe tangki percobaan



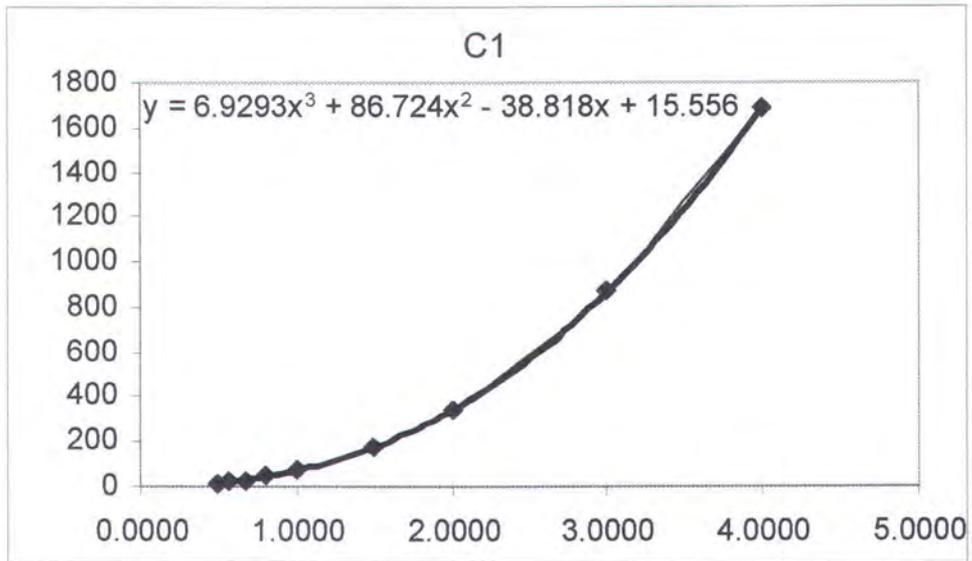
Gambar C.4. Gambar pendekatan poninomial koefisien B1 tipe-tipe tangki percobaan



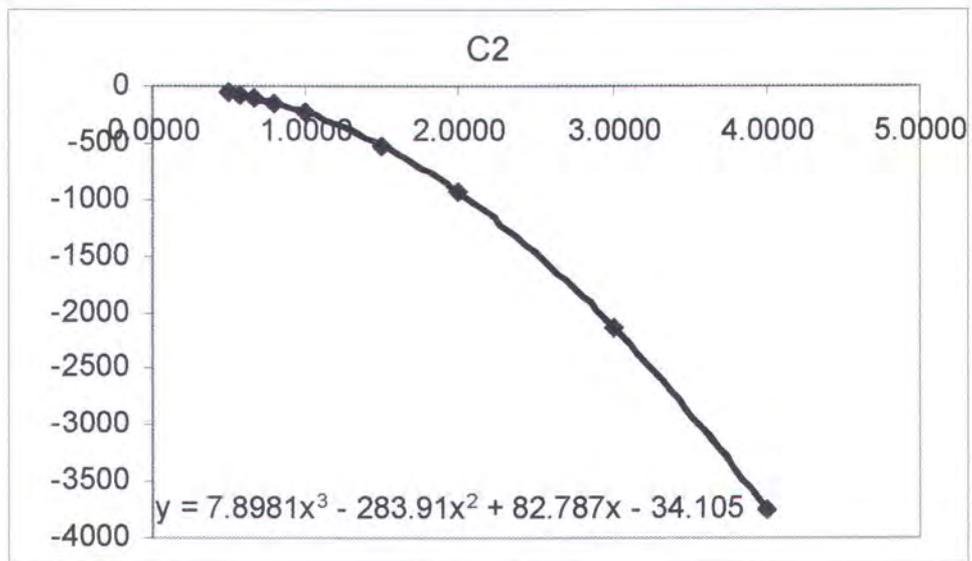
Gambar C.5. Gambar pendekatan poninomial koefisien B2 tipe-tipe tangki percobaan



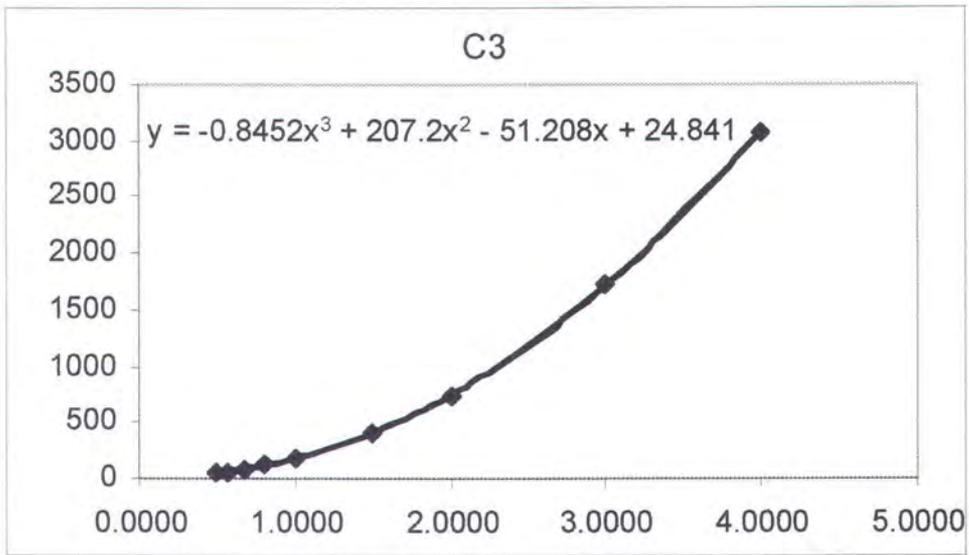
Gambar C.6. Gambar pendekatan poninomial koefisien B3 tipe-tipe tangki percobaan



Gambar C.7. Gambar pendekatan poninomial koefisien C1 tipe-tipe tangki percobaan



Gambar C.8. Gambar pendekatan poninomial koefisien C2 tipe-tipe tangki percobaan



Gambar C.9. Gambar pendekatan poninomial koefisien C3 tipe-tipe tangki percobaan