



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENGARUH KONTROL AKTIF ALIRAN BERUPA
BLOWING TERHADAP DRAG AERODINAMIKA MODEL
*REVERSED AHMED BODY***

SKRIPSI

**ANDRE GRIVANZY
0706266853**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENGARUH KONTROL AKTIF ALIRAN BERUPA
BLOWING TERHADAP DRAG AERODINAMIKA MODEL
*REVERSED AHMED BODY***

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**

**ANDRE GRIVANZY
0706266853**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi/Tesis/Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Andre Grivanzy

NPM : 0706266853

Tanda Tangan : 

Tanggal : 28 Juni 2011





HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Andre Grivanzy
NPM : 0706266853
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Analisis pengaruh kontrol aktif aliran berupa
blowing terhadap *drag* aerodinamika model
reversed Ahmed Body

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Dr. Ir. Harinaldi M.Eng
Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Budiarmo M.Eng.
Penguji 2 : Ir. Warjito M.Sc., Ph.D
Penguji 3 : Prof. Dr. Ir. Yanuar. M.Eng., M.Sc.

()
()
()
()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 28 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan karunia-Nya lah penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan sebagai salah satu syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis sadar bahwa tanpa adanya bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak, penulisan skripsi ini tidak akan berjalan lancar dan sulit untuk diselesaikan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

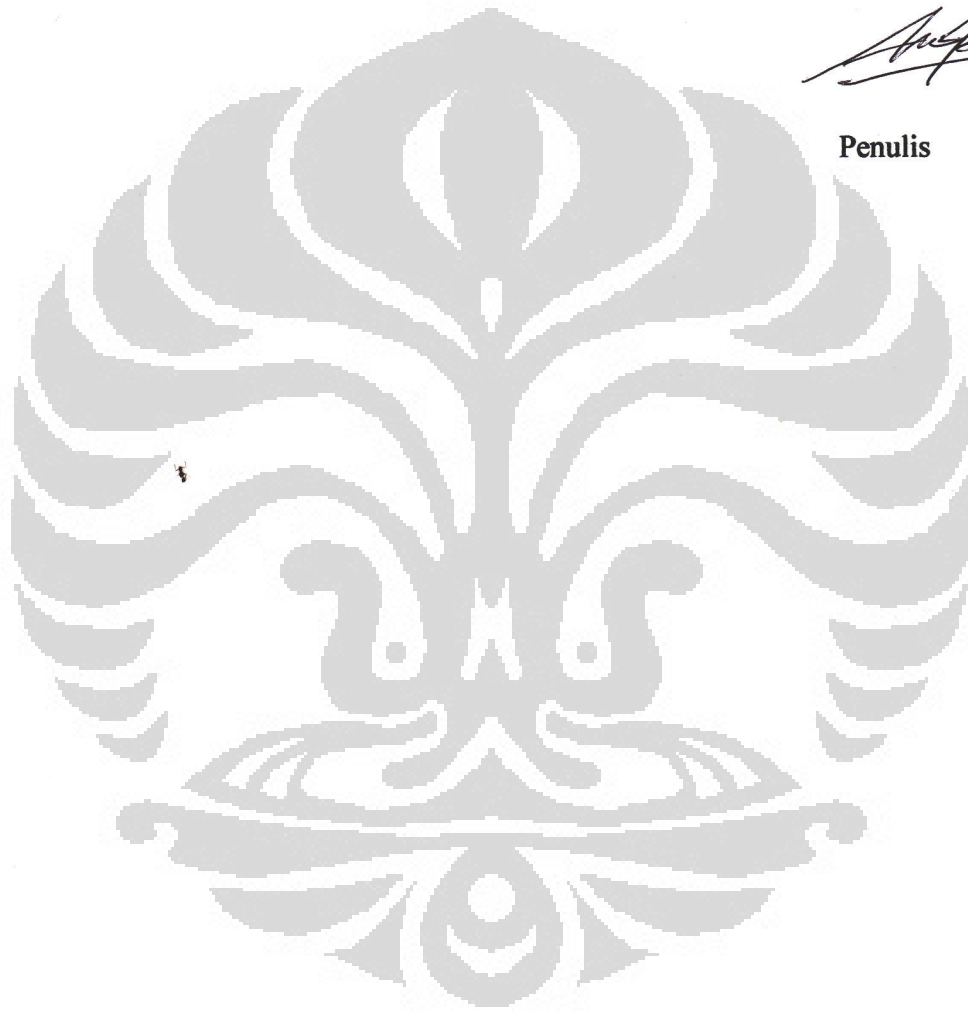
1. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng, selaku Dosen Pembimbing dari Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan waktu, tenaga, dan pikiran serta membimbing penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Orang tua penulis, Asri Zukri dan Fifi Riani serta adik-adik tercinta, Putri Atya Khairia dan Kiki Annisa Fadhilah yang selalu memberikan doa dan semangat serta menjadi alasan utama penulis dalam menyelesaikan skripsi ini sebaik-baiknya.
3. Rustan Tarakka, ST.MT. dan Sabar Simanungkalit, ST. yang tergabung dalam penelitian ini dan banyak membantu serta membimbing penulis dalam melakukan penelitian.
4. I Gusty Made Fredi Lay dan Ahmad Tri Ageng Sutrisno selaku teman kelompok skripsi atas kerjasamanya dalam melakukan penelitian ini.
5. Teman-teman lab mekanika fluida, Edward dan Kenfery, yang telah banyak memberikan bantuan dan saran serta motivasi dalam mengerjakan skripsi.
6. Teman-teman Wisma Kemuning, Anggy Astilla, Fajar Angga Nugraha, Fakhrurrozi, Dito Iandiano, dan Roni Saputra yang telah memberikan iklim yang kondusif bagi penulis baik untuk menyelesaikan skripsi ini maupun untuk mengisi waktu luang.
7. Seluruh teman-teman Teknik Mesin 2007 dan semua pihak yang telah berkontribusi membantu dan mendukung penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik maupun saran yang membangun sangat penulis harapkan agar bisa menjadi yang lebih baik kedepannya. Akhir kata semoga apa yang sudah diberikan dan dihasilkan dari skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, Juni 2011



Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andre Grivanzy
NPM : 0706266853
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**ANALISIS PENGARUH KONTROL AKTIF ALIRAN BERUPA
BLOWING TERHADAP DRAG AERODINAMIKA MODEL
*REVERSED AHMED BODY***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 28 Juni 2011

Yang menyatakan



(Andre Grivanzy)

ABSTRAK

Nama : Andre Grivanzy
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisa pengaruh kontrol aktif aliran berupa *blowing* terhadap drag aerodinamika model *Reversed Ahmed Body*

Penggunaan kontrol aktif aliran merupakan salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengurangi drag aerodinamika pada kendaraan. Efek yang dihasilkan adalah penundaan daerah separasi aliran dan olakan yang terjadi pada kendaraan, khususnya pada bagian belakang. Pada penelitian ini, kontrol aktif aliran berupa *blowing* digunakan pada model *reversed Ahmed body* yang dianggap paling mendekati model van keluarga yang banyak digunakan di Indonesia. Penelitian dilakukan dengan dua pendekatan yaitu komputasional dan eksperimental. Pada pendekatan komputasional digunakan *software* CFD Fluent 6.3 dengan model turbulensi k-epsilon standar dan bertujuan untuk mengetahui karakteristik medan aliran dan pengurangan drag aerodinamika yang terjadi pada model uji. Pada pendekatan eksperimen digunakan *load cell* dengan tujuan untuk memvalidasi hasil pengurangan drag aerodinamika yang diperoleh melalui metode komputasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kontrol aktif aliran berupa *blowing* mempunyai pengaruh terhadap karakteristik medan aliran dan pengurangan drag terbesar yang diperoleh adalah 14.72% melalui metode komputasional dan 24.61% melalui metode eksperimental.

Kata kunci :

Kontrol aktif aliran , reversed Ahmed body, separasi aliran, pengurangan drag, blowing

ABSTRACT

Name : Andre Grivanzy
Program Studi : Mechanical Engineering
Title : Analysis of blowing effect as active flow control on aerodynamics drag reduction for reversed Ahmed body model.

The use of active flow control is one of the useful way to reduce aerodynamics drag in vehicle. It provides the possibility to delay the position of flow separation and wake around the vehicle. In this study, blowing as active control flow used in reversed Ahmed body, which was considered as the closest model of family van that is widely used in Indonesia. Two methods in this study was computational method and experimental method. The computational method used k-epsilon flow turbulence by CFD Fluent software in order to know flow field characteristic and aerodynamics drag reduction around model. Experimental method use load *cell* to validate the result of aerodynamics drag reduction from computational method. Result shows that blowing as active flow control makes the influence of flow field characteristics and the biggest aerodynamics drag reduction is 14.72% by computational method and 24.61% by experimental method

Keywords :

Active flow control, reversed Ahmed body, flow separation, drag reduction, blowing

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pembahasan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
2. LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Drag	5
2.2 Lapisan Batas, Separasi Aliran, dan Intensitas Turbulensi	6
2.2.1 Lapisan batas	6
2.2.2 Separasi aliran.....	7
2.2.3 Intensitas turbulensi	8
2.3 Terowongan Angin (<i>wind tunnel</i>).....	9
2.4 Model <i>Bluff Body</i> Kendaraan	10
2.5 Modus Kontrol Aliran	11
2.6 CFD Fluent	13
2.6.1 Diskritisasi menggunakan <i>Finite Elemen Method</i>	15
2.6.2 Kondisi batas dan karakteristik <i>grid</i>	15
2.6.3 Tahapan Proses CFD	15
2.6.4 Model K-Epsilon	16
2.7 <i>Strain Gage</i>	17
2.7.1 <i>Strain</i>	17
2.7.2 Prinsip kerja <i>strain gage</i>	17
2.7.3 Jenis <i>strain gage</i>	18
2.7.4 Struktur <i>foil</i> pada <i>strain gage</i>	18
2.7.5 Prinsip pengukuran <i>strain</i>	19
2.7.6 <i>Strain gage</i> sistem 4- <i>gage</i>	20
2.7.6.1 Sistem pengkabelan.....	20
2.7.6.2 Tegangan keluaran.	21
3. METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	23
3.2 Metode Komputasional.....	24

3.3 Metode Eksperimen	27
3.4 Fasilitas dan Peralatan Lab Pengujian	29
3.4.1 Terowongan angin (<i>wind tunnel</i>).....	29
3.4.2 Peralatan	31
3.5 Prosedur pengujian	36
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Medan Aliran.....	38
4.1.1 Medan Kecepatan	38
4.1.1.1 Tanpa kontrol aliran.....	38
4.1.1.2 Pengaruh kontrol aliran.	41
4.1.2 Distribusi Tekanan.....	45
4.1.2.1 Tanpa kontrol aliran.....	45
4.1.2.2 Pengaruh kontrol aliran.	47
4.2 Intensitas Turbulensi.....	52
4.2.1 Tanpa kontrol aliran.....	52
4.2.2 Pengaruh kontrol aliran	54
4.3 Gaya Drag Aerodinamika	59
4.3.1 Metode Komputasional.....	59
4.3.2 Metode Eksperimen.....	61
5. PENUTUP.....	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran	66
DAFTAR REFERENSI.....	68

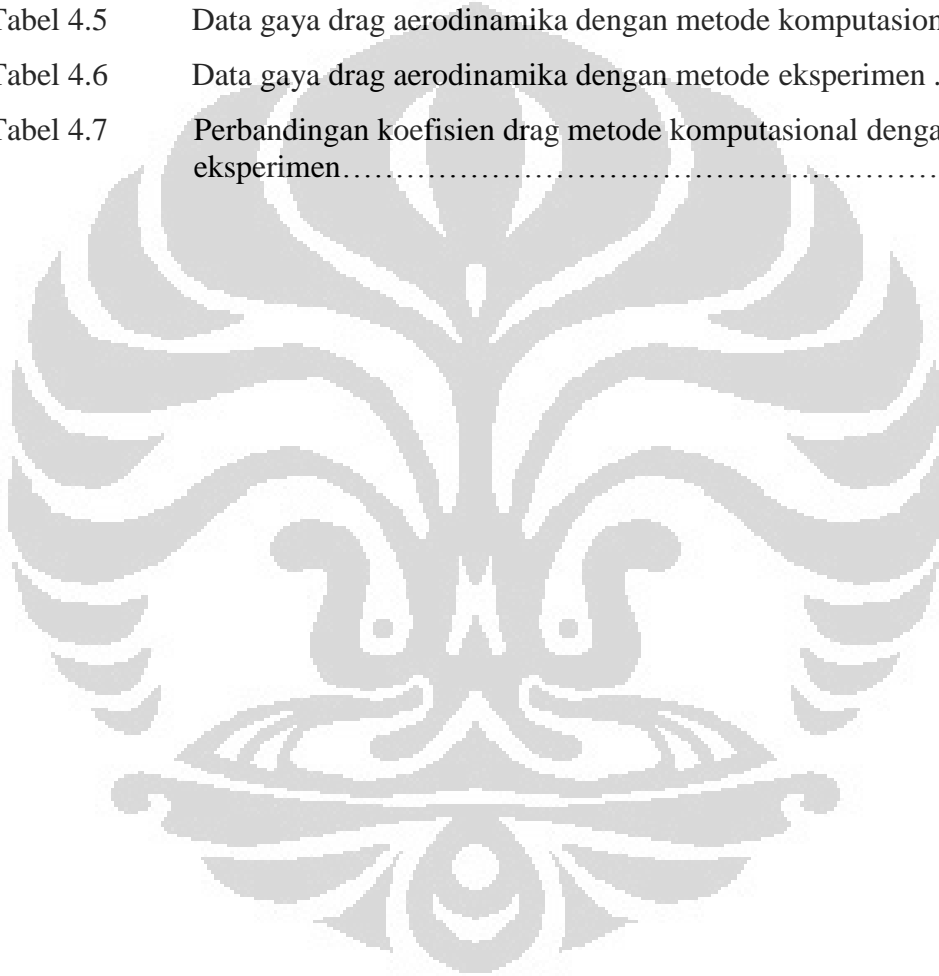
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Distribusi tekanan pada airfoil.....	6
Gambar 2.2	Lapisan batas di sepanjang plat rata	7
Gambar 2.3	Separasi aliran yang terjadi pada silinder	8
Gambar 2.4	Bagian-bagian terowongn angin	9
Gambar 2.5	Skema model <i>Ahmed body</i>	10
Gambar 2.6	Konsep dasar kontrol aktif berupa <i>blowing</i>	12
Gambar 2.7	Skematik proses kerja <i>step by step</i> Gambit-CFD	14
Gambar 2.8	Batang yang mengalami gaya tarik dan tekan	17
Gambar 2.9	Struktur pembentukan <i>strain gage</i>	18
Gambar 2.10	Aplikasi Jembatan <i>Wheatstone</i> pada <i>strain gage</i>	20
Gambar 2.11	Konfigurasi sistem 4-gage.....	20
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	23
Gambar 3.2	Perbandingan <i>Ahmed body</i> dengan model eksperimen	24
Gambar 3.3	Domain aliran dalam CFD	25
Gambar 3.4	Model simulasi dengan penambahan modus kontrol aktif	25
Gambar 3.5	Tampilan <i>grid</i> yang digunakan pada CFD	26
Gambar 3.6	Skema permodelan pada CFD	27
Gambar 3.7	Penempatan model pada <i>load cell</i>	28
Gambar 3.8	Skema pengukuran gaya drag aerodinamika	29
Gambar 3.9	Terowongan angin <i>subsonic</i> yang digunakan pada penelitian	30
Gambar 3.10	Motor DC dan unit kontrol penggerak <i>blower axial</i>	30
Gambar 3.11	Pengukuran kecepatan dalam seksi uji dengan <i>hot wire</i>	31
Gambar 3.12	Pengukuran tekanan statik dan dinamik pada seksi uji dengan tabung pitot.....	31
Gambar 3.13	Konfigurasi 4 gage aktif untuk pengukuran bending.....	32
Gambar 3.14	A12 prode dari <i>Excellent Scale</i>	33
Gambar 3.15	<i>Strain gage</i> yang telah ditempelkan pada plat <i>stainless steel</i>	34
Gambar 3.16	Skema elektrikal dari CTA	35
Gambar 3.17	<i>Hot Wire</i>	35
Gambar 3.18	Komresor yang digunakan pada eksperimen	36
Gambar 4.1	<i>Pathline</i> tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan <i>upstream</i> U_o	39

Gambar 4.2	Kontur penuh besaran kecepatan tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan <i>upstream</i> U_o	40
Gambar 4.3	<i>Pathline</i> dengan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=11.1$ m/s.....	42
Gambar 4.4	<i>Pathline</i> dengan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=13.9$ m/s.....	43
Gambar 4.5	<i>Pathline</i> dengan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=16.7$ m/s.....	44
Gambar 4.6	Distribusi tekanan tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan <i>upstream</i> U_o	46
Gambar 4.7	Distribusi tekanan dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=11.1$ m/s.....	48
Gambar 4.8	Distribusi tekanan dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=13.9$ m/s.....	49
Gambar 4.9	Distribusi tekanan dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=16.7$ m/s.....	50
Gambar 4.10	Intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan <i>upstream</i> U_o	53
Gambar 4.11	Intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=11.1$ m/s.....	55
Gambar 4.12	Intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=13.9$ m/s.....	56
Gambar 4.13	Intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan <i>upstream</i> $U_o=16.7$ m/s.....	57
Gambar 4.14	Perbandingan koefisien drag terhadap fungsi dari kecepatan <i>blowing</i> dengan metode komputasi	61
Gambar 4.15	Fluktuasi data eksperimen dengan varisai kecepatan <i>upstream</i>	62
Gambar 4.16	Perbandingan koefisien drag terhadap fungsi dari kecepatan <i>blowing</i> dengan metode komputasi	64

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Nilai minimum distribusi tekanan tanpa kontrol aktif.....	51
Tabel 4.2	Nilai minimum distribusi tekanan dengan kontrol aktif berupa <i>blowing</i>	51
Tabel 4.3	Nilai maksimum intensitas turbulensi tanpa kontrol aktif.....	58
Tabel 4.4	Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan kontrol aktif berupa <i>blowing</i>	58
Tabel 4.5	Data gaya drag aerodinamika dengan metode komputasional	60
Tabel 4.6	Data gaya drag aerodinamika dengan metode eksperimen	63
Tabel 4.7	Perbandingan koefisien drag metode komputasional dengan eksperimen.....	65



DAFTAR NOTASI

A	= Luas karakteristik/proyeksi benda (m^2)
D	= Total gaya drag (N)
L	= Panjang karakteristik (m)
P	= Tekanan pada permukaan (Pa)
ε	= <i>Strain</i>
ρ	= Massa jenis fluida (kg/m^3)
μ	= Viskositas dinamik (Ns/m^2)
ν	= Viskositas kinematik (m^2/s)
Re	= Bilangan Reynolds
C_D	= Koefisien hambatan
U_o	= Kecepatan <i>upstream</i> (m/s)
U_{bl}	= Kecepatan <i>blowing</i> (m/s)
C_p	= Koefisien tekanan
P_o	= Tekanan <i>streamline</i> atau garis arus (Pa)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Model <i>Reversed Ahmed body</i>	70
Lampiran 2	Tabel Hasil CFD tekanan statik kecepatan <i>upstream</i> $U_o=11.1$ m/s .	71
Lampiran 3	Tabel Hasil CFD tekanan statik kecepatan <i>upstream</i> $U_o=13.9$ m/s .	73
Lampiran 4	Tabel Hasil CFD tekanan statik kecepatan <i>upstream</i> $U_o=16.7$ m/s .	75
Lampiran 5	Tabel Hasil CFD intensitas turbulensi kecepatan <i>upstream</i> $U_o=11.1$ m/s	77
Lampiran 6	Tabel Hasil CFD intensitas turbulensi kecepatan <i>upstream</i> $U_o=13.9$ m/s	79
Lampiran 7	Tabel Hasil CFD intensitas turbulensi kecepatan <i>upstream</i> $U_o=16.7$ m/s	81
Lampiran 8	Tabel hasil eksperimen total gaya drag kecepatan <i>upstream</i> $U_o=11.1$ m/s	83
Lampiran 9	Tabel hasil eksperimen total gaya drag kecepatan <i>upstream</i> $U_o=13.9$ m/s	84
Lampiran 10	Tabel hasil eksperimen total gaya drag kecepatan <i>upstream</i> $U_o=16.7$ m/s	85

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global merupakan salah satu permasalahan utama dalam beberapa tahun belakangan ini. *International Energy Agency in World Energy Outlook 2007* menyimpulkan bahwa emisi gas dengan efek rumah kaca akan meningkat sebesar 57% pada tahun 2030. Adanya efek rumah kaca ini akan memberikan pengaruh yang sangat buruk terhadap lingkungan dan iklim global. Seperti yang telah diketahui, aktivitas manusia memberikan dampak yang cukup besar terhadap emisi gas dengan efek rumah kaca ini. Hal ini dibuktikan oleh *Intergovernmental Group of Expert on the Evolution of Climate (GIEC) 2001*, yang menyatakan bahwa aktivitas manusia berada di urutan pertama penyebab efek rumah kaca dan peningkatan temperatur pada abad ke-20.

Salah satu aktivitas manusia yang menyebabkan permasalahan tersebut adalah dalam bidang transportasi. Peningkatan jumlah kendaraan secara signifikan akan sejalan dengan peningkatan konsumsi bahan bakar dan akan mengakibatkan polusi dan pencemaran udara lingkungan. Di Indonesia sendiri, ketergantungan masyarakat akan kendaraan (mobil) penumpang menjadi sangat tinggi. Jenis kendaraan-kendaraan berkapasitas besar (kendaraan keluarga/*family car*) seperti *multi purpose vehicle* (MPV) dan *sport utility vehicle* (SUV) sangat diminati di pasaran karena karakter budaya masyarakat Indonesia yang memiliki ikatan kekeluargaan yang kuat. Di lain pihak, kendaraan-kendaraan jenis ini menggunakan mesin yang berkapasitas besar dengan konsumsi bahan bakar yang juga besar.

Berdasarkan permasalahan tersebut, telah menjadi suatu keharusan bagi industri otomotif untuk memproduksi kendaraan yang ramah lingkungan dan efisien dalam penggunaan bahan bakar. Penggunaan bahan bakar pada kendaraan berhubungan dengan gaya drag aerodinamika, dimana tergantung pada separasi aliran yang terjadi sepanjang bentuk kendaraan. Secara umum, untuk mengurangi gaya drag, terdapat tiga metode yang dapat dilakukan yaitu memodifikasi aliran secara lokal memindahkan atau menunda posisi separasi atau, dan mengurangi berkembangnya zona resirkulasi dibagian belakang dari struktur puseran yang

terseparasi (*separated swirling structures*). Metode-metode tersebut dapat dilakukan terutama dengan mengontrol aliran di dekat dinding dengan atau tanpa pemberian energi tambahan berupa sistem kontrol aktif dan pasif.

Perbedaan kedua sistem kontrol ini adalah kontrol aktif melibatkan penambahan energi untuk mengontrol separasi aliran dan sebaliknya pada kontrol pasif tidak terdapat penambahan energi melainkan hanya mengubah geometri aliran secara lokal. Eksperimen-eksperimen kontrol aliran pasif di terowongan angin (*wind tunnel*) pada model atau prototipe kendaraan telah banyak dilakukan pada berbagai penelitian (Gak-El-Hak, 1996). Namun, kontrol aliran secara pasif dianggap memiliki banyak keterbatasan dalam teknik pengendalian separasi aliran untuk mendapatkan persentase pengurangan drag yang lebih besar. Dalam konteks di atas, teknik kontrol aliran aktif berupa *blowing* menjadi menarik untuk diteliti untuk menggantikan sistem pasif yang kurang memenuhi kebutuhan.

2.1 Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, digunakan sebuah permodelan dari kendaraan jenis *Multi Purposed Vehicle* (MVP) atau *sport utility vehicle* (SUV) berupa Ahmed Body yang dimodifikasi dengan melakukan perubahan pada orientasi arah aliran udara (*modified/reversed Ahmed body*). Model tersebut dilengkapi dengan kontrol aktif berupa *blowing* pada bagian belakang.

Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan kontrol aktif berupa *blowing* terhadap medan aliran, intensitas turbulensi, dan koefisien drag pada *reversed Ahmed body* dengan melakukan variasi pada kecepatan *upstream*, U_o , dan kecepatan *blowing*, U_{bl} .

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini mempunyai beberapa tujuan, yaitu sebagai berikut :

1. Mengetahui dan menganalisa pola medan aliran dan intensitas turbulensi pada model *reversed Ahmed body*.
2. Mengetahui dan menganalisa gaya drag aerodinamika pada model *reversed Ahmed body*.

3. Mengetahui dan menganalisa pengaruh penambahan kontrol aktif aliran berupa *blowing* terhadap pola medan aliran dan intensitas turbulensi pada model *reversed Ahmed body*.
4. Mengetahui pengaruh penambahan kontrol aktif aliran berupa *blowing* terhadap gaya drag aerodinamika pada model *reversed Ahmed body*.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini diambil batasan masalah berdasarkan kondisi sebagai berikut :

- a. Udara dianggap fluida tak mampu mampat dan mengalir secara seragam
- b. *Reversed Ahmed body* memiliki dimensi $\frac{1}{4}$ dari *Ahmed body* versi original. Adapun geometrinya adalah panjang ($l = 0,261$ m), lebar ($w = 0.09725$ m) dan tinggi ($h = 0.072$ m)
- c. Kemiringan sudut pada bagian depan *reversed Ahmed body* adalah 35° terhadap sumbu horizontal
- d. Kecepatan *upstream*, U_o , adalah 11.1 , 13.9 dan 16.7 m/s
- e. Kecepatan aliran kontrol aktif berupa *blowing*, U_{bl} , adalah 0.5, 1 dan 1.5 m/s.

1.5 Sistematika Penulisan

Urutan dalam penulisan laporan ini adalah sebagai berikut :

BAB 1 : PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian.

BAB 2 : DASAR TEORI

Pada bab ini diuraikan tentang studi literatur dari beberapa referensi yang berkaitan dengan penelitian ini.

BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN

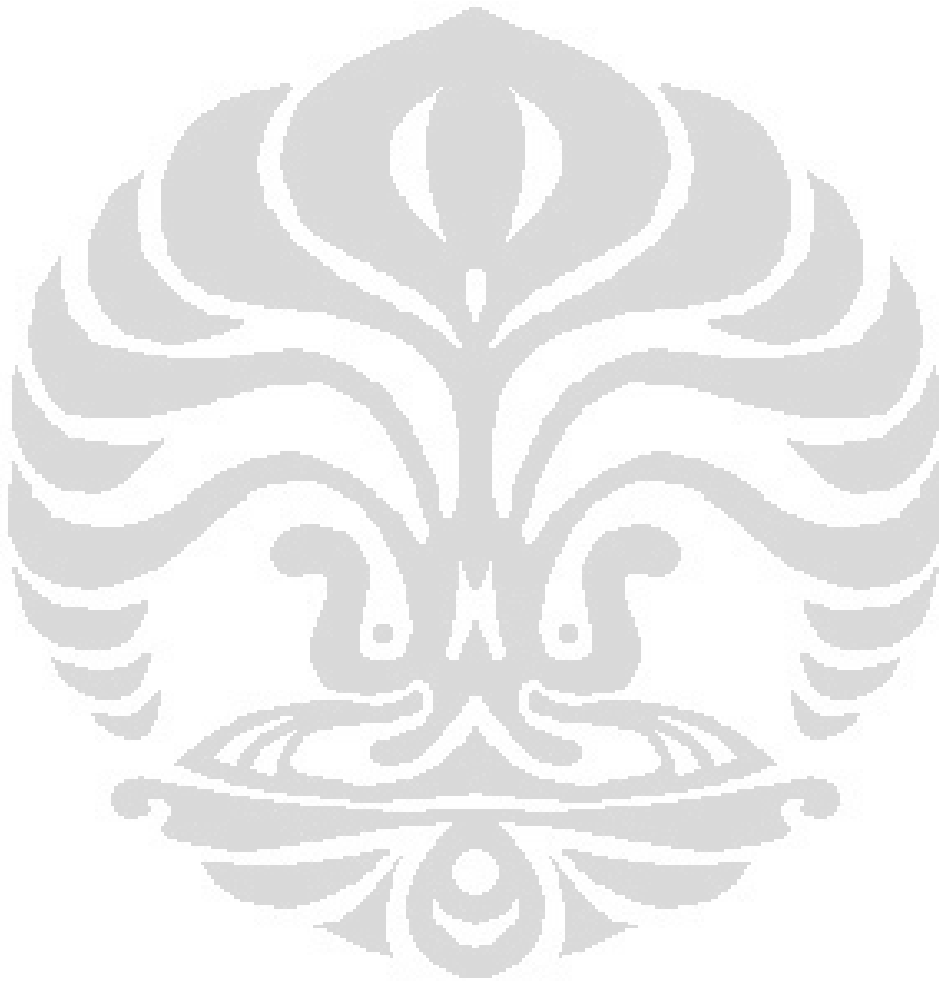
Pada bab ini berisi prosedur penelitian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut yang dibandingkan dengan hasil dari studi literatur.

BAB 5 : PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian.



BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Drag

Drag adalah besarnya gaya yang bergerak diatas sebuah objek yang memiliki posisi sejajar dengan aliran bebas. Drag pada suatu benda diakibatkan oleh dua hal yaitu gesekan antara fluida dengan permukaan benda dan beda tekanan. Drag karena gesekan disebut *friction drag*, dan tergantung kepada besar permukaan yang bersentuhan dengan fluida, tegangan geser, viskositas, gradient kecepatan, kekasaran permukaan, dan *streamline body*. Sedangkan drag karena perbedaan tekanan disebut *form drag*, yang tergantung pada bentuk, ukuran, distribusi tekanan, *wake*, bilangan Reynolds dan *Bluff body* dari benda yang dikenakan aliran (Munson, 2002)

Gaya drag, D , dirumuskan sebagai hasil kali koefisien drag, tekanan dinamis arus bebas dan luas karakteristik. Rumus untuk menghitung gaya drag dapat dituliskan sebagai berikut :

$$D = C_D \frac{\rho U_s^2}{2} A \quad (2.1)$$

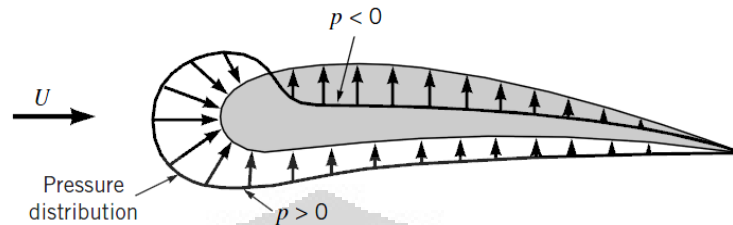
Persamaan bilangan Reynolds didasarkan pada kecepatan aliran bebas dan karakteristik panjang L pada sebuah benda, dimana panjang model sejajar dengan aliran. Persamaan bilangan Reynolds dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad (2.2)$$

Drag Tekanan

Drag tekanan merupakan komponen yang paling besar memberikan pengaruh pada drag total di kendaraan yang disebabkan oleh separasi aliran pada bagian belakang. (Morel, 1978; Hucho, 2002; A. Brunn, 2006). Drag tekanan, C_p , adalah bagian drag yang langsung disebabkan oleh tekanan, p , pada sebuah benda. Drag ini memiliki ketergantungan yang sangat kuat pada bentuk dari benda. Drag tekanan merupakan fungsi dari besarnya tekanan dan orientasi arah elemen permukaan dimana gaya tekanan tersebut bekerja. Sebagai contoh adalah gaya tekanan pada pelat datar yang tegak lurus aliran menyebabkan keseluruhan drag,

sebaliknya gaya tekanan pada kedua sisi pelat datar sejajar aliran tidak berkontribusi pada drag karena gaya tersebut bekerja tegak lurus aliran.



Gambar 2.1 : Distribusi tekanan pada airfoil (sumber: Munson, 2002)

Pada penelitian ini digunakan parameter tak berdimensi yaitu koefisien tekanan, C_p , yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (2.3)$$

2.2 Lapisan batas (*boundary layer*), separasi aliran dan intensitas turbulensi

2.2.1 Lapisan Batas (*boundary layer*)

Secara definisi, lapisan batas adalah sebuah lapisan yang terbentuk pada benda yang terendam dalam fluida dimana pada lapisan tersebut efek viskos sangat penting dan di luar lapisan tersebut fluida bersifat *inviscid*. *Inviscid* merupakan aliran fluida yang tidak mengalami gesekan, konduktivitas panas, atau difusi massa (Anderson, J.D, 2001)

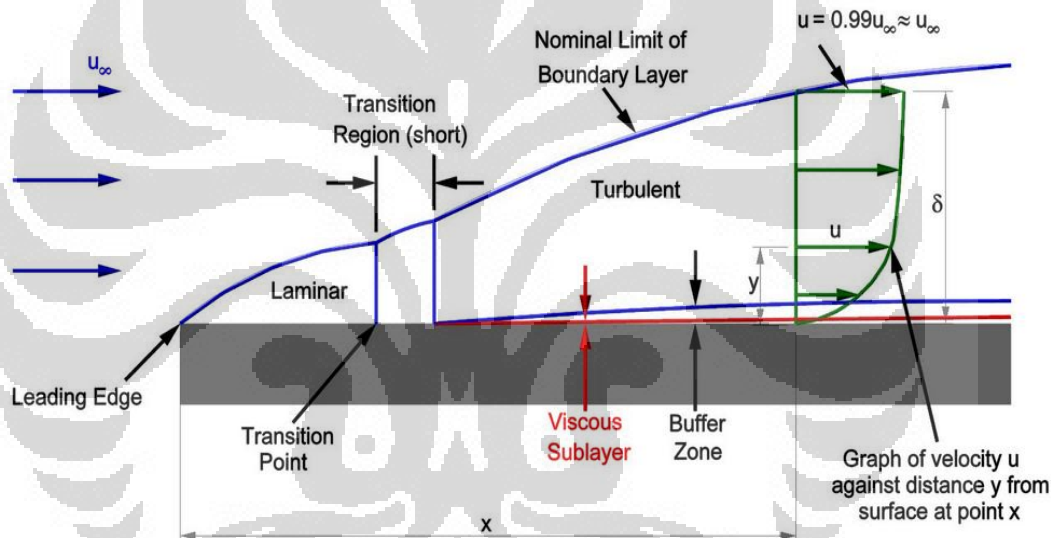
Apabila aliran seragam sebuah fluida tak mampu mampat mendekati permukaan sebuah benda dengan kecepatan *upstream*, U_o , maka ketika fluida telah mencapai tepi sebelah depan, tegangan geser yang besar terbentuk dekat permukaan benda karena partikel-partikel fluida yang datang terpaksa berhenti dan partikel-partikel yang cukup dekat dan normal terhadap benda dihambat oleh gesekan viskos. Daerah tempat aliran mengalami hambatan ini disebut lapisan batas dan ketebalannya dinyatakan dengan tebal lapisan batas, δ .

Lapisan batas menebal dengan arah yang sama dengan arah aliran, akibatnya perubahan kecepatan dari nol di permukaan pelat hingga *free stream*, U , pada jarak d semakin jauh menjadi semakin besar. Laju perubahan kecepatan tadi

menentukan gradient kecepatan di permukaan pelat dan juga tegangan gesernya. Tegangan geser untuk lapisan batas laminar adalah :

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} \quad (2.4)$$

Dan harga ini bervariasi terhadap jarak disepanjang permukaan karena profil kecepatan juga bervariasi terhadap jarak. Saat lapisan batas laminar mulai menebal, akan terjadi ketidakmampuan sehingga akan terbentuk lapisan turbulen. Peralihan dari lapisan batas laminar ke lapisan batas turbulen tergantung pada kekasaran permukaan dan tingkat turbulensi aliran bebas.

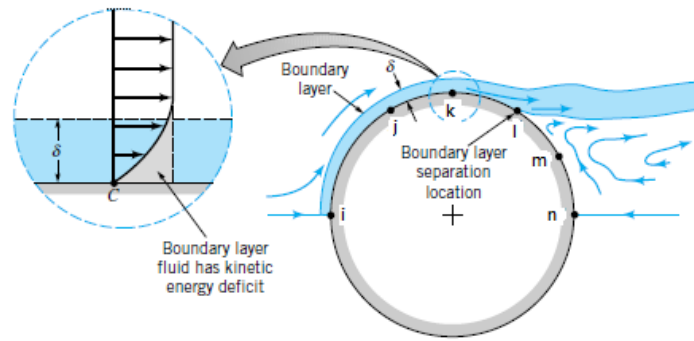


Gambar 2.2 : Lapisan batas di sepanjang plat rata

(sumber: http://www.cortana.com/Drag_Description.htm)

2.2.2 Separasi Aliran

Separasi adalah sebuah kondisi dimana aliran udara yang mengalir di sepanjang permukaan benda tidak mampu lagi menempel pada permukaan tersebut. Separasi aliran berakibat pada terbentuknya aliran balik di sekitar benda. Aliran yang sedang bergerak maju secara teratur akan terpecah saat terjadinya separasi dan mengakibatkan penurunan distribusi tekanan dan menimbulkan gaya drag. (Anderson, J.D, 2001).



Gambar 2.3 : Separasi aliran yang terjadi pada silinder

(sumber : Munson, 2002)

Gambar 2.3 menunjukkan skema terjadinya separasi aliran pada silinder. Adanya separasi aliran merupakan bentuk efek viskos dari fluida. Karena adanya efek viskos, fluida pada titik k di permukaan silinder kehilangan energi kinetik, sehingga tidak memiliki momentum yang cukup untuk mengalir dalam lapisan batas menuju n. Titik k adalah titik dimana separasi aliran terjadi. Pada titik l menuju n terjadi aliran balik karena perbedaan kecepatan yang tinggi antara daerah olakan dengan lapisan batas.

Pada kendaraan, separasi aliran yang terjadi sangat kompleks. Separasi aliran pada gril radiator, bagian bawah body, sekitar roda yang berputar, dinding bagian samping, tepi atas dan samping kaca belakang, memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kompleksitas aliran tersebut. A.Brunn et al (2008) menyimpulkan bahwa perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang merupakan kontributor utama dari keseluruhan drag, yang disebabkan karena adanya separasi aliran pada bagian belakang kendaraan. Oleh karena itu, pengembangan desain kendaraan yang mampu meminimalisir separasi aliran yang terjadi sangat diperlukan.

2.2.3 Intensitas Turbulensi

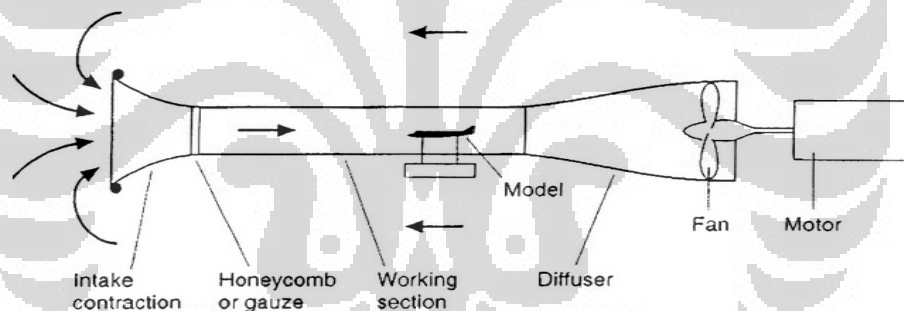
Turbulensi dapat dianggap sebagai aliran fluida yang berfluktuasi dan merupakan sifat fluida yang sangat penting apabila berbicara mengenai aliran yang terjadi pada kendaraan.

Turbulensi juga dapat dinyatakan dengan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi adalah suatu skala yang mengarakteristikan turbulen dalam persen. Persamaan dari intensitas turbulensi adalah

$$TI = \frac{u'}{U} \quad (2.5)$$

2.3 Terowongan Angin (*wind tunnel*)

Terowongan angin atau *wind tunnel* adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan pengujian aerodinamika terhadap sebuah model, seperti pesawat dan mobil. Aliran udara akan diserap masuk melalui bagian *intake contraction* oleh fan yang digerakkan oleh motor. Model ditempatkan di bagian *working section*. Selanjutnya udara yang masuk ke dalam terowongan angin akan dikeluarkan melalui *diffuser*. Dengan demikian ukuran model dibatasi ukuran *working section*, dimana semakin besar ukuran *working section* maka semakin besar pula ukuran model yang bisa ditempatkan.



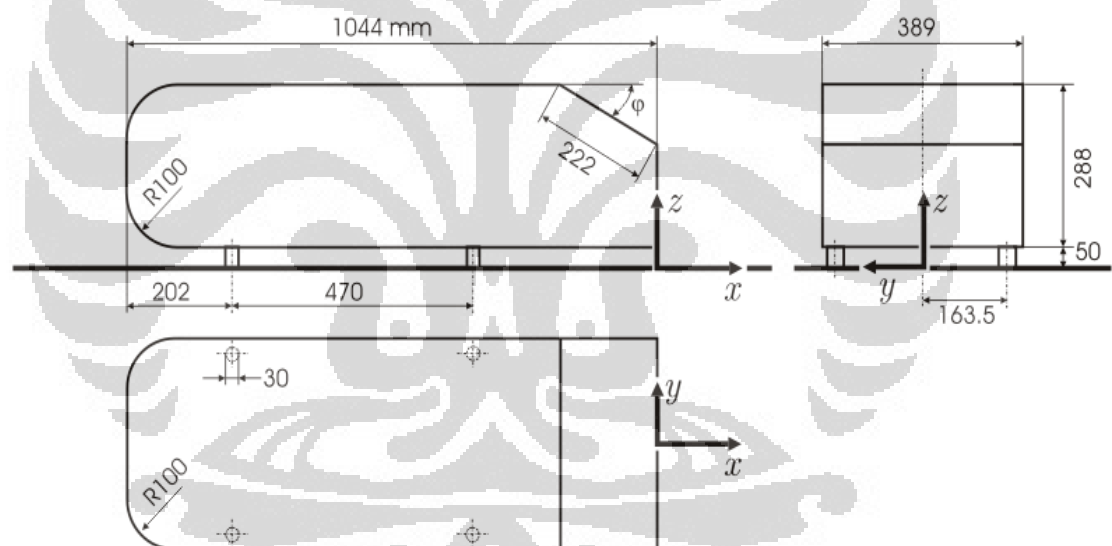
Gambar 2.4 : Bagian-bagian terowongan angin,
(sumber: <http://temasekpoly.wordpress.com>)

Dalam simulasi terowongan angin, model diasumsikan diam dan udara bergerak dengan kecepatan tertentu. Sebaliknya pada kondisi nyata, pesawat atau mobil dianggap bergerak dan udara relatif diam. Itu sebabnya aliran udara dalam *working section* terowongan angin harus memenuhi persyaratan tertentu. Antara lain udara yang bergerak dalam seksi uji harus homogen secara lateral, longitudinal dan vertikal baik kecepatan, tekanan statik, angularitas dan intensitas turbulensinya. Oleh karena itu kecepatan udara homogen yang mampu dihasilkan di seksi uji terowongan angin juga menjadi salah satu ukuran kinerja terowongan angin. Untuk terowongan angin kecepatan rendah umumnya mampu

menghasilkan kecepatan 5 m/s hingga 80 m/s. Itu sebabnya konstruksi terowongan angin relatif rumit. Terdiri dari beberapa bagian yang masing-masingnya dirancang untuk menghasilkan kondisi udara agar memenuhi standar yang diharapkan.

2.4 Model *Bluff Body* Kendaraan

Permodelan model *bluff body* yang paling sering digunakan dalam penelitian-penelitian aerodinamika adalah *Ahmed body*. *Ahmed body* merupakan sebuah model kendaraan yang disederhanakan, dan digunakan banyak peneliti karena mampu mendeskripsikan permodelan turbulensi untuk kasus geometri yang kompleks. Model *Ahmed body* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 : Skema model *Ahmed body*. Dimensi dalam mm.
(sumber: http://www.cfd-online.com/Wiki/Ahmed_body)

Ahmed Body terdiri dari geometri berbentuk bundar pada bagian depan, geometri berbentuk miring dengan sudut yang bisa diubah pada bagian belakang untuk mempelajari fenomena separasi aliran, dan kotak persegi panjang yang menghubungkan bagian depan dan belakang. Pada model *Ahmed body*, medan aliran yang terdapat pada olakan (*wake*) bersifat *three-dimensional*, *unsteady*, dan sangat tergantung pada sudut kemiringan (Ahmed S.R., Ramn R., Faltin G, 1984, Lienhart H., Stoots C. & Becker S. 2002).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan model *Ahmed body* diantaranya adalah :

1. Franck G. dan D'Ellia J. (2004) menggunakan model *Ahmed body* dengan sudut kemiringan 12.5° untuk akurasi simulasi aliran menggunakan simulasi model turbulen *large Eddy*.
2. Ehab Fares (2009) menggunakan metode the PowerFLOW 4.0 D3Q19 *lattice Boltzmann* untuk meneliti aliran utama pada olakan (*wake*) yang terjadi pada model *Ahmed body*.
3. Minguez et al (2008) melakukan penelitian model *Ahmed body* dengan sudut kemiringan 25° menggunakan *high order large eddy simulation* (LESS)
4. Uruba V dan Hladi O (2009) meneliti sifat olakan (*wake*) yang terjadi pada bagian belakang model *Ahmed body* variasi sudut kemiringan 25° dan 35° dengan menggunakan teknik PIV (*Particle Image Velocimetry*).

2.5 Modus Kontrol Aliran

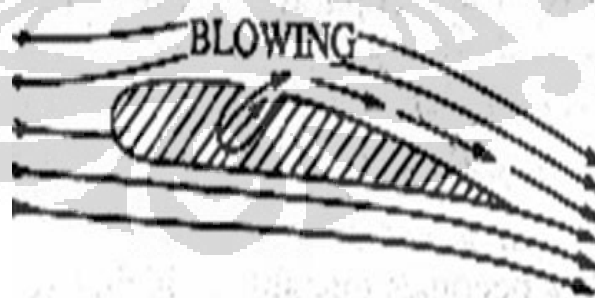
Kontrol aliran pada *bluff body* dengan tujuan mendapatkan pengurangan drag menjadi salah satu permasalahan utama dalam bidang aerodinamika kendaraan. Metode kontrol aliran dapat dilakukan dengan pemberian energi tambahan menggunakan sistem kontrol aktif atau pasif.

Sistem kontrol pasif didasarkan pada modifikasi distribusi tekanan di bagian belakang dan kaca belakang (*rear window*) kendaraan dengan menggunakan berbagai jenis perangkat, seperti pemakaian spoiler atau fin. Sistem ini berfungsi mengurangi perkembangan zona resirkulasi di kaca belakang atau di bagian belakang serta mengurangi interaksi antar struktur-struktur olakan yang berpusar (*swirling wake structur*). Namun, pada perkembangannya, sistem kontrol pasif dianggap memiliki banyak keterbatasan dalam teknik pengendalian separasi aliran untuk mendapatkan persentase pengurangan drag yang lebih besar.

Strategi kontrol aktif melibatkan penambahan energi untuk mengontrol separasi aliran. Ketika aliran fluida melewati permukaan yang memiliki kelengkungan konveks, akan terjadi perubahan distribusi tekanan yang mendorong terjadinya separasi aliran di bagian hilir setelah melalui permukaan ini

akibat tekanan balik (*adverse pressure gradient*). Secara konseptual, lapisan batas yang mengalami retardasi dapat dihilangkan dan digantikan dengan memberikan fluida berenergi tinggi sehingga memungkinkan aliran terus bergerak melawan gradient tekanan balik tanpa mengalami separasi. Bruneau C, et.al (2010) dalam penelitiannya menggunakan pasangan kontrol aktif dan pasif pada model *Ahmed body* dengan pendekatan persamaan *Navier-Stokes* untuk kecepatan dan tekanan dan *Cartesian grids* untuk mensimulasikan aliran yang mengalir. Pengurangan drag menggunakan aktif kontrol pada model Ahmed Body juga diteliti oleh Roumeas, M Gillieron P, dan Kourta A (2008) dengan menggunakan *lattice Boltzmann method* (LBM).

Salah satu konsep pemberian energi dapat dilakukan dengan tiupan (*blowing*). Menurut Roumeas, Gillieron P dan Kourta A (2008), efek yang dihasilkan oleh *blowing* pada bagian belakang benda yaitu mengurangi daerah olakan (*wake*) dan total kehilangan tekanan (*total pressure loss*) serta meningkatkan tekanan statik di permukaan benda. Sedangkan pada papernya, Lehugeur (2006) menjelaskan bahwa *blowing* digunakan untuk mengganggu *longitudinal swirling vortice* yang terjadi di bagian belakang kendaraan sehingga dapat meningkatkan tekanan statik dan mengurangi gaya aerodinamika



Gambar 2.6 : Konsep dasar kontrol aktif berupa *blowing*

Banyak kajian yang menunjukkan kontrol aktif separasi aliran turbulen memberikan alternatif yang prospeknya sangat baik untuk mengurangi hambatan aerodinamika pada kendaraan otomotif. Misalnya perangkat tiupan (*blowing*)

yang dipasang pada sebuah profil ONERA D mampu menggeser atau bahkan menghilangkan separasi aliran (Ivanic, T dan Gilliéron, P, 2004). Penelitian lain menyebutkan bahwa *blowing* yang ditempatkan pada sebuah model uji berbentuk persegi pada bagian belakang mampu mengurangi drag sebesar 20% (Roumeas, Gillieron & Kourta, 2008).

2.6 CFD Fluent

Dalam kajian aliran fluida, metode Eulerian merupakan metode yang lebih umum digunakan dibandingkan dengan metode Lagrangian. Pendekatan Eulerian didasarkan atas pengukuran propertis fluida alir pada suatu titik tetap sebagai fungsi waktu, sehingga untuk mendapatkan pemahaman akan suatu medan aliran diperlukan pengukuran pada beberapa titik tetap.

Persamaan dasar mekanika fluida yang menjadi persamaan atur suatu fluida didasarkan atas 3 prinsip berikut.

- Hukum kekekalan massa

Yaitu massa tidak dapat diciptakan atau dihancurkan.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (2.6)$$

- Hukum momentum linier

Yaitu laju perubahan momentum dari suatu volume fluida sebanding dengan gaya yang bekerja padanya

$$\rho \frac{D u}{D t} = -\text{grad } p + \rho b \quad (2.7)$$

- Hukum kekekalan energi

Yaitu energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan

$$E_{total} = E_{kinetic} + E_{internal} \quad (2.8)$$

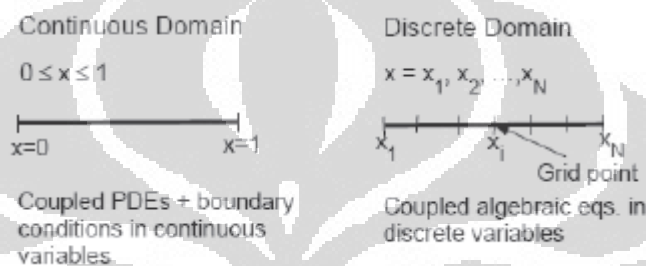
Persamaan-persamaan ini merupakan persamaan non-linier diferensial parsial dan merupakan persamaan atur pada banyak aplikasi di bidang *engineering* terutama mekanika fluida. Akan sangat sulit untuk menyelesaikan persamaan ini secara analitis. Meskipun begitu, dimungkinkan untuk mendapatkan solusi dari persamaan ini yaitu dengan menggunakan pendekatan berbasis komputasi yang disebut *Computational Fluid Dynamic* (CFD).

Strategi pemecahan permasalahan terkait persamaan atur di atas adalah dengan proses diskritisasi yaitu merubah *continuous domain* menjadi *discrete domain* dengan menggunakan *grid*. Pada *continuous domain*, setiap variabel aliran didefinisikan pada tiap titik domain. Misalnya tekanan, p , pada daerah, l , dimensional kontinyu didefinisikan sebagai berikut :

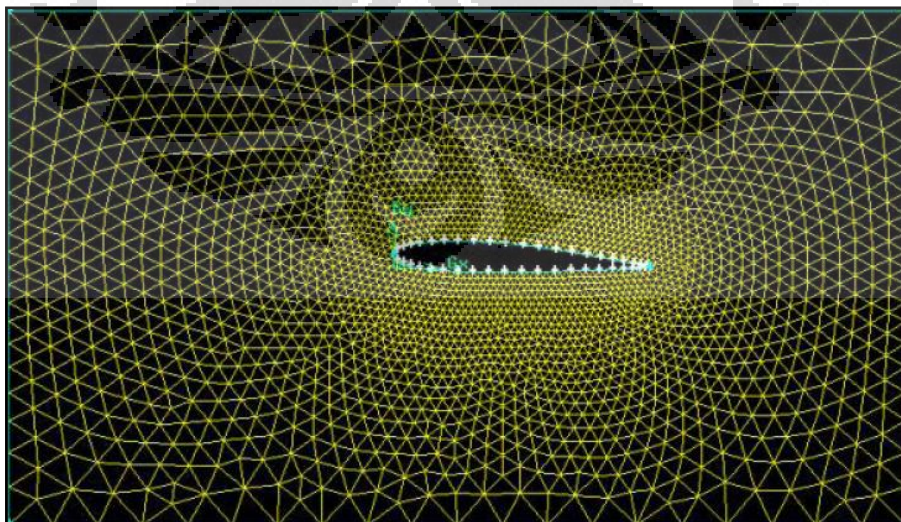
$$p = p(x), 0 < x < 1$$

Pada *discrete domain*, tiap variabel didefinisikan hanya pada titik *grid*. Misalnya pada daerah diskret berikut, tekanan didefinisikan hanya pada N *grid* :

$$p_i = p_i(x), i = 1, 2, \dots, N$$



Pada solusi CFD, nilai variabel aliran ditentukan hanya pada titik *grid*. Nilai pada titik lainnya ditentukan dengan interpolasi nilai pada titik *grid*. Berikut adalah contoh *grid* yang digunakan dalam penyelesaian solusi aliran 2D yang melewati airfoil.



Gambar 2.7 Grid pada model aliran 2D melewati sebuah airfoil

2.6.1 Diskritisasi Menggunakan *Finite-Volume Method*

Pada metode volume hingga (*Finite-Volume Method*) kotak-kotak *grid* disebut *cell* dan titik pada *grid* disebut node. Jenis dari *cell* berbeda-beda yaitu quadrilateral, triangular, hexahedral, tetrahedral, prisma. Pada pendekatan volume hingga, bentuk integral dari persamaan kekekalan pada volume atur digunakan untuk membentuk persamaan diskrit pada *cell/grid*.

2.6.2 Kondisi Batas dan Karakteristik Grid

Kondisi batas adalah suatu kondisi untuk batasan sebuah kontrol volume tersebut. Dalam analisa menggunakan CFD seluruh titik dalam kontrol volume tersebut dicari nilainya berdasarkan nilai kondisi batas. Secara umum kondisi batas terdiri dari 2 macam, inlet dan outlet. Inlet biasanya didefinisikan sebagai tempat dimana fluida memasuki domain yang ditentukan. Berbagai macam kondisi didefinisikan pada inlet seperti kecepatan, komposisi, temperatur, tekanan, laju aliran. Sedangkan pada outlet biasanya didefinisikan sebagai kondisi dimana fluida tersebut keluar dari domain.

Selain kondisi batas, hal lainnya yang perlu diperhatikan dalam CFD adalah karakteristik *grid*. Kompleksitas domain aliran fluida, *numerical diffusion* (kesalahan diskritisasi yang dapat timbul apabila *grid* tidak sejajar dengan arah aliran) adalah faktor-faktor yang menjadi pertimbangan dalam penentuan jenis *grid* yang digunakan. Faktor yang mempengaruhi pemilihan sistem *grid* antara lain, bentuk *cell*, bentuk geometri, struktur *mesh*, dan pembentukan *grid*.

2.6.3 Tahapan Proses CFD

Secara umum langkah kerja CFD terdiri dari 3 tahapan sebagai berikut.

a. *Pre Processor*

Pada tahapan ini proses yang dilakukan adalah :

- Mendefinisikan geometri model untuk menjadi domain komputasi
- Pembuatan *grid*
- Mendefinisikan propertis fluida

b. Solver

Pada tahapan ini dilakukan proses komputasi numerik dengan menggunakan salah satu dari 3 metode numerik :

- Pendekatan variabel yang diketahui menjadi fungsi yang lebih sederhana
- Diskritisasi dengan substitusi pendekatan kedalam persamaan yang mengatur aliran
- Solusi dari persamaan aljabar

c. Post Processor

Pada tahapan ini hasil-hasil komputasi numerik divisualisasikan dan didokumentasikan untuk melakukan analisa dan lain sebagainya.

2.6.4 Model K-Epsilon

Model K-Epsilon terdiri dari dua persamaan yang mewakili parameter turbulen suatu aliran. Persamaan pertama adalah persamaan energi kinetik turbulen, k , dan digunakan untuk menentukan besar energi turbulensi. Persamaan kedua merupakan persamaan dissipasi turbulen, ϵ , dan digunakan untuk menentukan skala turbulensi.

Persamaan energi kinetik turbulen k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b + \rho \epsilon - Y_M + S_K \quad (2.9)$$

Persamaan dissipasi turbulen ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.10)$$

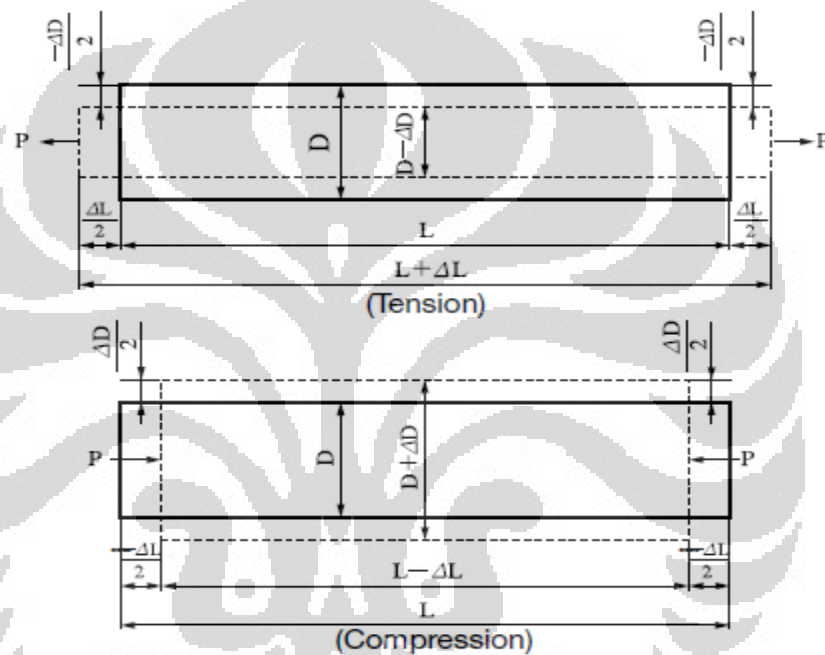
dengan $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $S_K=1.0$, $S_\epsilon=1.3$.

Model K-epsilon terbukti memberikan hasil yang baik untuk prediksi aliran *free stream* dengan gradien tekanan yang relatif kecil. Sebaliknya untuk aliran yang memiliki gradien tekanan yang besar, akurasi model K-epsilon menjadi berkurang.

2.7 Strain Gage

2.7.1 Strain

Ketika sebuah material menerima gaya tarik (*tensile force*), P , material akan mengalami tekanan (*stress*) yang berhubungan dengan gaya yang dialaminya itu. Secara proporsional dengan tekanan tersebut, penampang akan berkontraksi dan bertambah panjang sebesar ΔL dari panjang material mula-mula, L .



Gambar 2.8 : Batang yang mengalami gaya tarik dan tekan
(sumber: "How Strain Gages Work," n.d.)

Rasio dari pertambahan panjang dengan panjang mula-mula disebut *tensile strain* dan dirumuskan sebagai berikut

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.11)$$

2.7.2 Prinsip kerja *strain gage*

Setiap material memiliki hambatan yang spesifik. Sebuah gaya tarik (gaya tekan) akan menambah (mengurangi) hambatan dengan menambah (mengkontraksi) material. Misalkan hambatan mula-mula adalah R dan strain

menginisiasi perubahan hambatan sebesar ΔR , maka persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta R}{L} = K_s \frac{\Delta L}{L} = K_s \varepsilon \quad (2.12)$$

K_s adalah *gage factor*, sebuah koefisien yang mengekspresikan sensitivitas dari *strain gage*. Walaupun *strain gage* mampu mendeteksi besarnya *strain* yang terjadi pada elemen dan mengkonversi *strain* ini menjadi perubahan hambatan listrik, tetapi karena *strain* merupakan fenomena infinitesimal yang tak nampak, jadi perubahan hambatan yang terjadi sangat kecil. Agar hambatan listrik yang kecil ini mampu untuk dihitung, maka diperlukan suatu amplifier dengan menggunakan sirkuit listrik yang disebut dengan jembatan *Wheatstone*.

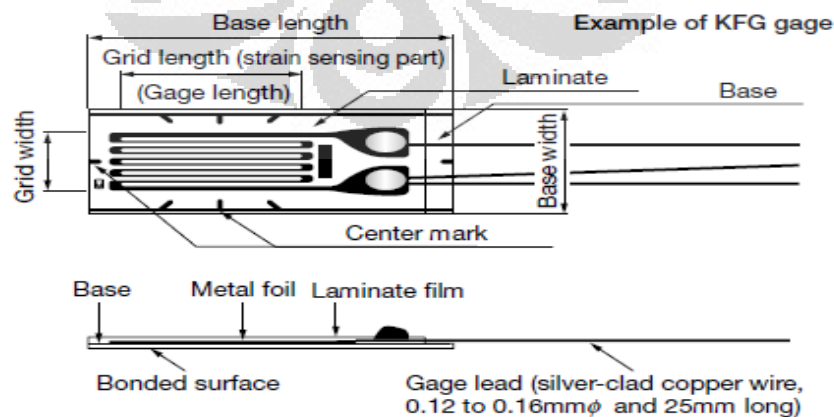
2.7.3 Jenis *strain gage*

Jenis *strain gage* dibagi menjadi 3 yaitu :

1. *Foil Strain Gage* (Cu-Ni alloy, Ni-Cr alloy)
2. *Wire Strain Gage* (Cu-Ni alloy, Ni-Cr alloy)
3. Semikonduktor *Strain Gage* (monocrystal silicon)

2.7.4 Struktur *foil* pada *strain gage*

Sebuah *foil strain gage* memiliki *metal foil photo-etched* dengan pola berliku-liku pada sebuah insulator elektrik yang terbuat dari resin yang tipis dan di bagian pangkalnya juga terdapat *gage leads*, deskripsi *strain gage* dapat terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 : Struktur pembentukan *strain gage*

(sumber: "How Strain Gages Work," n.d.)

Strain gage direkatkan pada objek yang akan diukur dengan menggunakan bahan adesif tertentu. *Strain* yang terjadi pada bagian objek yang akan diukur ini ditransfer menuju elemen peraba melalui dasar *gage* (*gage base*). Untuk memperoleh pengukuran yang akurat, *strain gage* dan bahan adesifnya harus cocok dengan material yang diukur dan kondisi operasi termasuk suhu.

2.7.5 Prinsip pengukuran *strain*

Strain menginisiasikan perubahan hambatan dengan sangat kecil. Oleh karena itu, untuk pengukuran *strain* sebuah jembatan *Wheatstone* digunakan untuk mengkonversi perubahan hambatan menjadi perubahan tegangan. Misal pada Gambar 2.10, hambatan adalah R_1 , R_2 , R_3 , dan R_4 dan tegangan jembatan (V) adalah E_{exc} . Maka, tegangan keluaran e_0 (V) dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut :

$$e_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} E_{exc} \quad (2.13)$$

Misalkan hambatan R_1 adalah *strain gage* dan berubah besarnya sebanyak R akibat *strain*. Maka, tegangan keluaran adalah

$$e_0 = \frac{(R_1 + \Delta R) R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R + R_3)(R_2 + R_4)} E_{exc}$$

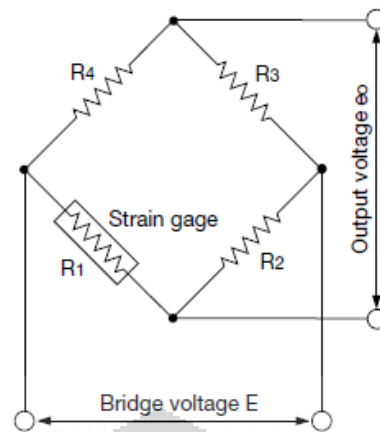
Apabila, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$,

$$e_0 = \frac{R^2 - R\Delta R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} E_{exc}$$

Sejak R dianggap jauh lebih besar dari nilai ΔR ,

$$e_0 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E_{exc} = \frac{1}{4} K_s \varepsilon E_{exc} \quad (2.14)$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh keluaran hambatan yang proporsional dengan perubahan hambatan, sebagai contoh akibat perubahan *strain*. Keluaran tegangan yang sangat kecil, ini diampifikasikan untuk pembacaan analog atau pun indikasi digital dari *strain*.

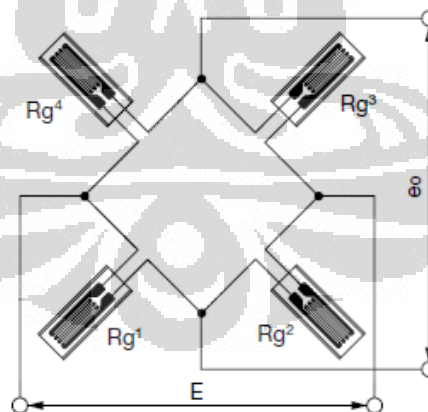


Gambar 2.10 : Aplikasi Jembatan *Wheatstone* pada *strain gage*
(sumber: "How Strain Gages Work," n.d.)

2.7.6 *Strain gage* sistem 4-gage

2.7.6.1 Sistem pengkabelan

Pada sistem 4-gage, terdapat 4 buah *strain gage* yang dihubungkan pada setiap keempat sisi jembatan. Rangkaian ini akan menghasilkan keluaran yang besar dari *transducer strain-gage* dan memperbaiki kompensasi temperatur demikian pula dapat mengeliminasi komponen *strain* dibandingkan *strain* target.

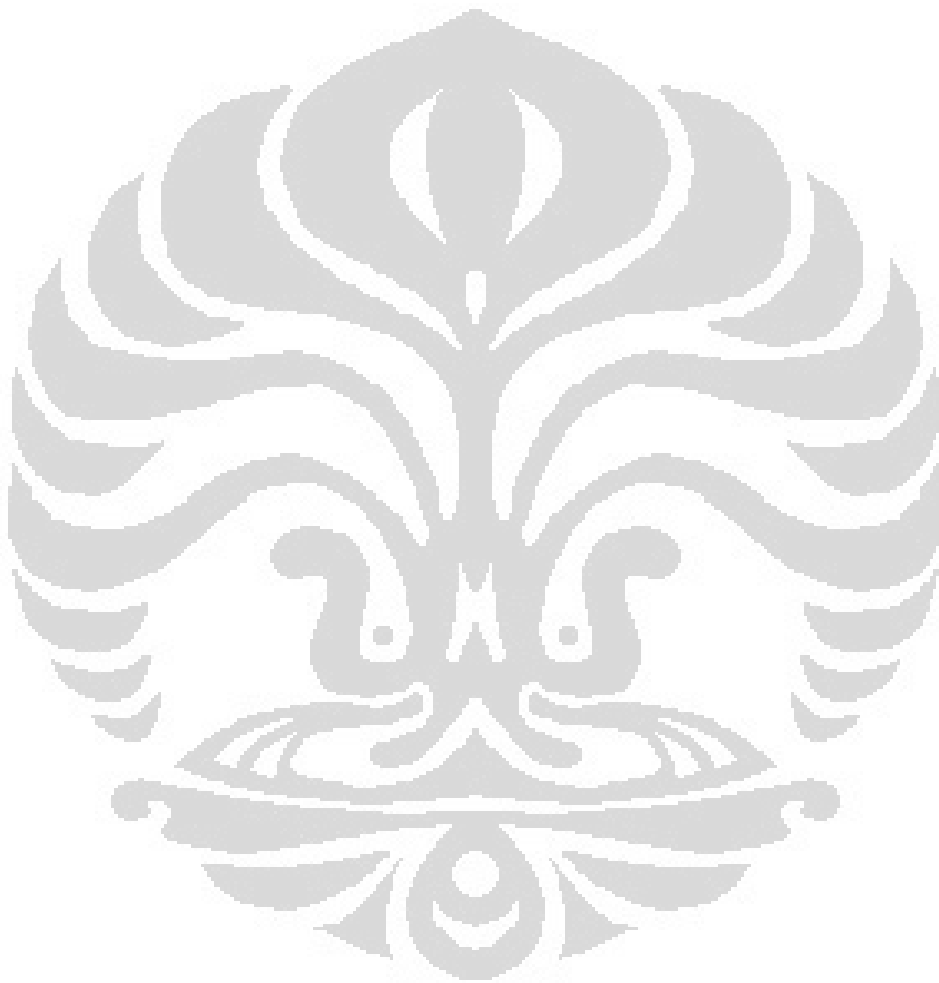


Gambar 2.11 : Konfigurasi sistem 4-gage
(sumber: "How Strain Gages Work," n.d.)

2.7.6.2 Tegangan keluaran

Ketika keempat strain gage mengalami perubahan hambatan menjadi masing masing $R_1 + \Delta R$, $R_2 + \Delta R$, $R_3 + \Delta R$, dan $R_4 + \Delta R$, maka tegangan keluaran dari jembatan adalah :

$$e_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) E_{exc} \quad (2.15)$$



BAB 3

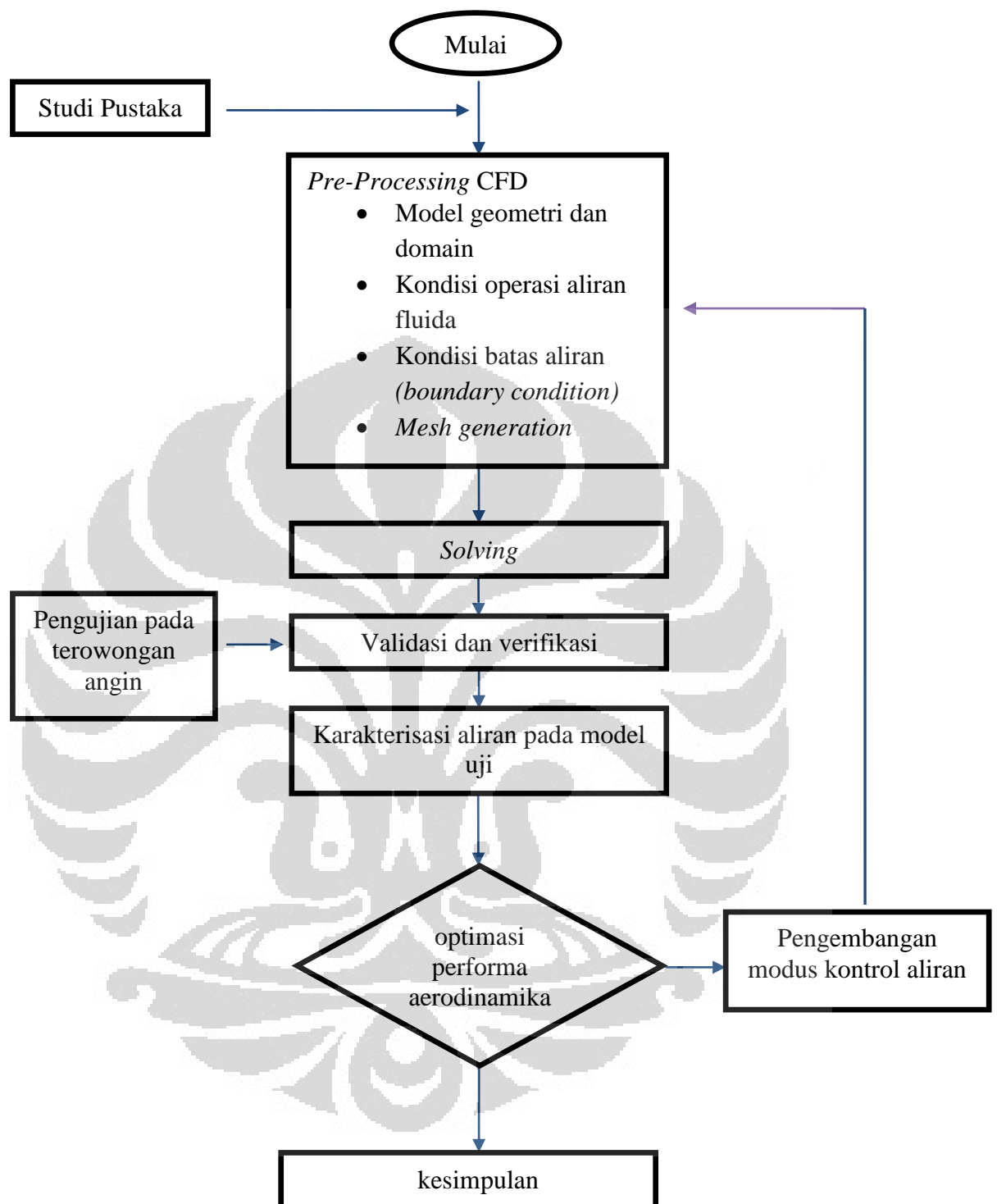
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini mengkaji pengurangan drag yang terjadi pada model *reversed Ahmed body* dengan penambahan kontrol aktif berupa *blowing*. Model *reversed Ahmed body* digunakan karena mewakili bentuk mobil van keluarga yang umum di pakai di Indonesia. Metode pendekatan yang dilakukan terdiri dari 2 yaitu metode komputasional dan eksperimental. Beberapa parameter yang menggambarkan fenomena aliran disekitar model diantaranya adalah medan aliran, intensitas turbulensi, dan gaya drag aerodinamika. Sebagai tahap awal penelitian, digunakan pendekatan komputasi numerik (CFD) dengan *software* Fluent 6.3.26 sebagai *solver* dan *postprocessing* yang berbasis metode volume terbatas (FVM). Metode CFD ini membantu mengetahui pola aliran fluida di sekitar model *reversed Ahmed body* dan gaya drag aerodinamika tanpa menggunakan kontrol aktif maupun dengan penambahan kontrol aktif berupa *blowing*.

Metode berikutnya adalah metode eksperimen dimana model *reversed Ahmed body* tersebut diujikan pada terowongan angin (*wind tunnel*) dengan kondisi yang sama dengan metode komputasional. Hasil yang diperoleh melalui metode eksperimen adalah gaya drag aerodinamika yang nantinya akan dibandingkan dengan hasil dari metode komputasional. Nilai parameter-parameter yang telah diperoleh kemudian disajikan dalam bentuk grafik, diagram, dan kontur penuh dalam bab berikutnya sehingga memudahkan dalam melihat pengaruh dari penambahan kontrol aktif berupa *blowing*.

Berikut adalah diagram alir penelitian yang secara menyeluruh menggambarkan tahap-tahap penelitian yang telah dilakukan :



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

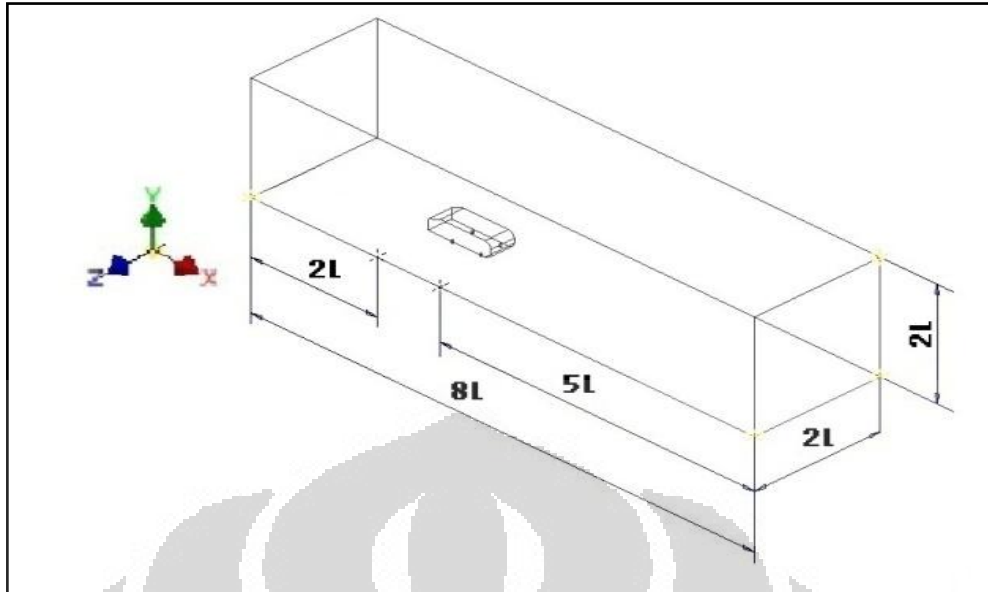
3.2 Metode Komputational

Dalam simulasi aliran metode aliran berbasis komputasi numerik dengan metode volume terbatas digunakan software gambit 2.4.6 sebagai *grid generation* dan Fluent 6.3.26 sebagai *solver* dan *postprocessing*. Model *reversed Ahmed body* digunakan dalam penelitian ini dikarenakan model *Ahmed body* tidak dapat mencerminkan bentuk kendaraan keluarga pada umumnya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan model yang berbeda, yaitu model dengan bentuk depan yang dimiringkan (sudut miring pada bagian depan dengan $\alpha = 35^\circ$) dan bagian belakang menyerupai *step back* namun dengan modifikasi penambahan jari-jari kelengkungan pada tepi atas dan bawah, sehingga jika dilihat dari samping model memiliki keserupaan dalam arah sumbu z. Dengan begitu model ini dapat dikatakan menyerupai model *reversed Ahmed body* (gambar detail model uji CFD dapat dilihat pada Lampiran 1). Model *reversed Ahmed body* ini memiliki rasio 0.25 jika dibandingkan terhadap model *Ahmed body*, dan memiliki dimensi panjang $l = 0.261$ m, lebar $w = 0.09725$ m, dan tinggi $h = 0.072$ m.



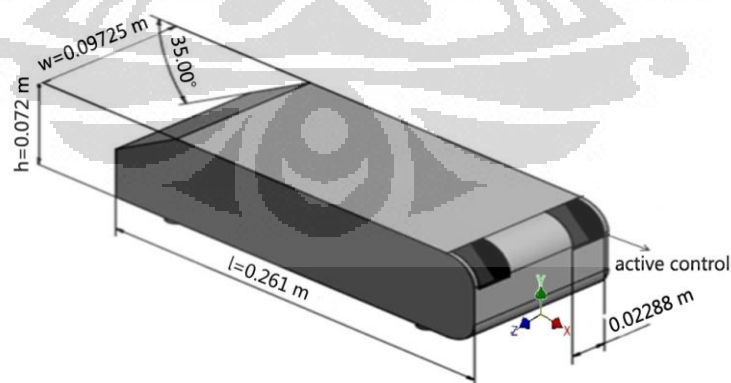
Gambar 3.2 Perbandingan Ahmed Body dengan model eksperimen
(sumber: Colloquium FLUID DYNAMICS, 2009)

Domain aliran yang digunakan memiliki bentuk balok dengan dimensi panjang= $8l$, lebar= $2l$, dan tinggi= $2l$ (l =panjang model dalam sumbu x). Nilai dimensi domain aliran ini perlu ditetapkan agar efek-efek viskos yang berhubungan dengan *wall* tidak berpengaruh pada aliran di sekitar model.



Gambar 3.3 Domain aliran dalam CFD

Setelah tahapan simulasi pertama yang berkaitan dengan fenomena aliran di sekitar model dilakukan, tahapan berikutnya adalah simulasi model dengan kontrol aliran menggunakan kontrol aktif berupa *blowing*. Dalam kajian ini, modus kontrol aktif berupa *blowing* belum divariasikan secara topologi dan peletakan, namun difokuskan untuk mengkaji nilai optimum kecepatan *blowing*. Eksitasi aliran diletakkan pada ujung kedua tepi belakang model.



Gambar 3.4 Model simulasi dengan penambahan modus kontrol aktif

Total luasan area eksitasi aliran pada dinding dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Luasan Eksitasi} &= 2 \left[\left(\frac{\gamma}{360^\circ} \right) 2\pi r z \right] \\ &= 2 \left[\left(\frac{78.520}{360^\circ} \right) 2\pi (0.025)(0.02288) \right] \\ &= 2(0.06855 \times 10^{-2}) = 0.1371 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

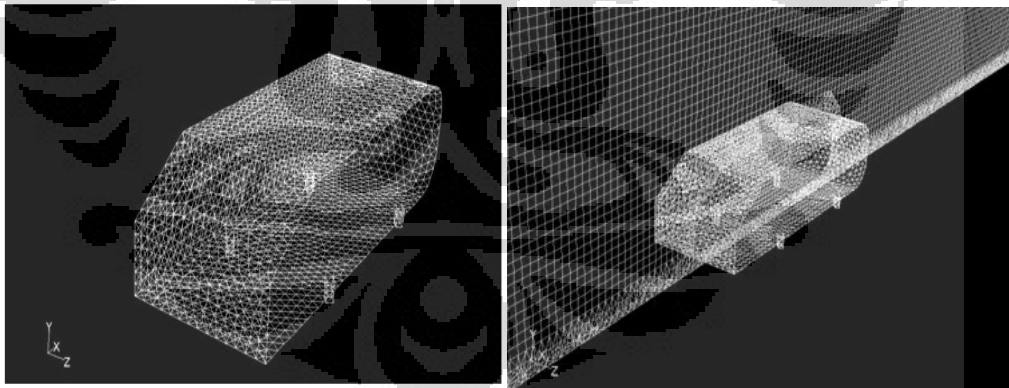
Dimana,

γ = Sudut yang dibentuk oleh juring eksitasi (78.52°)

r = Radius kelengkungan tepi atas model (0.025 m)

z = lebar slot eksitasi (0.02288 m)

Jenis elemen mesh yang digunakan untuk diskritisasi adalah *tet/hybrid* dengan tipe *hex core*, dengan jumlah total *grid* pada domain adalah lebih dari 1.7 juta. Kondisi *grid* yaitu *densitas* dan *skewness* perlu dikontrol karena merupakan salah satu faktor yang menentukan hasil dari simulasi numerik yang dijalankan. Semakin padat *grid* yang digunakan dan semakin kecil nilai *skewness* elemen akan menghasilkan solusi dengan nilai akurasi yang lebih tinggi.

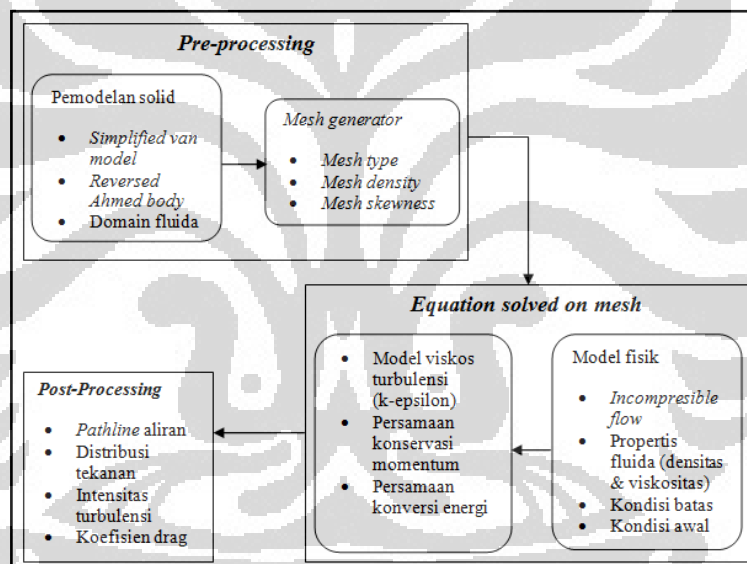


Gambar 3.5 Tampilan *grid* yang digunakan pada CFD

Dalam kajian penelitian ini, model *reversed Ahmed body* dialiri oleh udara dengan 3 variasi kecepatan *upstream*, U_o , yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s searah dengan sumbu x-positif. Nilai ini masing-masing bersesuaian dengan bilangan *Re* sebesar 1.99×10^{-5} , 2.48×10^{-5} , 2.98×10^{-5} dengan acuan

panjang model uji (l). Sedangkan variasi kontrol aliran berupa *blowing* divariasikan pada kecepatan 0.5 m/s, 0.75 m/s, dan 1 m/s.

Pendekatan model aliran yang digunakan adalah dengan model turbulensi K-epsilon standard, dengan asumsi aliran telah berada pada region turbulen sepenuhnya. Model K-epsilon standard ini telah digunakan secara luas dalam permodelan drag aerodinamika dan menunjukkan hasil yang mendekati atau bersesuaian dengan data eksperimen pada terowongan angin. Selain itu, dalam komputasi ini diasumsikan bahwa medan aliran bersifat *incrompressible*, dan aliran bebas jauh di hulu (*mean free stream at far upstream region*) berada dalam kondisi tunak dan seragam.



Gambar 3.6 Skema pemodelan pada CFD

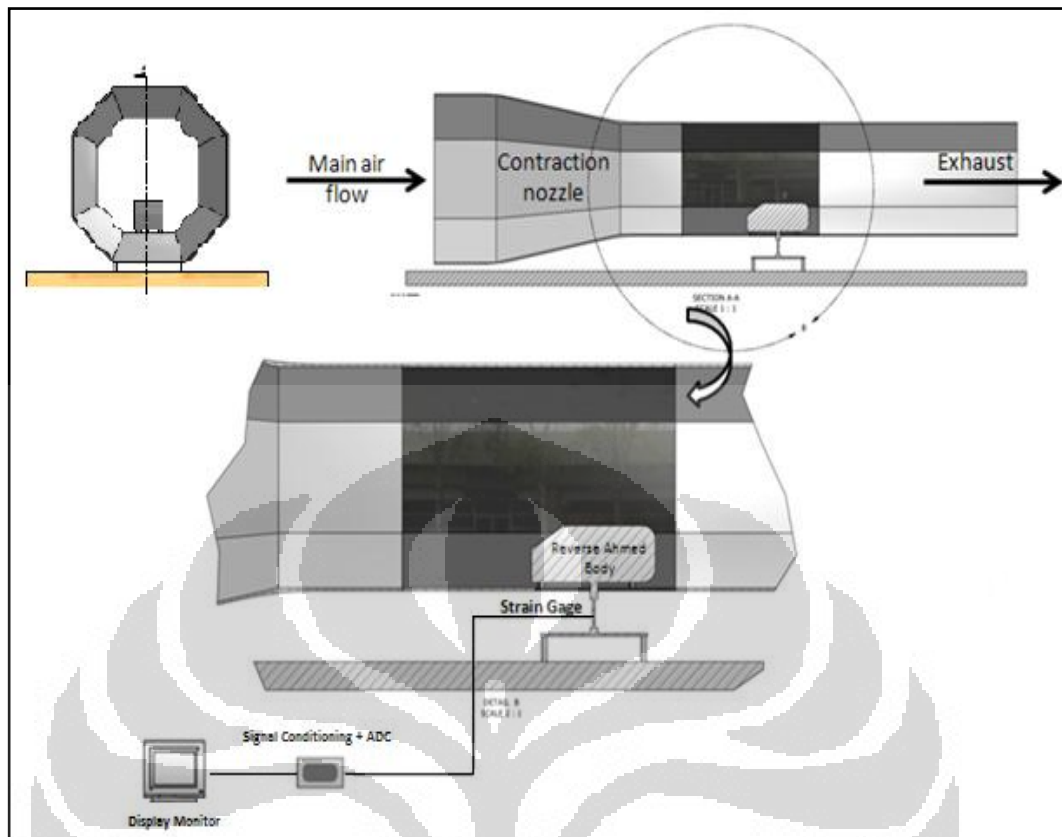
3.3 Metode Eksperimental

Pada metode eksperimen, model *reversed Ahmed body* terbuat dari bahan akrilik dengan skala $\frac{1}{4}$ model *Ahmed body*. Model *reversed Ahmed body* terdiri dari 2 model yaitu, model untuk aliran tanpa kontrol aktif dan model untuk aliran dengan kontrol aktif berupa *blowing*. Dua model ini ditempatkan di dalam terowongan angin yang mengalirkan udara *free stream* ke model. Parameter yang akan dikaji gaya drag aerodinamika.

Pengukuran gaya drag aerodinamika pada eksperimen adalah dengan menggunakan *load cell*. *Load cell* tersusun dari sebuah plat *stainless steel* yang telah dipasang *strain gage* disisi depan dan belakang dan dihubungkan ke model *reversed Ahmed body* dengan menggunakan batang aluminium. Model *reversed Ahmed body* yang ditempatkan dalam terowongan angin nantinya dialiri udara sehingga model menerima gaya dorong. Gaya dorong yang diterima oleh model tersebut juga akan diterima oleh plat yang membuat plat mengalami *bending*. *Strain gage* akan membaca proses tersebut dalam bentuk perubahan hambatan material dan menghasilkan tegangan keluar sebagai *output*. Dengan bantuan kalibrasi, output tegangan pada *strain gage* akan langsung ditampilkan dalam bentuk gaya dengan satuan gram.



Gambar 3.7 Penempatan model pada *load cell*



Gambar 3.8 Skema pengukuran gaya drag aerodinamika

3.4 Fasilitas dan Peralatan Lab Pengujian

Pada proses pengujian ini fasilitas terowongan angin yang digunakan adalah terowongan angin subsonik yang terdapat di Laboratorium Mekanika Fluida Universitas Indonesia Depok.

3.4.1 Terowongan angin (*wind tunnel*)

Terowongan angin yang digunakan merupakan produk dari Armfield dengan kode C2-00, mempunyai panjang 260 cm dan diameter mulut 55 cm serta motor DC dengan putaran 2800 rpm dan daya 1.5 kW untuk menggerakkan blower axial. Terowongan angin memiliki satu diffuser yang berfungsi untuk menyeragamkan arah aliran. Kecepatan aliran udara maksimum yang mampu dibangkitkan dalam seksi uji adalah 70 km/jam.



Gambar 3.9 Terowongan angin *subsonic* yang digunakan pada penelitian

Dalam metode eksperimental ini terowongan angin perlu dikalibrasi dan diukur nilai intensitas turbulensinya pada keadaan aliran bebas. Aliran dalam seksi uji dikalibrasi dengan mengukur kecepatan aliran bebas pada titik tengah dari seksi uji dan disesuaikan dengan putaran blower axial yang dikontrol dalam suatu unit panel. Untuk mengukur kecepatan aliran digunakan instrumen *hot wire*.



Gambar 3.10 Motor DC dan unit kontrol penggerak *blower axial*

Untuk mengukur intensitas turbulensi aliran pada seksi uji, dilakukan pengukuran kecepatan sepanjang garis tengah seksi uji dengan interval jarak 1 cm, data pengukuran kecepatan diambil sebanyak 50 data untuk setiap titik ukur pada garis tengah. Nilai intensitas turbulensi pada seksi uji untuk kecepatan aliran bebas 16.7 m/s diperoleh 1%, dan menunjukkan bahwa terowongan angin memiliki aliran yang *steady*.



Gambar 3.11 Pengukuran kecepatan dalam seksi uji dengan *hot wire*.

3.4.2 Peralatan

a. Tabung Pitot

Tabung pitot digunakan untuk mengukur tekanan statik dan dinamik. Tabung pitot ditempatkan menghadap ke hulu di tengah terowongan angin yang sedang mengalirkan udara.

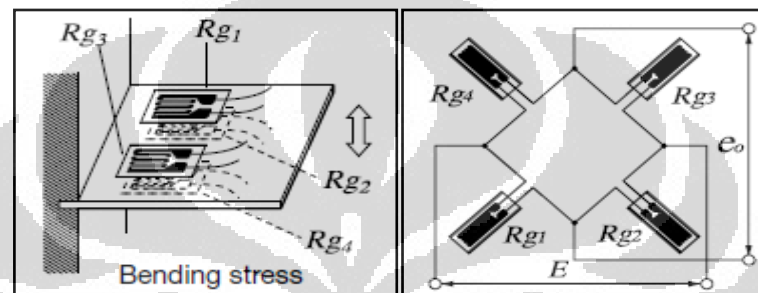


Gambar 3.12 Pengukuran tekanan statik dan dinamik pada seksi uji dengan tabung pitot

Untuk membaca besaran tekanan yang disalurkan oleh tabung pitot digunakan *pressure transducer*.

b. Load cell

Load cell digunakan untuk mengukur gaya-gaya aerodinamika akibat aliran dalam terowongan angin dan terdiri dari *strain gage* yang ditempatkan pada sebuah plat.



Gambar 3.13 Konfigurasi 4 gage aktif untuk pengukuran bending

Strain gage yang digunakan adalah jenis *foil strain gage* produk dari SHOWA Measuring Instruments Co., Ltd., memiliki spesifikasi berikut.

- Type : N11-FA-5-350-11
- Gauge length (mm) : 5
- Resistance (Ω):
- Temp. Comp. : steel / 11 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
- Thermal output ($\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$) : ± 2

Strain gage yang digunakan berjumlah 4 buah yang kemudian dirangkai menjadi sebuah jembatan *Wheatstone* penuh. Untuk membaca tegangan keluaran dari *strain gage* digunakan alat pengkondisian sinyal sekaligus sebagai monitor, produk dari Excellent Scale dengan spesifikasi berikut.

- Model : XK3190-A12
- Accuracy : Grade III, n3000
- Sample rate : 10 times / second
- Load cell* sensitivity : 1.5-3mV / V
- Scale interval : 1/2/5/10/20/50 for option

- f. Operating temperature/humidity : 0-40 °C ; ≤90% RH

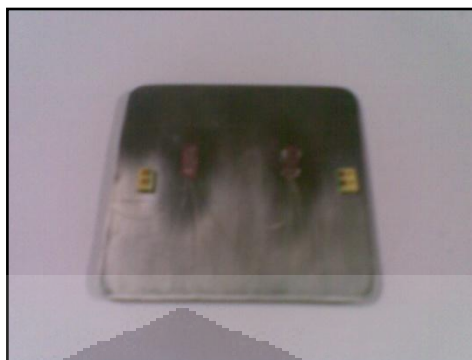


Gambar 3.14 A12 produk dari *Excellent Scale* (monitor dan pengkondisian sinyal)

Alat ini pada prinsipnya berfungsi sebagai penkondisian sinyal sekaligus berfungsi sebagai trigger dan recorder. Proses pengkondisian sinyal yang dilakukan meliputi filtering, isolasi, amplifikasi, dan konversi.

Proses instalasi strain gage sehingga menjadi sebuah *load cell* dapat diringkas sebagai berikut.

1. Mempersiapkan alat untuk proses pemasangan *strain gage*.
2. Melakukan proses amplas bagian yang akan dipasang *strain gage* dengan pola melingkar. Amplas yang digunakan adalah amplas dengan kekasaran yang semakin halus, terakhir amplas dengan nomor kekasaran 1500.
3. Menandai lokasi pemasangan, kemudian membersihkan dengan menggunakan *acetone* dan kertas tissue.
4. Memposisikan *strain gage* pada *marking* yang telah dibuat.
5. Memberikan lem pada bagian bawah *strain gage* dan permukaan benda uji.
6. Menempelkan *strain gage* ke benda uji dan menekan seluruh permukaannya dengan ibu jari selama 60 detik.
7. Menyolder kaki *strain gage* dengan terminal.
8. Melakukan tes tahanan antara kedua kaki *strain gage*, dan mengecek apakah terjadi *short* dengan *body part* yang akan diukur.
9. Melakukan proses instalasi alat pengkondisian sinyal dan monitor.
10. Melakukan kalibrasi.



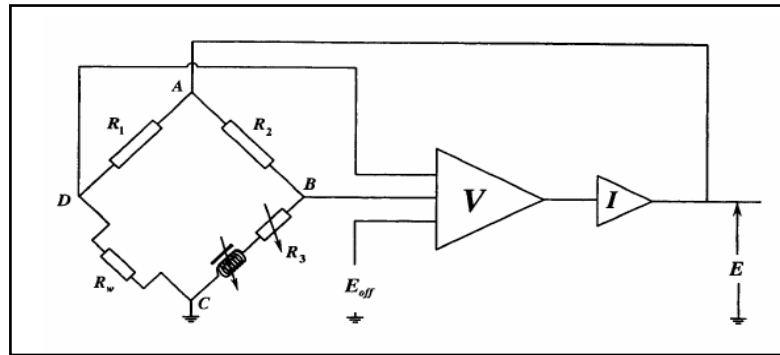
Gambar 3.15 *Strain gage* yang telah ditempelkan pada plat *stainless steel*

Kalibrasi dari *load cell* dilakukan dengan menempatkan beban yang telah diketahui massanya pada ujung dari *load cell*. Nilai beban ini pertama dimasukkan sebagai data awal yang direkam oleh monitor, kemudian beban massa sesungguhnya diletakkan pada *load cell* dan monitor akan menyimpan informasi setting ini sebagai nilai konversi untuk proses pengukuran selanjutnya.

Beban yang digunakan pada kalibrasi ini adalah timbangan digital. Timbangan tersebut diposisikan berdiri dan tepat berada di samping model *reversed Ahmed body* yang telah dipasang *load cell*. Selanjutnya timbangan akan didorong dan menyentuh model sehingga besar gaya dorong tersebut akan ditampilkan dalam display timbangan. Besar gaya yang terbaca pada *display* timbangan kemudian dimasukkan ke dalam *input load* pada monitor.

c. *Hot wire*

Hot wire digunakan untuk mengukur kecepatan aliran dalam seksi uji dan aliran yang dihasilkan oleh *blowing*. Prinsip pengukuran kecepatan alir fluida pada *hot wire* adalah berdasarkan prinsip bahwa perpindahan panas pada suatu bahan bergantung pada kecepatan aliran fluida yang mengalir di sekitar benda. *Hot wire* yang digunakan adalah produk dari Lutron dan merupakan jenis *constant temperature anemometry* (CTA), dimana bidang sensor tegak lurus dengan sumbu batang *probe*.



Gambar 3.16 Skema elektrikal dari CTA



Gambar 3.17 Hot Wire

Spesifikasi dari hot wire yang digunakan adalah sebagai berikut.

- Model : AM-4204
- Range pengukuran (m/s) : 0.2-20 m/s
- Sensor structure / air velocity : tinny glass bead thermistor
- Sensor structure / temperature : precision thermistor
- Sampling time (s) : 0.8
- Operating temperature ($^{\circ}\text{C}$) : 0-50
- Operating humidity (% RH) : ≤ 80
- Power supply : 1.5 V AAA x 6PCs

d. Kompresor

Untuk memberikan kontrol aliran berupa *blowing* pada aliran disekitar model digunakan kompresor dengan daya hisapan maksimal terukur pada model

adalah 1.8 m/s. Spesifikasi dari kompresor yang digunakan adalah sebagai berikut :

- a. Model : MultiPro Air Compressor 080500075 BC-125-CM15W
- b. Voltage : 220 V
- c. Speed : 2850 rpm
- d. Discharge: 125 L/min
- e. Power : 1 HP
- f. Frequency: 50 Hz
- g. Tank : 25 L
- h. Pressure : 115 Psi



(a) Tampak keseluruhan

(b) Pressure Regulator

Gambar 3.18 Kompresor yang digunakan pada eksperimen

3.5 Prosedur pengujian

Berikut ini adalah langkah-langkah prosedur pengujian gaya drag aerodinamika pada eksperimen dengan menggunakan *load cell*.

1. Model diletakkan di atas plat *stainless steel* yang telah dipasangkan *strain gage*
2. Model dimasukkan ke dalam *working section* namun plat tetap berada di luar terowongan angin

3. Motor terowongan angin dinyalakan sehingga udara masuk ke terowongan angin
4. Gaya dari udara yang diterima oleh model akan menyebabkan model mengalami dorongan ke belakang dan plat akan mengalami *bending*.
5. *Bending* pada plat akan dibaca oleh display dalam bentuk nilai gaya (gram)
6. Pengambilan data diambil selama 2 menit untuk masing-masing kecepatan.



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menganalisa pola dan struktur aliran, serta melihat pengaruh dari adanya kontrol aktif aliran pada model *reversed Ahmed body*, pembahasan difokuskan pada medan aliran, intensitas turbulensi dan gaya drag aerodinamika yang muncul. Hasil dari perhitungan numerik CFD ditampilkan dalam bentuk gambar *pathline*, kontur penuh dan plot titik-titik distribusi dari parameter di atas. Pada akhirnya, nilai gaya drag yang diperoleh dari CFD kemudian dibandingkan dengan gaya drag dari eksperimen untuk dianalisa.

Pada masing-masing parameter, data yang diambil adalah untuk 3 kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s, $U_o=13.9$ m/s, dan $U_o=16.7$ m/s, dan masing-masing kecepatan *upstream* tersebut divariasikan menjadi tanpa kontrol aliran dan dengan kontrol aliran berupa *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s, $U_{bl}=1$ m/s, dan $U_{bl}=1.5$ m/s.

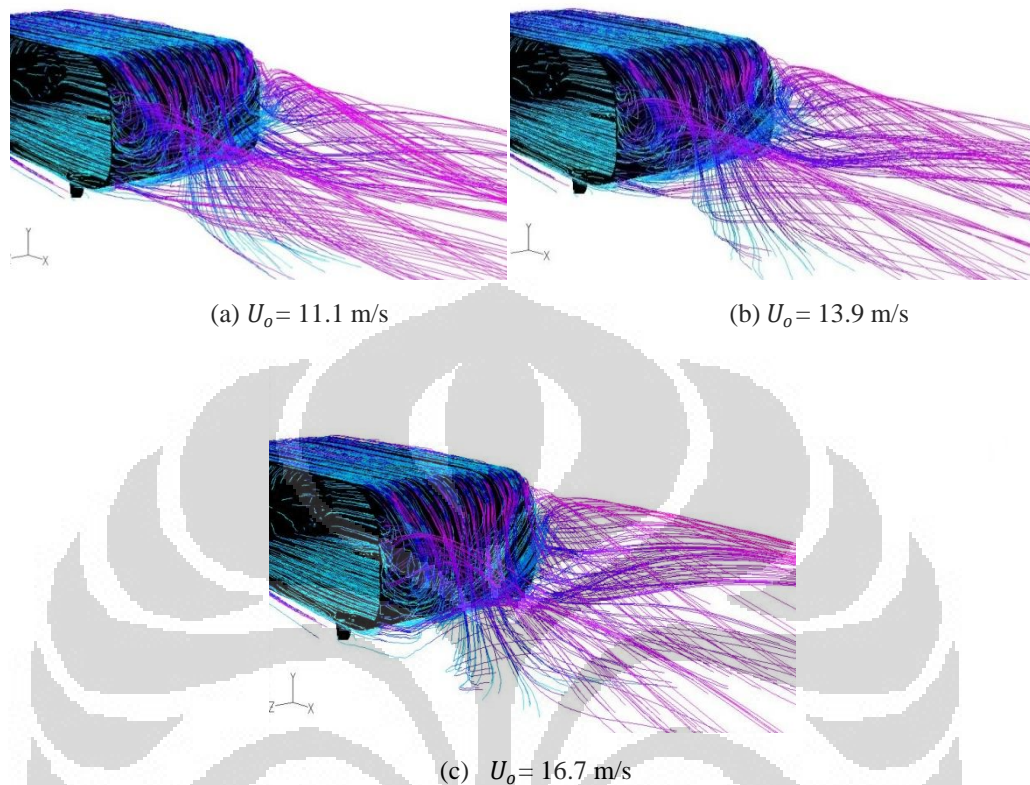
4.1. Medan Aliran

4.1.1 Medan Kecepatan

Medan kecepatan yang ditampilkan adalah pada bagian belakang *reversed Ahmed body*. Dengan adanya medan kecepatan, posisi olakan (*wake*) yang terjadi akan diketahui baik untuk model tanpa kontrol aliran maupun model dengan menggunakan kontrol aliran berupa *blowing*. Medan kecepatan ini dapat dinyatakan dengan *pathline* aliran dan kontur penuh dari besaran kecepatan.

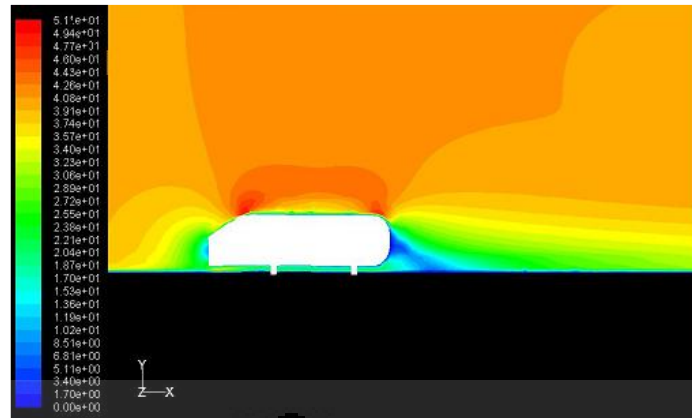
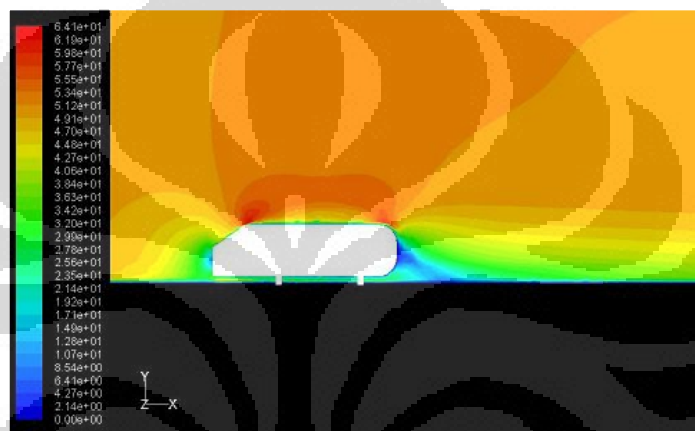
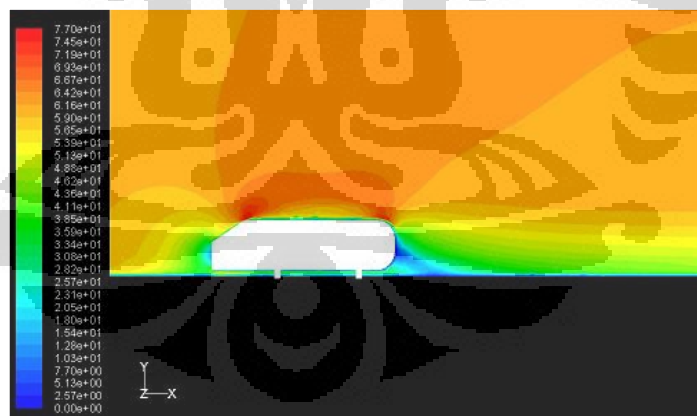
4.1.1.1 Tanpa kontrol aliran

Pada Gambar 4.1, terlihat bahwa separasi aliran terjadi pada bagian belakang model *reversed Ahmed body*. Separasi aliran ini disebabkan oleh fluida tidak dapat lagi mengalir mengikuti bentuk permukaan model. Hal tersebut mengakibatkan adanya aliran balik sehingga terbentuklah olakan (*wake*)



Gambar 4.1 Pathline tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan *upstream* U_o

Olakan (*wake*) juga disebabkan karena adanya *vortex longitudinal* yang terjadi pada bagian tepi sisi belakang model. *Vortex longitudinal* merupakan vortex yang sumbu putarannya searah dengan aliran. Akibat adanya separasi aliran pada bagian tengah, kecepatan aliran pada bagian tersebut akan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan aliran bagian tepi. Hal ini menyebabkan fluida pada bagian tepi akan mengalir menuju bagian tengah sehingga terbentuk *vortex longitudinal*. Hal ini terlihat pada Gambar 4.1 dimana olakan (*wake*) terjadi pada bagian tepi sisi belakang *reversed Ahmed body*.

(a) $U_o = 11.1$ m/s(a) $U_o = 13.9$ m/s(a) $U_o = 16.7$ m/s

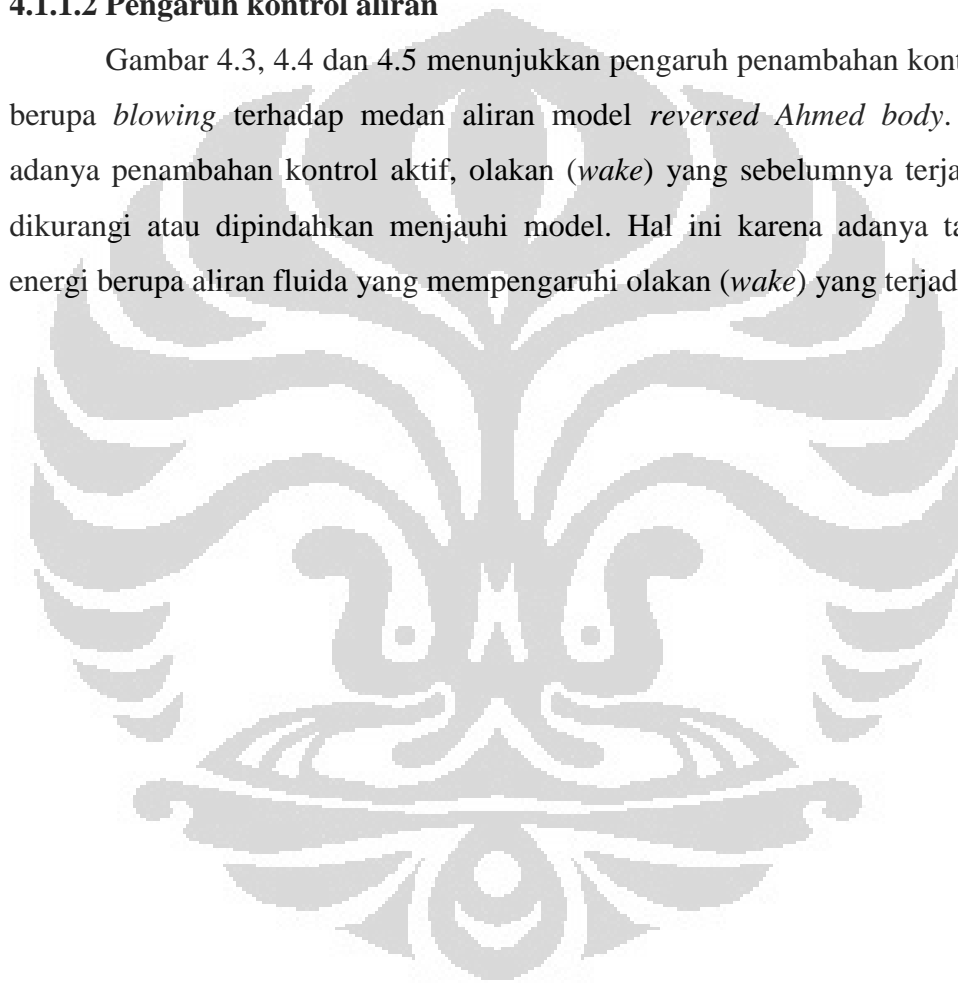
Gambar 4.2 Kontur penuh besaran kecepatan tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan *upstream* U_o

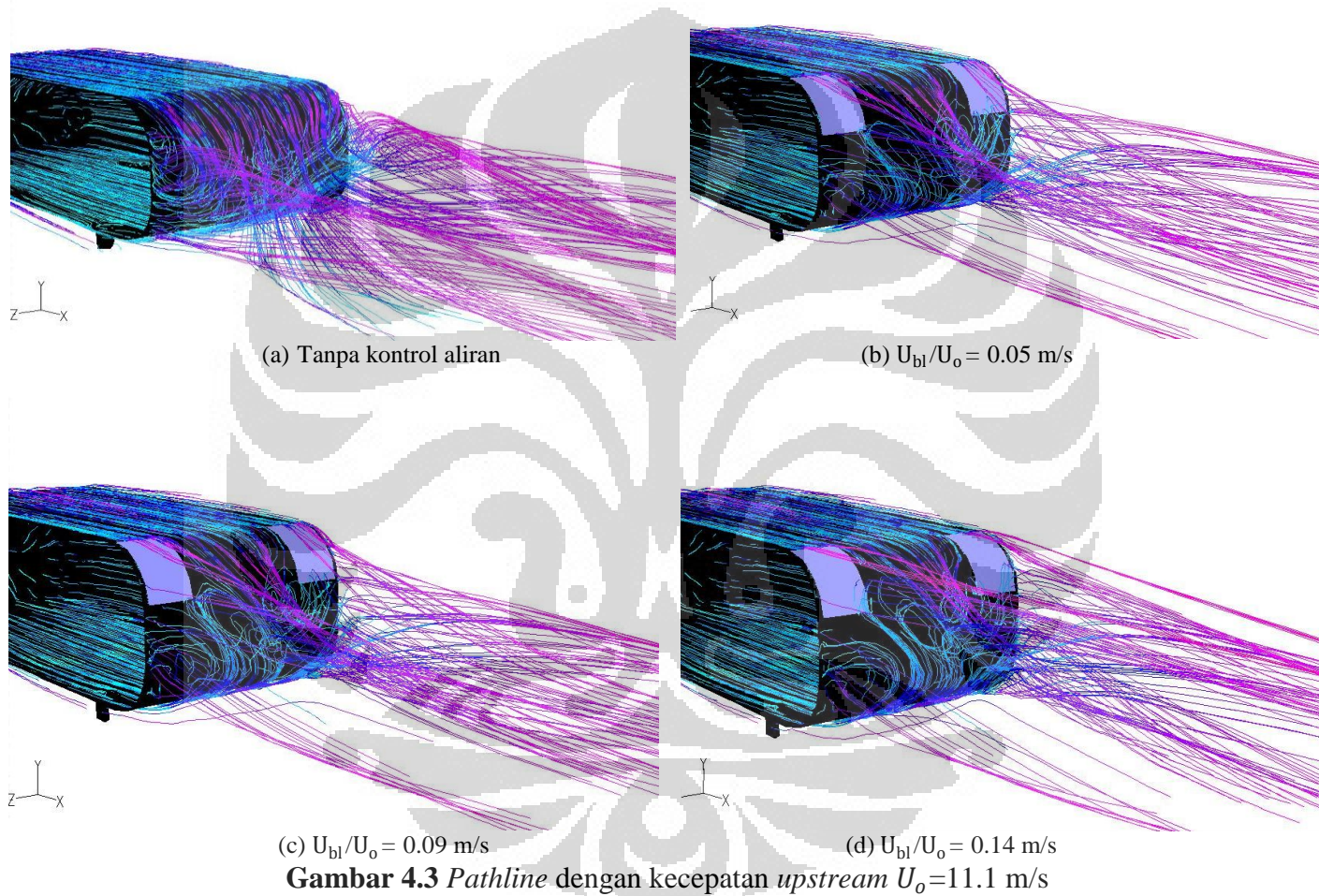
Gambar 4.2 menunjukkan region kecepatan pada model *reversed Ahmed body*. Terlihat bahwa kecepatan aliran yang lebih rendah yaitu yang berwarna biru, terjadi pada bagian belakang model. Pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s,

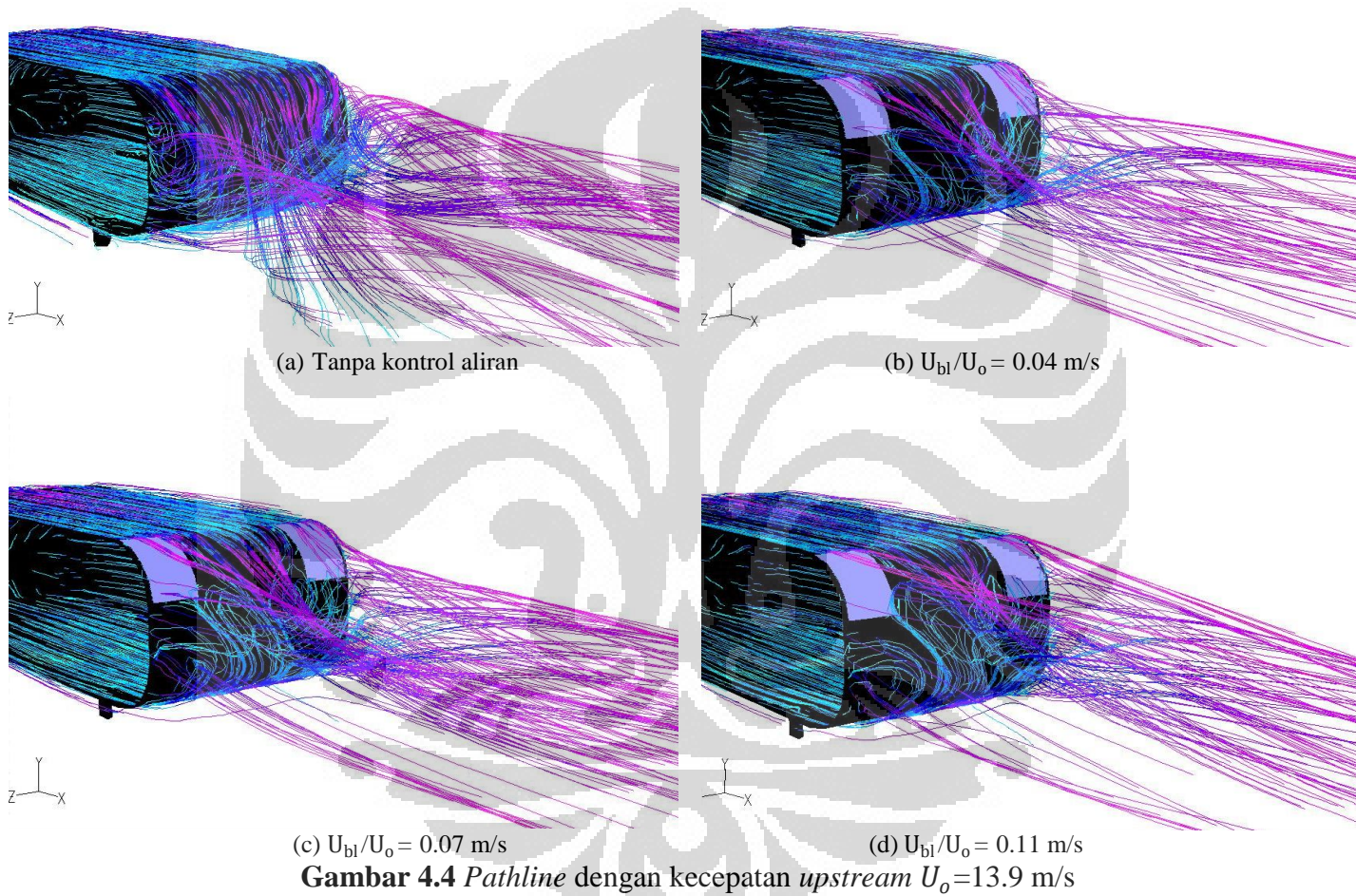
region kecepatan yang lebih rendah memiliki daerah luasan yang lebih besar dibandingkan kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Hal ini disebabkan oleh karena fluida mengalir pada bilangan Re yang berbeda-beda. Pada aliran dengan bilangan Re lebih rendah ($U_o=11.1\text{m/s}$), efek viskos pada aliran lebih terlihat dan memberikan pengaruh lebih dibanding aliran dengan bilangan Re lebih tinggi ($U_o=16.7\text{m/s}$).

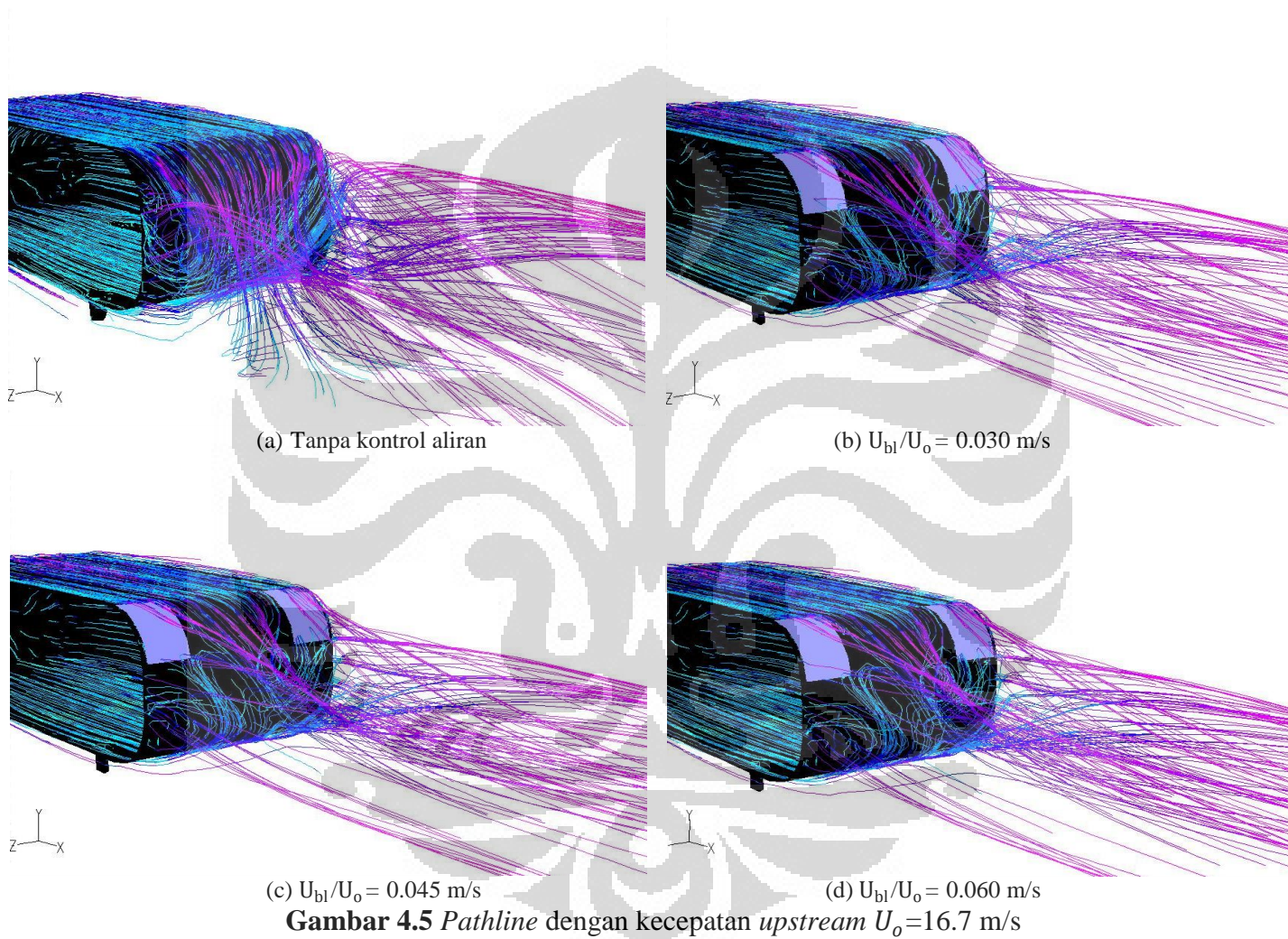
4.1.1.2 Pengaruh kontrol aliran

Gambar 4.3, 4.4 dan 4.5 menunjukkan pengaruh penambahan kontrol aktif berupa *blowing* terhadap medan aliran model *reversed Ahmed body*. Dengan adanya penambahan kontrol aktif, olakan (*wake*) yang sebelumnya terjadi dapat dikurangi atau dipindahkan menjauhi model. Hal ini karena adanya tambahan energi berupa aliran fluida yang mempengaruhi olakan (*wake*) yang terjadi.







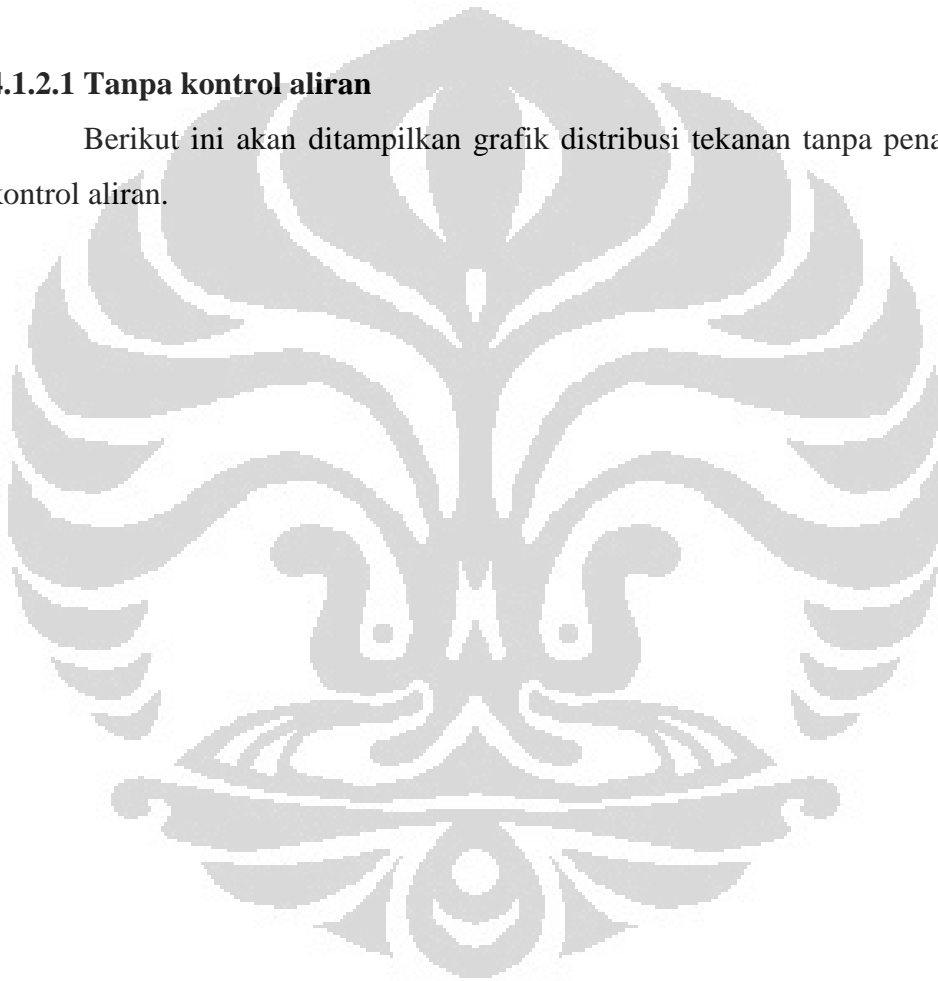


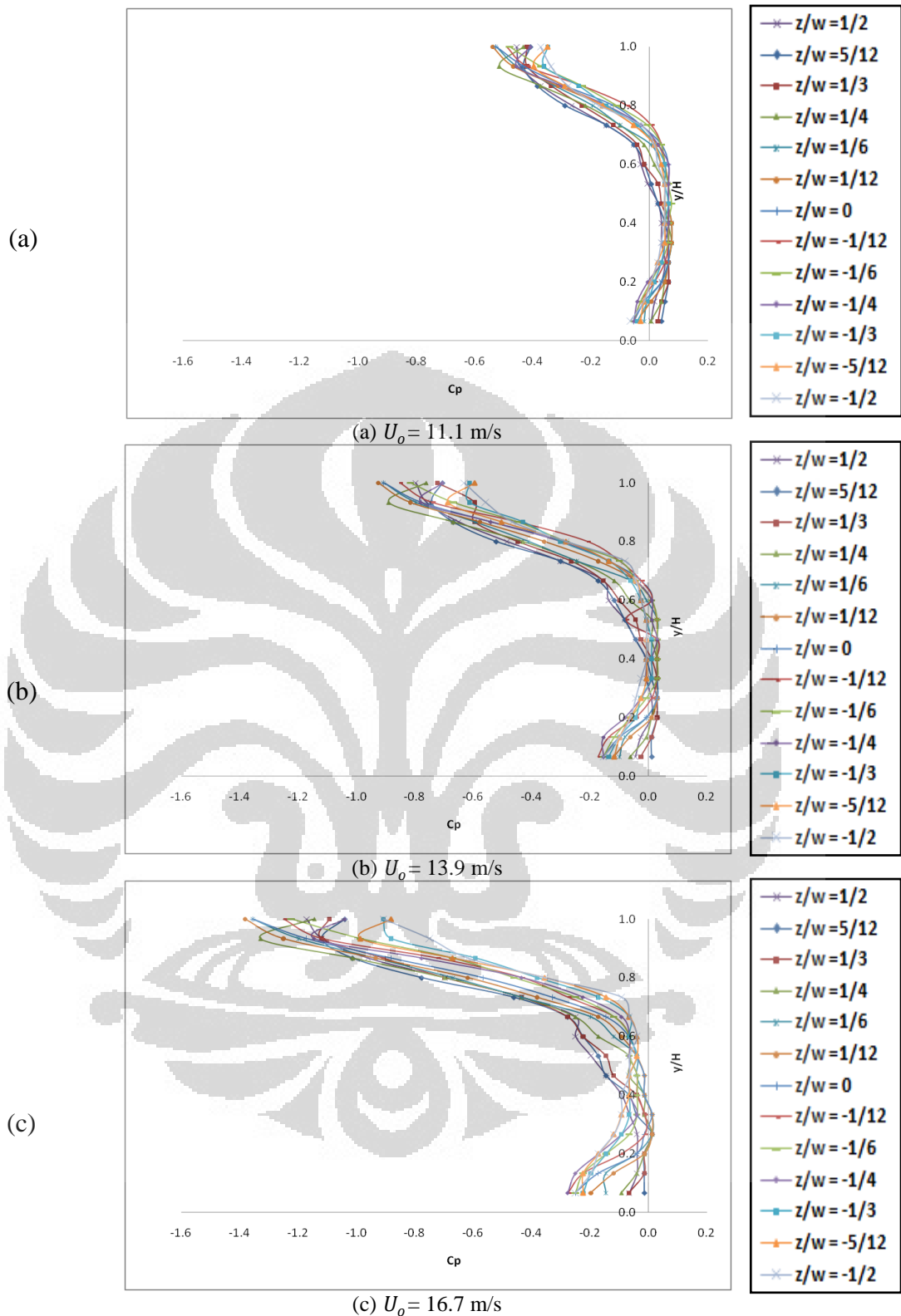
4.1.2 Distribusi tekanan

Distribusi tekanan yang ditampilkan adalah distribusi tekanan yang terjadi pada bagian belakang model *reversed Ahmed body*. Pola distribusi tekanan ditampilkan dalam bentuk grafik y/H terhadap C_p . y/H adalah perbandingan antara tinggi *grid* dengan tinggi model sedangkan C_p adalah koefisien tekanan. Dalam grafik juga ditampilkan beberapa garis yang menunjukkan pola distribusi tekanan dalam arah z/W . z/W adalah perbandingan antara lebar *grid* dengan lebar model.

4.1.2.1 Tanpa kontrol aliran

Berikut ini akan ditampilkan grafik distribusi tekanan tanpa penambahan kontrol aliran.





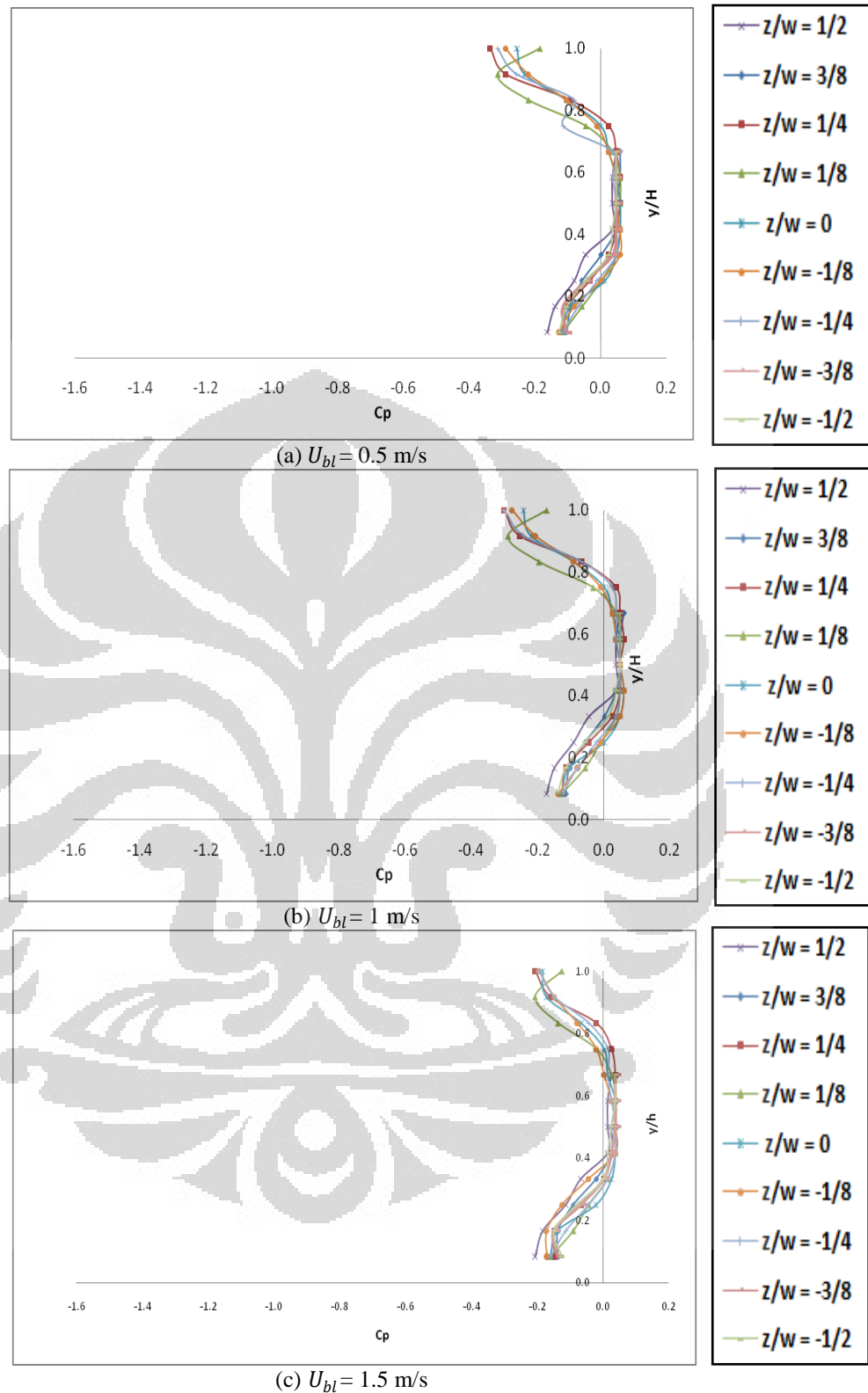
Gambar 4.6 Distribusi tekanan tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan *upstream* U_o

Pada Gambar 4.6 diketahui bahwa nilai koefisien tekanan cenderung mengalami penurunan pada $y/H=0.6$ hingga $y/H=1$. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa y/H merupakan perbandingan ketinggian *grid* dengan model, hal ini menunjukkan bahwa pada sisi atas bagian belakang model, nilai koefisien tekanan bernilai minimal. Pembahasan mengenai hal ini perlu diarahkan ke Gambar 4.2 yang menunjukkan kontur kecepatan aliran pada model *reversed Ahmed body*.

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa pada sisi atas bagian belakang model, kecepatan aliran cukup tinggi (warna hijau-kuning). Sisi tengah yang digambarkan dengan warna biru mengindikasikan kecepatan aliran yang rendah, selanjutnya pada sisi bawah yang ditandai dengan warna biru muda menyatakan bahwa kecepatan bagian tersebut lebih tinggi daripada sisi tengah. Kecepatan aliran berbanding terbalik dengan tekanan aliran tersebut, sehingga apabila kecepatan aliran tinggi maka tekanan yang dihasilkan oleh fluida tersebut menjadi kecil. Hal ini membuktikan pola grafik pada Gambar 4.6, dimana koefisien tekanan minimum terjadi pada daerah yang dialiri kecepatan tinggi. Dari grafik juga diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan *upstream*, nilai koefisien tekanan akan semakin rendah terutama pada sisi atas bagian belakang model.

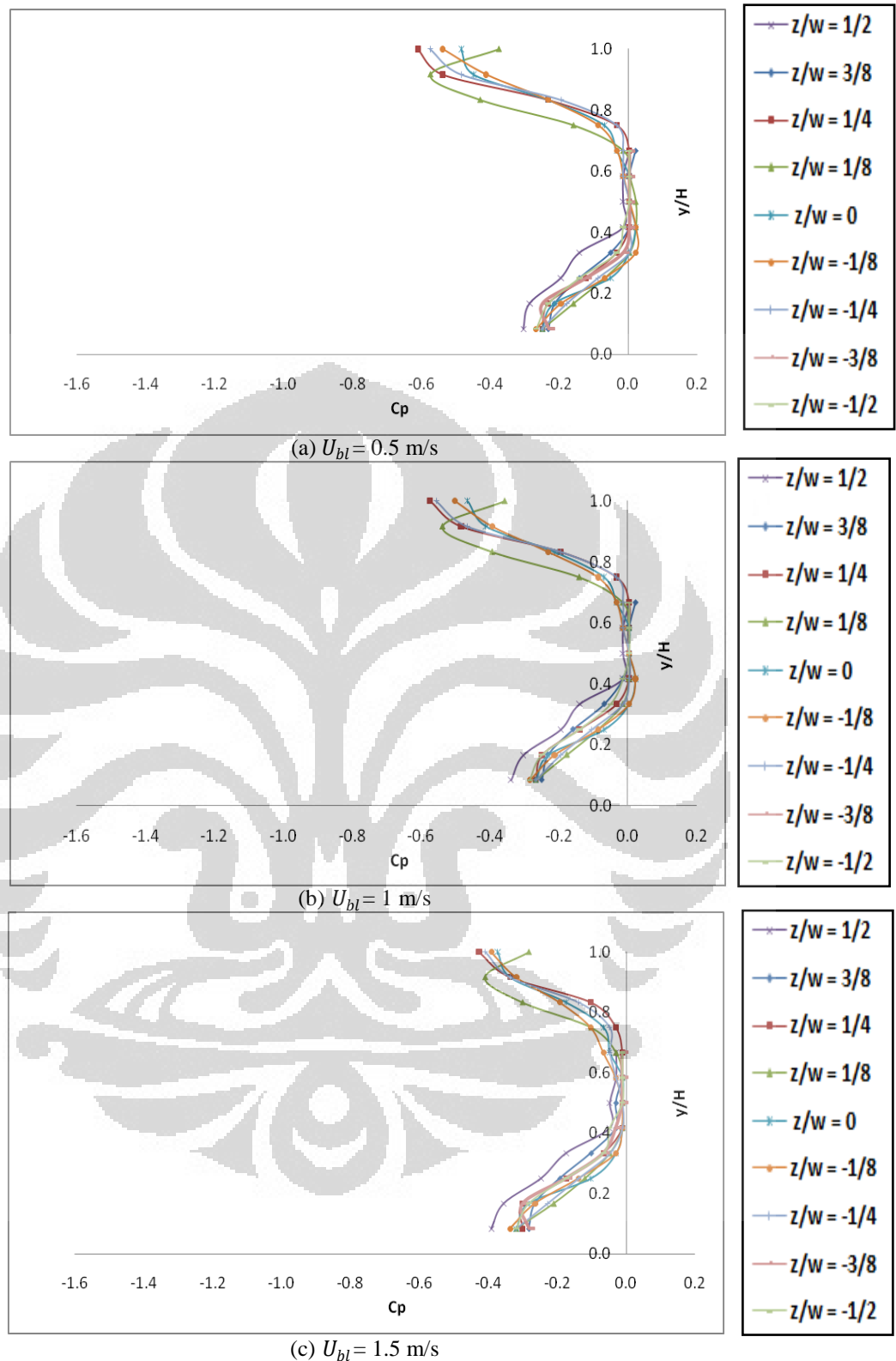
4.1.2.2 Pengaruh kontrol aliran

Berikut ini akan ditampilkan grafik distribusi tekanan dengan penambahan kontrol aliran.

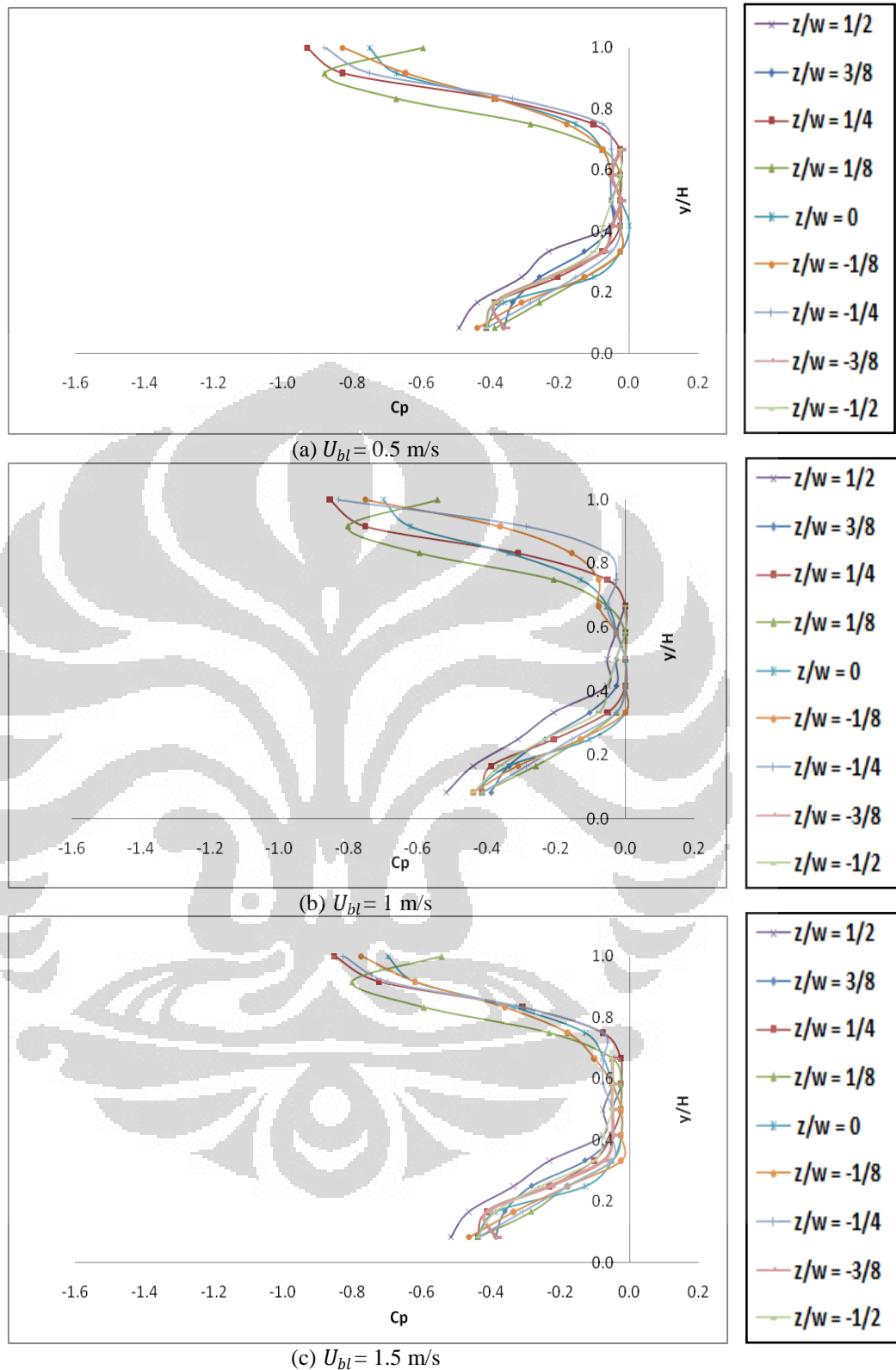


Gambar 4.7 Distribusi tekanan dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan *upstream*

$$U_o = 11.1 \text{ m/s}$$



Gambar 4.8 Distribusi tekanan dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan *upstream* $U_o = 13.9$ m/s



Gambar 4.9 Distribusi tekanan dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan *upstream* $U_o = 16.7 \text{ m/s}$

Gambar 4.7 hingga 4.9 menunjukkan pola koefisien tekanan dengan variasi kecepatan *upstream* U_o yaitu 11.1 m/s, 13,9 m/s, dan 16.7 m/s dan variasi kecepatan kontrol aliran berupa *blowing* U_{bl} yaitu 0.5 m/s, 1 m/s, dan 1.5 m/s. Nilai koefisien tekanan untuk masing-masing variasi kecepatan *upstream* dan kecepatan *blowing* akan ditampilkan dalam tabel berikut :

Tabel 4.1 Nilai minimum distribusi tekanan tanpa kontrol aktif

Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Koefisien Tekanan (C_p)	y/H	z/W
11.1	-0.54	1.00	- 1/12
13.9	-0.93	1.00	- 1/12
16.7	-1.39	1.00	- 1/12

Tabel 4.2 Nilai minimum distribusi tekanan dengan kontrol aktif berupa *blowing*

Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Kecepatan blowing, U_{bl} (m/s)	Koefisien Tekanan (C_p)	y/H	z/W
11.1	0.5	-0.34	1	1/4
	1	-0.30	1	- 1/4
	1.5	-0.21	0.92	1/8
13.9	0.5	-0.61	1	1/4
	1	-0.57	1	1/4
	1.5	-0.43	1	1/4
16.7	0.5	-0.93	1	1/4
	1	-0.86	1	1/4
	1.5	-0.85	1	1/4

Pada tabel 4.1 dan 4.2, terlihat bahwa penambahan kontrol aktif berupa *blowing* mengakibatkan terjadinya peningkatan nilai koefisien tekanan. Pada kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s, peningkatan nilai koefisien tekanan terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}= 1.5$ m/s yaitu sebesar 61.11 %. Pada kecepatan *upstream* $U_o=13.9$ m/s, peningkatan nilai koefisien tekanan terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}= 1.5$ m/s yaitu sebesar 53.78%. Pada

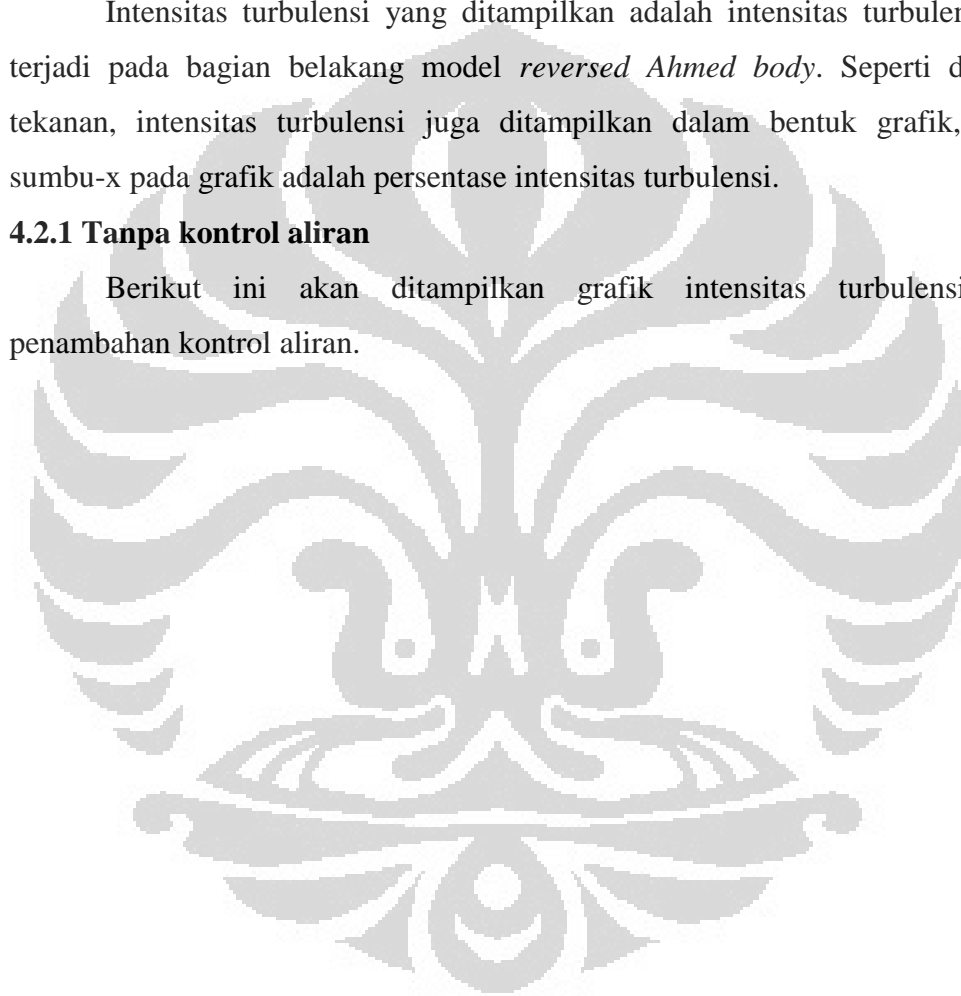
kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s, peningkatan nilai koefisien tekanan terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}= 1.5$ m/s yaitu sebesar 38.85%. Hal ini membuktikan bahwa *blowing* mampu mengurangi *total pressure loss* dan meningkatkan tekanan statik di permukaan benda atau model (Roumeas, Gillieron P dan Kourta A, 2008)

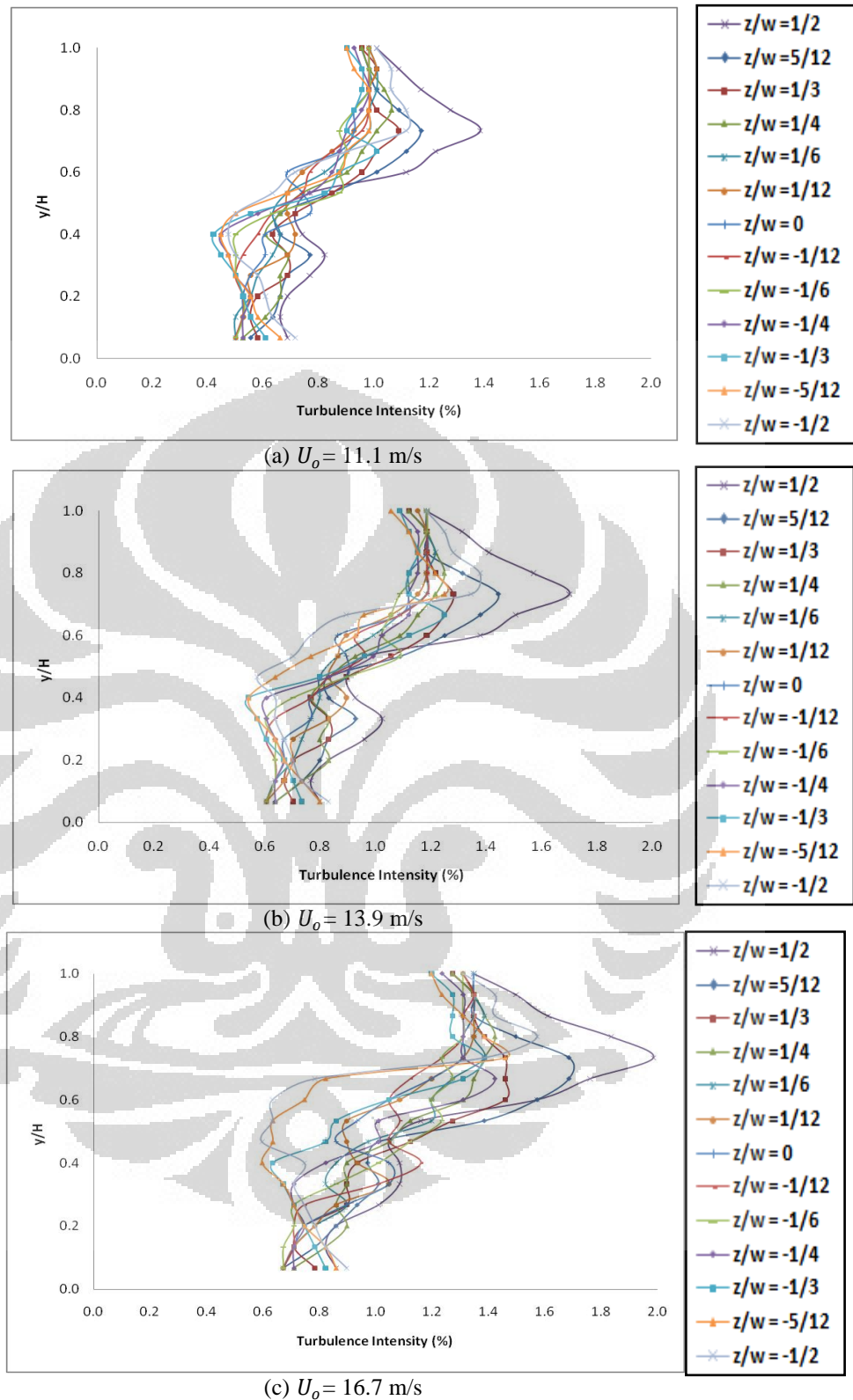
4.2 Intensitas turbulensi

Intensitas turbulensi yang ditampilkan adalah intensitas turbulensi yang terjadi pada bagian belakang model *reversed Ahmed body*. Seperti distribusi tekanan, intensitas turbulensi juga ditampilkan dalam bentuk grafik, namun sumbu-x pada grafik adalah persentase intensitas turbulensi.

4.2.1 Tanpa kontrol aliran

Berikut ini akan ditampilkan grafik intensitas turbulensi tanpa penambahan kontrol aliran.





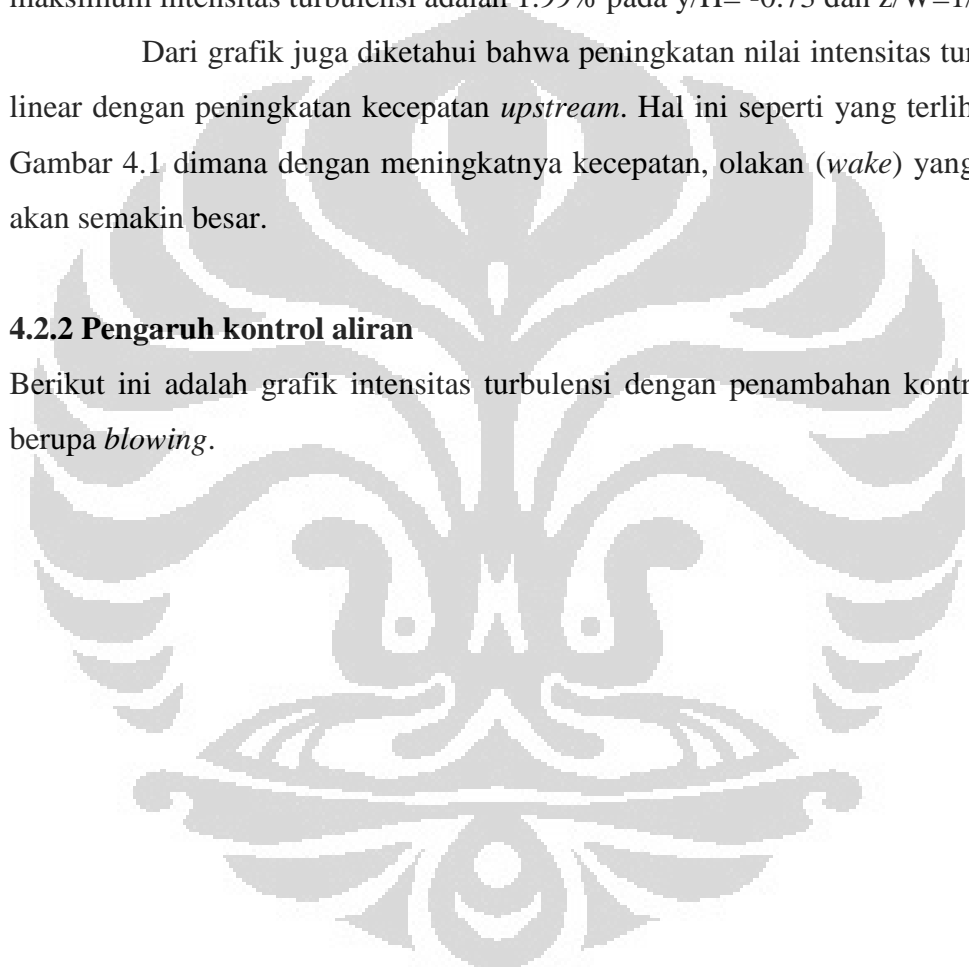
Gambar 4.10 Intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran dengan variasi kecepatan *upstream* U_o

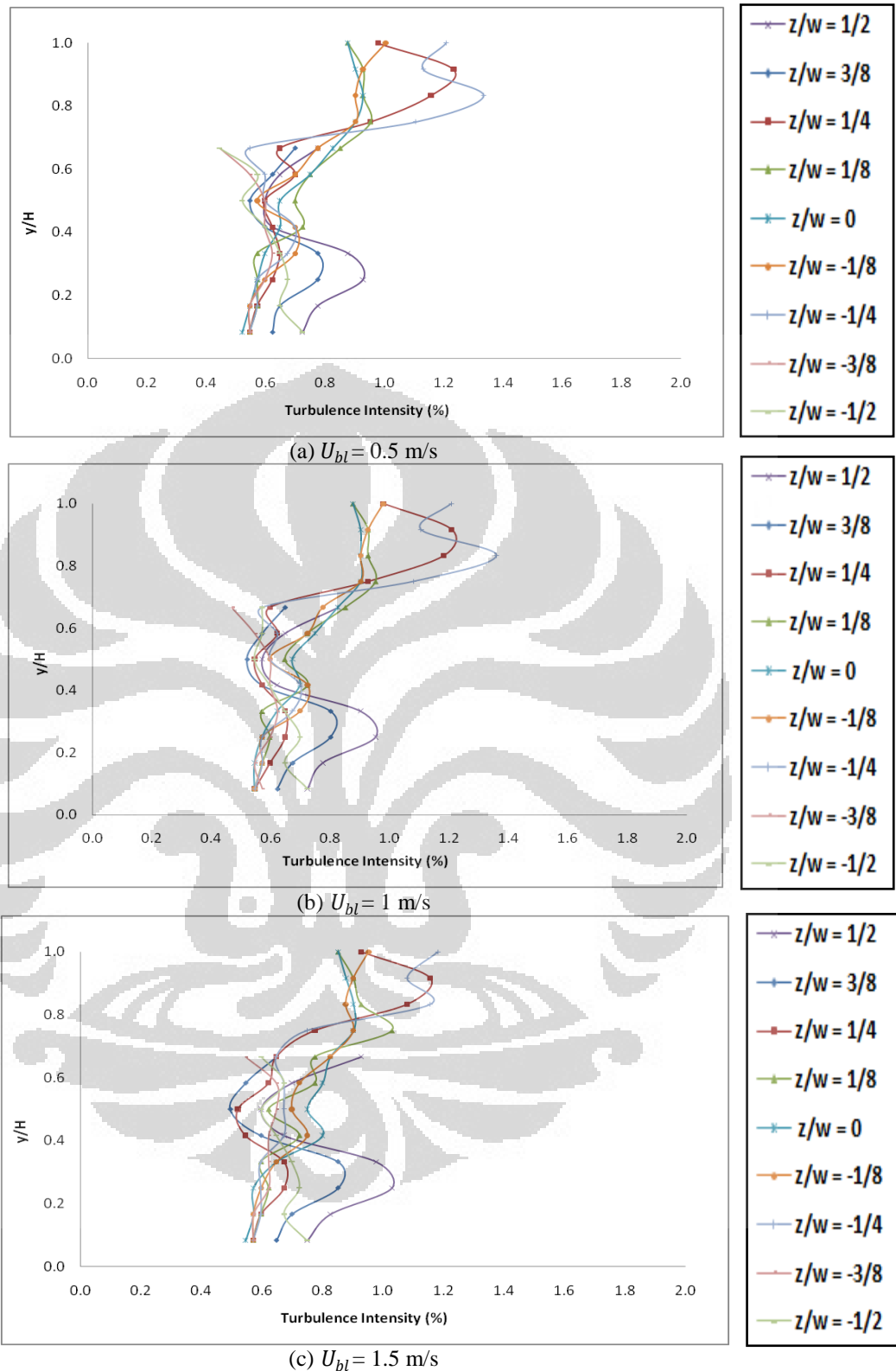
Pada Gambar 4.10 diketahui bahwa nilai intensitas turbulensi yang besar terjadi pada sisi tepi atas bagian belakang model. Hal ini sesuai dengan Gambar 4.1 dimana pada bagian tepi atas terjadi olakan (*wake*) yang disebabkan oleh separasi aliran. Pada kecepatan *upstream* $U_o = 11.1$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 1.38% pada $y/H = -0.73$ dan $z/W = 1/2$. Pada kecepatan *upstream* $U_o = 13.7$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 1.38% pada $y/H = -0.73$ dan $z/W = 1/2$. Sedangkan pada kecepatan *upstream* $U_o = 13.7$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 1.99% pada $y/H = -0.73$ dan $z/W = 1/2$.

Dari grafik juga diketahui bahwa peningkatan nilai intensitas turbulensi linear dengan peningkatan kecepatan *upstream*. Hal ini seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 dimana dengan meningkatnya kecepatan, olakan (*wake*) yang terjadi akan semakin besar.

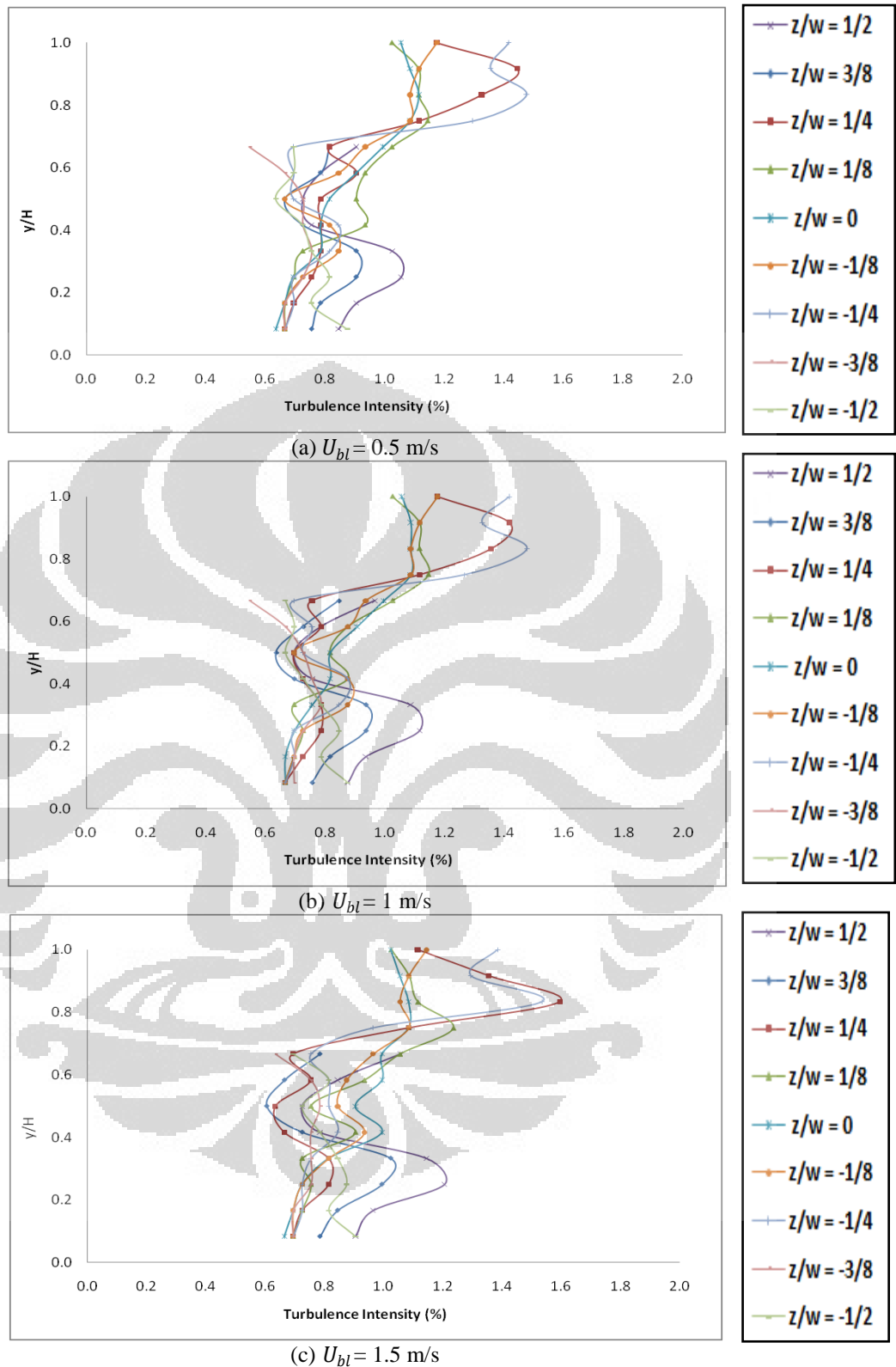
4.2.2 Pengaruh kontrol aliran

Berikut ini adalah grafik intensitas turbulensi dengan penambahan kontrol aktif berupa *blowing*.

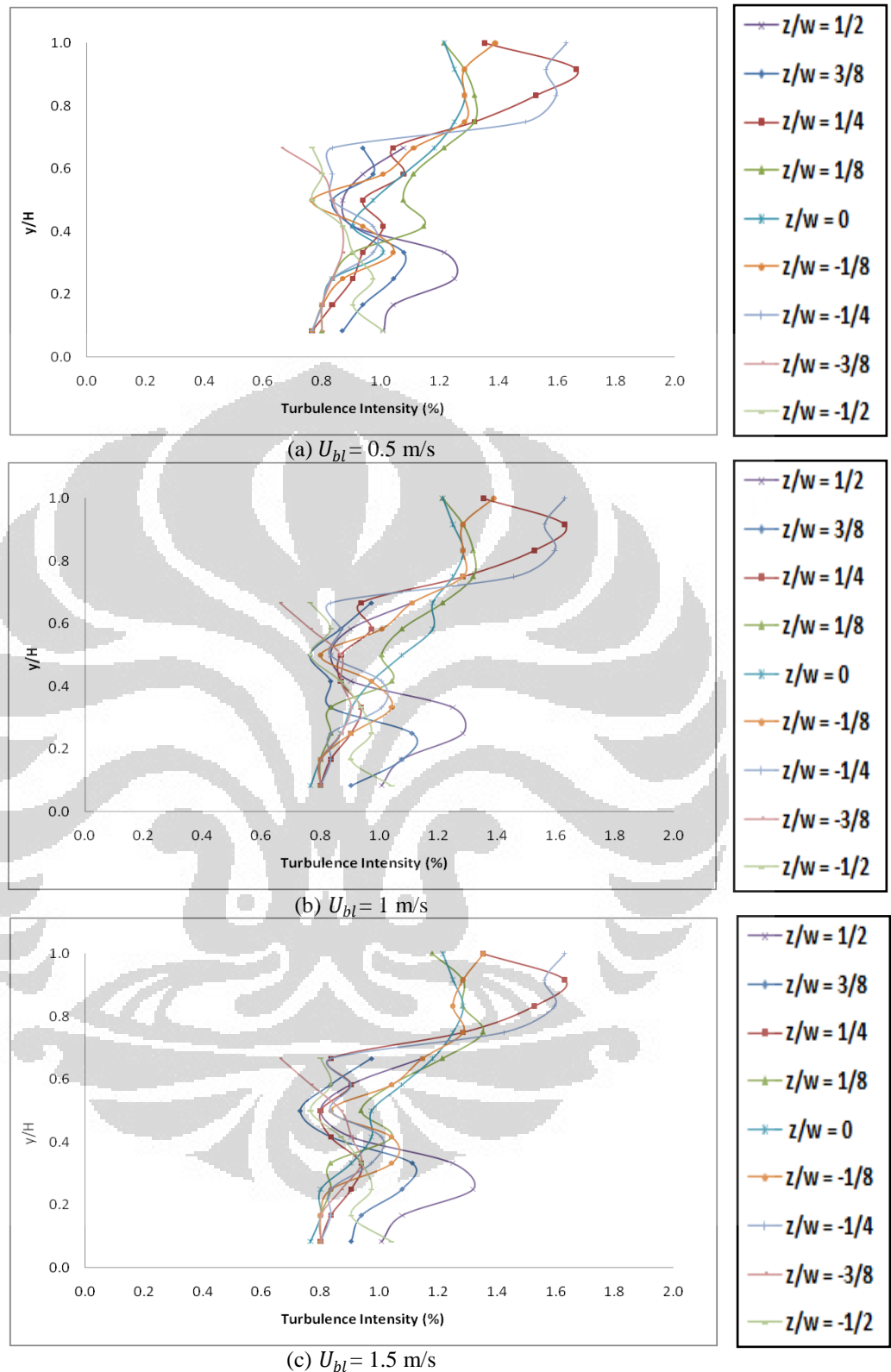




Gambar 4.11 Intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan upstream $U_o = 11.1 \text{ m/s}$



Gambar 4.12 Intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan upstream $U_o = 13.9$ m/s



Gambar 4.13 Intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan kontrol aliran dan kecepatan upstream $U_o = 16.7 \text{ m/s}$

Gambar 4.11 hingga 4.13 menunjukkan pola intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan *upstream* U_o yaitu 11.1 m/s, 13,9 m/s, dan 16.7 m/s dan variasi kecepatan kontrol aliran berupa *blowing* U_{bl} yaitu 0.5 m/s, 1 m/s, dan 1.5 m/s. Nilai intensitas turbulensi untuk masing-masing variasi kecepatan *upstream* dan kecepatan *blowing* akan ditampilkan dalam tabel berikut :

Tabel 4.3 Nilai maksimum intensitas turbulensi tanpa kontrol aktif

Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Intensitas turbulensi (%)	y/H	z/W
11.1	1.38	0.73	1/2
13.9	1.70	0.73	1/2
16.7	1.99	0.73	1/2

Tabel 4.4 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan kontrol aktif berupa *blowing*

Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Kecepatan blowing, U_{bl} (m/s)	Intensitas turbulensi (%)	y/H	z/W
11.1	0.5	1.33	0.83	1/4
	1	1.36	0.83	1/4
	1.5	1.18	1.00	1/4
13.9	0.5	1.48	0.83	1/4
	1	1.48	0.83	1/4
	1.5	1.60	0.83	- 1/4
16.7	0.5	1.67	0.92	- 1/4
	1	1.63	0.92	- 1/4
	1.5	1.63	0.92	1/4

Pada Tabel 4.3 dan 4.4, terlihat bahwa penambahan kontrol aktif berupa *blowing* mengakibatkan terjadinya pengurangan nilai intensitas turbulensi. Pada kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}=1.5$ m/s yaitu sebesar 14.5%. Pada kecepatan *upstream* $U_o=13.9$ m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi terbesar

terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}= 0.5$ m/s dan $U_{bl}= 1$ m/s yaitu sebesar 12.9%. Pada kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}= 1$ m/s dan $U_{bl}= 1.5$ m/s yaitu sebesar 18.1%.

Pengurangan intensitas turbulensi ini karena kontrol aliran berupa *blowing* mampu mengurangi olakan (*wake*) yang terjadi di belakang model *reversed Ahmed body* seperti yang terlihat pada Gambar 4.3, 4.4 dan 4.5.

4.3 Gaya Drag Aerodinamika

Beberapa parameter yang dibahas pada gaya drag aerodinamika ini adalah total gaya drag (N), koefisien drag (C_D), dan persentase pengurangan drag dari variasi kecepatan *upstream* U_o dan kecepatan *blowing* U_{bl} .

4.3.1 Metode Komputasional

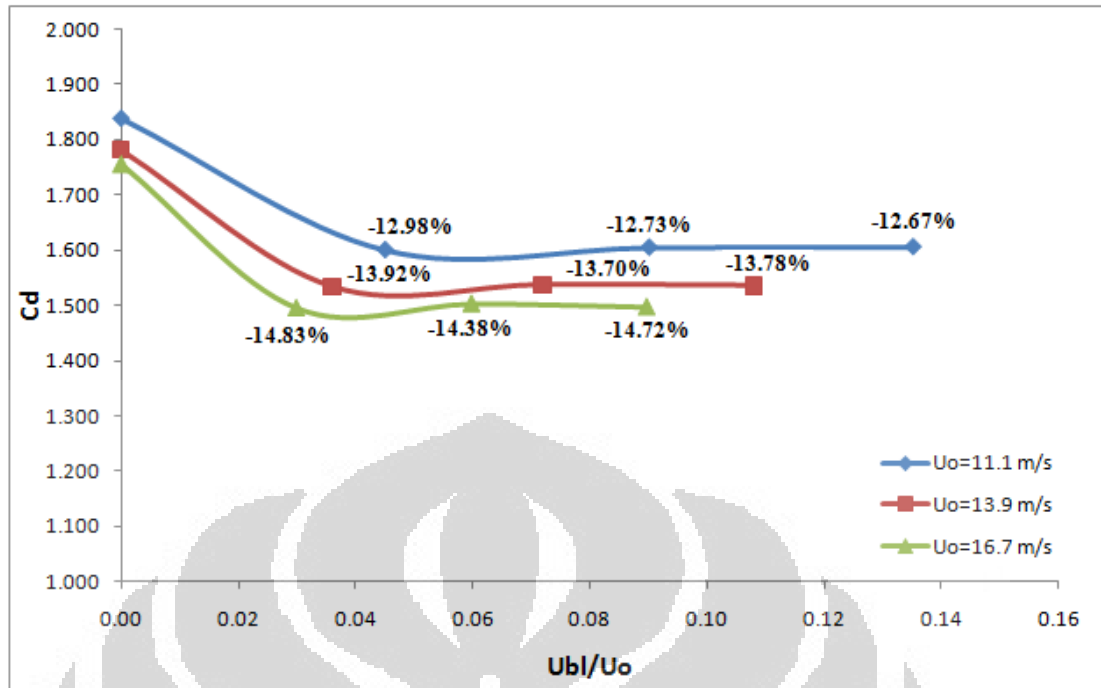
Tabel 4.5 menunjukkan bahwa pada 3 kecepatan *upstream* yang berbeda U_o , 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s, total gaya drag terbesar terjadi pada kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s. Semakin tinggi kecepatan *upstream* yang melewati model, separasi aliran juga akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan Gambar 4.1 dimana terlihat olakan (*wake*) yang terbesar terjadi pada kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s.

Berdasarkan Tabel 4.5, juga terlihat bahwa penambahan kontrol aktif aliran berupa *blowing* menyebabkan adanya pengurangan total gaya drag. Untuk kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s, pengurangan drag terbesar yaitu pada kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s yaitu 12.978%, pengurangan drag terbesar untuk kecepatan *upstream* $U_o=13.9$ m/s yaitu pada kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s sebesar 13.924%, sedangkan kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s juga terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s yaitu sebesar 14.833%. Namun secara keseluruhan, besar pengurangan drag untuk 3 variasi kecepatan *blowing* pada kecepatan *upstream* yang sama tidak terlalu jauh berbeda.

Tabel 4.5 Data gaya drag aerodinamika dengan metode komputasi

No	Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Kecepatan blowing, U_{bl} (m/s)	Perbandingan kecepatan (U_{bl}/U_o)	Total Gaya Drag (N)	C_d	Pengurangan gaya drag (%)
1	11.1	0	0.00	0.542	1.838	0.000
		0.5	0.05	0.472	1.600	12.978
		1	0.09	0.473	1.604	12.730
		1.5	0.14	0.473	1.605	12.673
2	13.9	0	0.00	0.823	1.781	0.000
		0.5	0.04	0.709	1.533	13.924
		1	0.07	0.711	1.537	13.697
		1.5	0.11	0.725	1.536	13.782
3	16.7	0	0.00	1.172	1.756	0.000
		0.5	0.03	0.998	1.495	14.833
		1	0.06	1.003	1.503	14.382
		1.5	0.09	0.999	1.497	14.722

Gambar 4.14 menunjukkan grafik koefisien drag terhadap perbandingan kecepatan *blowing* dan kecepatan *upstream*. Di dalam grafik juga ditampilkan masing-masing persentase pengurangan drag untuk masing-masing perbandingan kecepatan *blowing* dan kecepatan *upstream*. Berdasarkan Gambar 4.14, grafik yang terlihat pada 3 variasi kecepatan *upstream* menunjukkan tren yang hampir sama dimana nilai koefisien drag mengalami kenaikan dari kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s ke $U_{bl}=1$ m/s dan turun apabila kecepatan *blowing* dinaikkan menjadi $U_{bl}=1.5$ m/s. Namun tren tersebut tidak berlaku pada kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s yang menunjukkan kenaikan konstan dari kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s hingga $U_{bl}=1.5$ m/s.

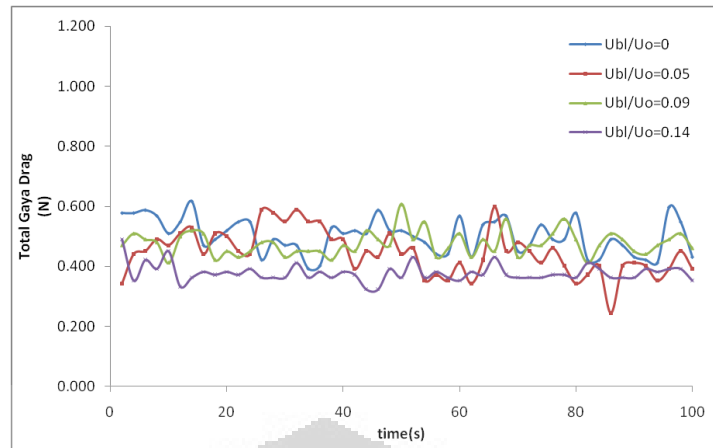
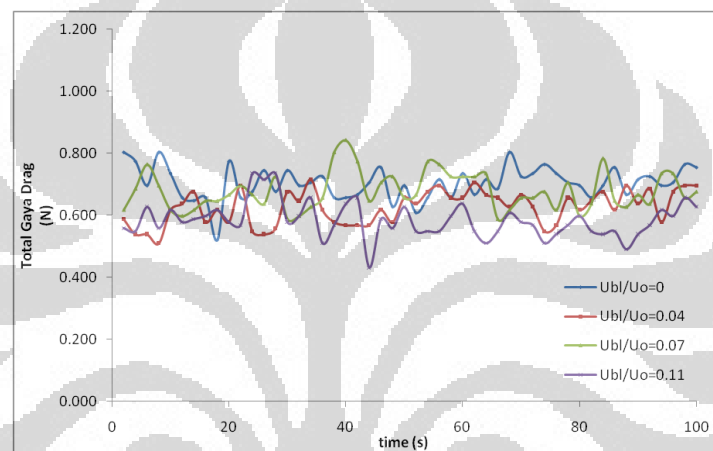
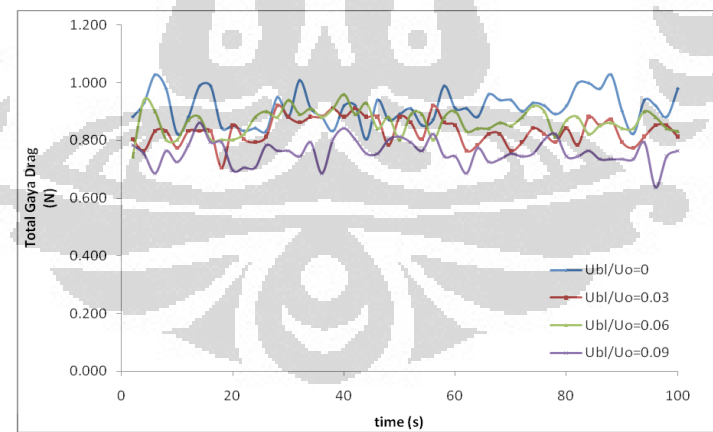


Gambar 4.14 Perbandingan koefisien drag terhadap fungsi dari kecepatan *blowing* dengan metode komputasi

4.3.2 Metode Eksperimen

Pengambilan data drag aerodinamika dengan metode eksperimen adalah dengan menggunakan *load cell*. Pengambilan data dilakukan selama 100 detik untuk masing-masing kecepatan, dan data yang diambil adalah setiap 2 detik sehingga jumlah data adalah 50 data. Rata-rata dari 50 data tersebut menjadi besar gaya drag aerodinamika masing-masing kecepatan.

Load cell yang digunakan memiliki ketelitian hingga 1 gram, sehingga data eksperimen yang diperoleh bersifat fluktuatif. Fluktuatif data tersebut dapat dilihat dari Gambar 4.15.

(a) $U_o=11.1$ m/s(b) $U_o=13.9$ m/s(c) $U_o=16.7$ m/s**Gambar 4.15** Fluktuasi data eksperimen dengan varisai kecepatan *upstream*

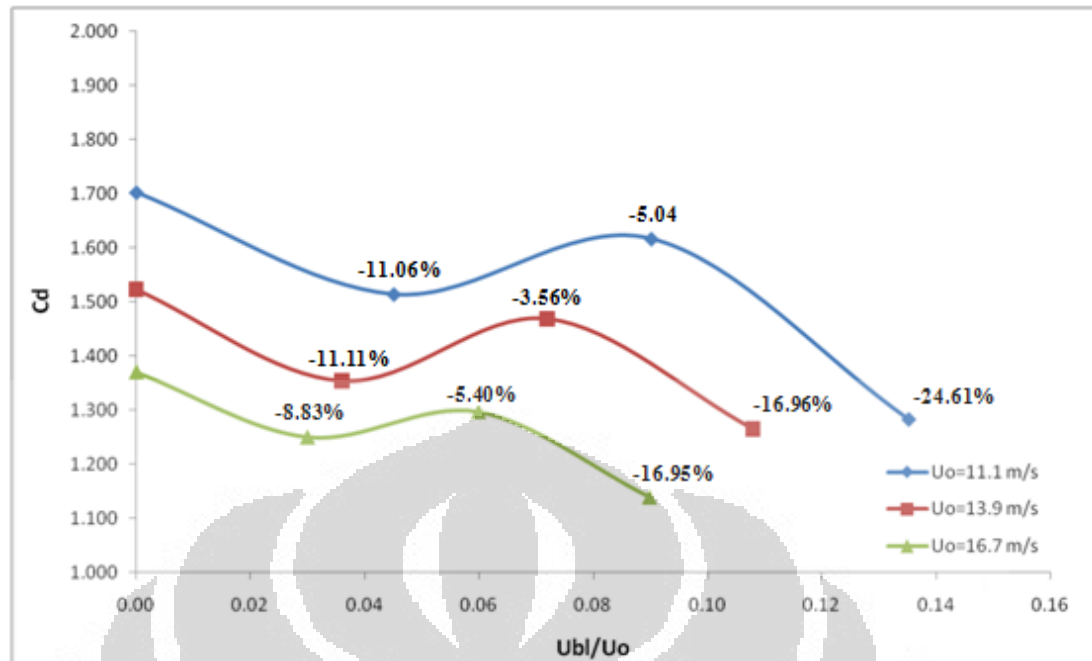
Tabel 4.6 menunjukkan beberapa parameter seperti total gaya drag (N), koefisien drag (C_D), dan persentase pengurangan drag dari variasi kecepatan *upstream* U_o dan kecepatan *blowing* U_{bl} . Pada 3 kecepatan *upstream* yang berbeda U_o , 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s, total gaya drag terbesar terjadi pada kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s, dan memiliki kesamaan dengan hasil yang diperoleh dari metode komputasi. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, semakin tinggi kecepatan *upstream* yang melewati model, separasi aliran juga akan semakin besar.

Berdasarkan Tabel 4.6, juga terlihat bahwa penambahan kontrol aktif aliran berupa *blowing* menyebabkan adanya pengurangan total gaya drag. Persentase pengurangan drag yang terbesar untuk variasi 3 kecepatan *upstream* U_o , 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s memiliki tren yang sama, yaitu kecepatan *blowing* $U_{bl}=1.5$ m/s. Besar persentasenya secara berturut-turut adalah 24.609%, 16.959%, dan 16.952%.

Tabel 4.6 Data drag aerodinamika pada eksperimen

No	Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Kecepatan blowing, U_{bl} (m/s)	Perbandingan kecepatan (U_{bl}/U_o)	Total Gaya Drag (N)	Standar Deviasi	C_d	Pengurangan gaya drag (%)
1	11.1	0	0.00	0.50176	0.06	1.702	0.000
		0.5	0.05	0.44629	0.07	1.514	11.055
		1	0.09	0.47648	0.04	1.616	5.039
		1.5	0.14	0.37828	0.03	1.283	24.609
2	13.9	0	0.00	0.70384	0.05	1.522	0.000
		0.5	0.04	0.62563	0.05	1.353	11.111
		1	0.07	0.67875	0.06	1.468	3.564
		1.5	0.11	0.58447	0.06	1.264	16.959
3	16.7	0	0.00	0.91454	0.06	1.370	0.000
		0.5	0.03	0.83378	0.05	1.249	8.830
		1	0.06	0.86514	0.04	1.296	5.401
		1.5	0.09	0.75950	0.04	1.138	16.952

Gambar 4.16 menunjukkan grafik koefisien drag terhadap perbandingan kecepatan *blowing* dan kecepatan *upstream*. Pada Gambar 4.16 terlihat bahwa grafik yang terlihat pada 3 variasi kecepatan *upstream* menunjukkan tren yang hampir sama, dimana nilai koefisien drag mengalami kenaikan dari kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s ke $U_{bl}=1$ m/s dan turun apabila kecepatan *blowing* dinaikkan menjadi $U_{bl}=1.5$ m/s



Gambar 4.16 Perbandingan koefisien drag terhadap fungsi dari kecepatan *blowing* dengan metode eksperimen

Pada kecepatan *blowing* $U_{bl} = 1.5$ m/s, nilai pengurangan drag untuk 3 kecepatan upstream terlihat meningkat sangat drastis dan tidak signifikan dengan hasil metode komputasi. Pada kecepatan upstream $U_o = 11.1$ m/s, pengurangan drag meningkat sebesar 19.57%, pada kecepatan upstream $U_o = 13.9$ m/s, pengurangan drag meningkat sebesar 13.40%, pada kecepatan upstream $U_o = 16.7$ m/s, pengurangan drag meningkat sebesar 11.55%.

Setelah diperoleh data baik dengan metode komputasi maupun dengan metode eksperimen, hal berikutnya yang dilakukan adalah perbandingan antara data metode komputasi dengan metode eksperimen. Gambar 4.17 memperlihatkan persentase perbandingan antara data metode komputasi dengan metode eksperimen dalam parameter koefisien drag, C_D .

Tabel 4.7 Perbandingan koefisien drag metode CFD dengan eksperimen

No.	Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Koefisien drag, Cd											
		CFD				Eksperimen				Perbandingan CFD Eksperimen			
		Kecepatan blowing, U_{bl} (m/s)											
		0	0.5	1	1.5	0	0.5	1	1.5	0	0.5	1	1.5
1	11.1	1.838	1.600	1.604	1.605	1.702	1.514	1.616	1.283	7.406	5.359	-0.755	20.062
2	13.9	1.781	1.533	1.537	1.536	1.522	1.353	1.468	1.264	14.525	11.732	4.489	17.675
3	16.7	1.756	1.495	1.503	1.497	1.370	1.249	1.296	1.138	21.946	16.444	13.758	23.987

Dari Tabel 4.7, diketahui bahwa rata-rata persentase perbandingan CFD dan eksperimen adalah 13.55%. Terdapat beberapa data yang melebihi 20% yaitu kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s dengan kecepatan *blowing* $U_{bl}=1.5$ m/s (20.062%), kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s (21.946%), dan kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s dengan kecepatan *blowing* $U_{bl}=1.5$ m/s (23.987%).

Banyak faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan hasil metode komputasi dengan metode eksperimen. Pada metode komputasi, definisi slot untuk kontrol aktif aliran adalah sebuah lubang kosong seperti *inlet* atau *outlet*, tempat masuk dan keluarnya aliran udara kontrol aktif. Sedangkan pada metode eksperimen, slot untuk kontrol aktif aliran bukan berupa lubang kosong melainkan menggunakan busa (*spons*) untuk mendapatkan aliran kontrol aktif berupa *blowing* yang seragam (*uniform*).

Faktor lain yang mempengaruhi adalah dinding (*wall*) dari terowongan angin sendiri. Aliran udara *upstream* yang mengalir pada wind tunnel sebagian akan bertubrukan dengan dinding (*wall*) terowongan angin dan mempengaruhi aliran yang terjadi pada model *Reversed Ahmed body*.

Adanya batang sebagai komponen dari *load cell* yang terletak di bawah model *Reversed Ahmed body* juga akan mempengaruhi aliran *downstream* pada terowongan angin, selain faktor adanya beberapa celah pada terowongan angin yang memungkinkan udara luar masuk dan mempengaruhi kondisi eksperimen.

Beberapa hal diatas membuktikan perlu adanya perbaikan baik pada metode komputasi dan metode eksperimen untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian mengenai pengaruh kontrol aktif berupa *blowing* yang dilakukan dengan metode komputasi maupun eksperimen memberikan hasil sebagai berikut :

a. Penambahan kontrol aktif aliran berupa *blowing* mempengaruhi medan aliran, intensitas turbulensi dan gaya drag aerodinamika pada model *reversed Ahmed body*.

b. Persentase peningkatan nilai koefisien tekanan terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}=1.5$ m/s untuk 3 kecepatan *upstream* yang berbeda yaitu :

- Kecepatan *upstream* $U_o = 11.1$ /s sebesar 61.11%
- Kecepatan *upstream* $U_o = 11.1$ /s sebesar 53.78%
- Kecepatan *upstream* $U_o = 11.1$ /s sebesar 38.85%

c. Persentase pengurangan intensitas turbulensi yang terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}=1.5$ m/s untuk kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s dan $U_o=167.7$ m/s yaitu 14.5% dan 18.1%. Sedangkan untuk kecepatan *upstream* $U_o=13.9$ m/s, terjadi pada kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s dan $U_{bl}=1.5$ m/s yaitu 12.9 %

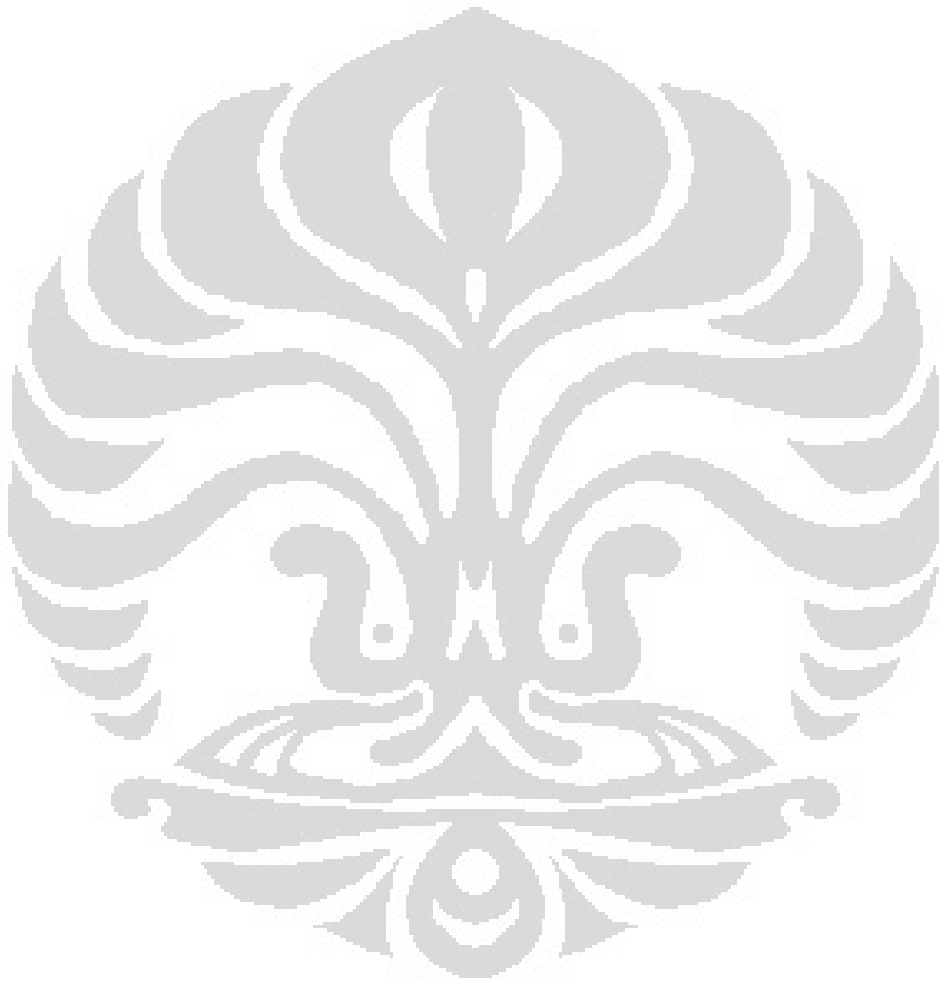
d. Persentase pengurangan drag maksimum pada metode komputasional adalah 14.83% (kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s dan kecepatan *blowing* $U_{bl}=0.5$ m/s) dan pada metode komputasi sebesar 24.61% (kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s dan kecepatan *blowing* $U_{bl}=1.5$ m/s)

e. Rata-rata persentase perbandingan hasil gaya drag aerodinamika metode komputasional dan metode eksperimen adalah 13.55%.

5.2 Saran

Ilmu mekanika fluida dan aerodinamika merupakan cabang ilmu yang sangat kompleks, sehingga penelitian di 2 cabang ilmu ini pun memiliki tingkat kesulitan yang besar. Beberapa data perbandingan gaya drag aerodinamika yang

diperoleh dari metode CFD dengan metode eksperimnen masih memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar. Untuk itu, perlu dilakukan beberapa *upgrade* perbaikan baik pada metode komputasi maupun metode eksperimen agar mendapatkan hasil yang lebih baik.

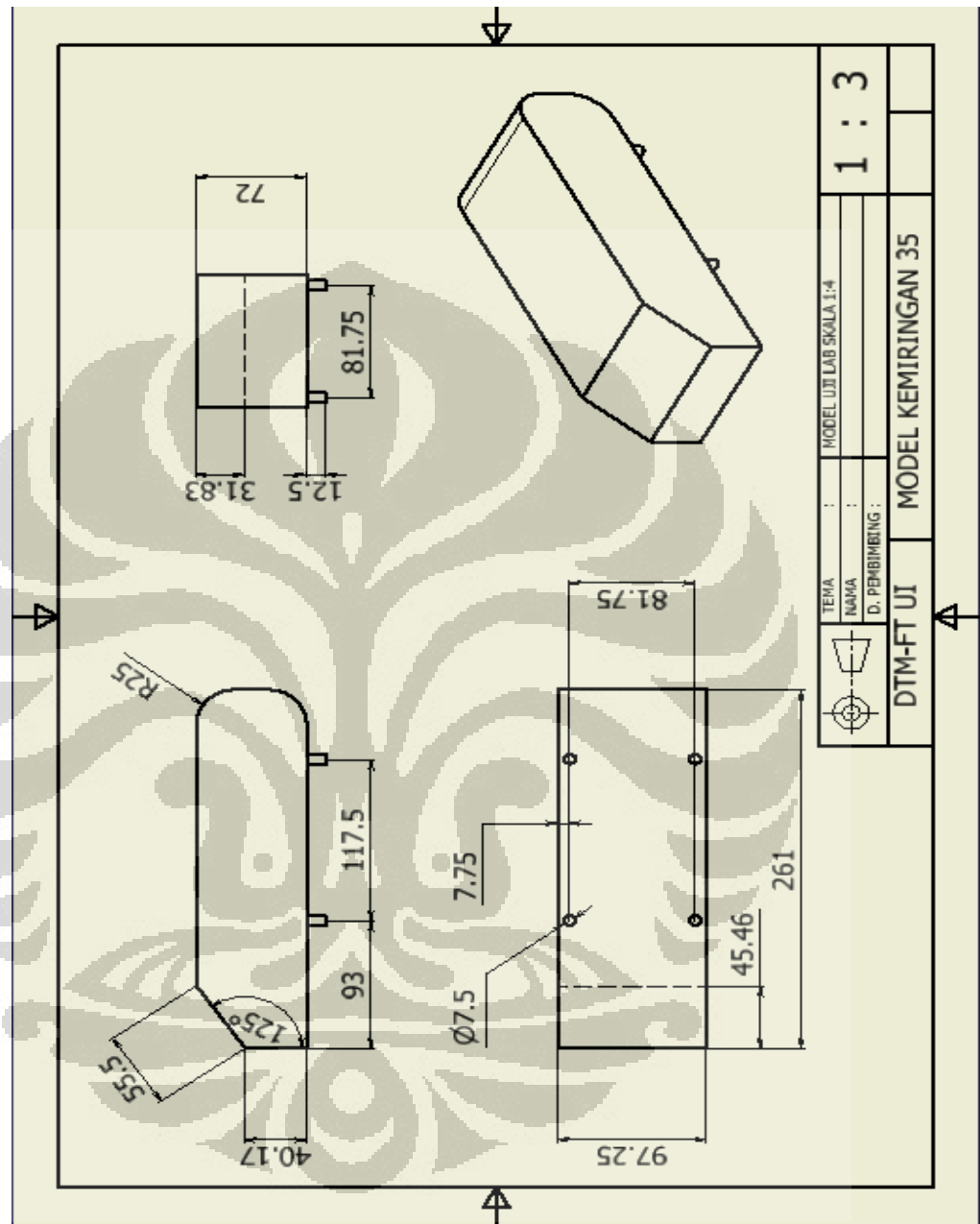


DAFTAR REFERENSI

1. IEA , “World Energy Outlook 2007”, Executive Summary, China and India Insights, International Energy Agency IEA, ISBN: 978-92-64-02730-5, (2007).
2. Gad-El-Hak M. Modern developments in flow control. *Appl Mech Rev* 1996;9:365–79, 2006.
3. Munson, B. (2002). *Mekanika Fluida* (Dr.Ir. Harinaldi & Ir. Budiarmo, M.Eng, Penerjemah). Jakarta:Erlangga.
4. Anderson, J.D. (2001). *Fundamental of Aerodynamics* (3rd ed.).Singapore:McGraw-Hill.
5. Tardu S. Active control of the turbulent drag by a localized periodical *blowing* dissymmetric in time. *Exp Fluids*, 47, 19-26.
6. Roumeas M, Gillieron P, Kourta A. Drag reduction by flow separation control on a car after body. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2009; 60:1222-1240.
7. Fares E. Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach. *Computers & Fluids* 35 (2006) 940-950.
8. Bruneau C H. Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body. *Computers & Fluids* 39 (2010) 1875-1892.
9. Roumeas M, Gillieron P, Kourta A. Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry. *Computers & Fluids* 38 (2009) 60-70.
10. Kourta A, Gillieron P. Impact of the automotive aerodynamic control on the economics issues. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 2, No. 2, pp. 69-75, 2009.
11. Uruba V, Hladik O. On the Ahmed Body Wake. Colloquium FLUID DYNAMICS 2009 Institut of Thermomechanics AS CR, v.v.i.v Prague, October 21-23, 2009.
12. Minguez M, Pasquetti R, Serre E. High order large-eddy simulation of flow over the “Ahmed body” car model. *PHYSICS OF FLUIDS* 20, 095101 (2008).

13. Franck G , D'Ellia J 2004. CFD modeling of the flow around the Ahmed Body vehicle model. In proceedings of 2nd conference on advances and applications of GiD. Barcelona, Spain, 4p.
14. Ivanic T, Gillieronh P. Reduction of the aerodynamics drag due to cooling system; an analytical and experimental approach, SAE paper 2005-01-1017;2004.
15. Lienhart H, Stoots C, Becker S. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model (Ahmed Model). Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) Universität Erlangen-Nürnberg Cauerstr. 4, 91058 Erlangen, Germany.



Lampiran 1. Model *reversed Ahmed body*

Lampiran 2. Tabel Hasil CFD tekanan statik kecepatan *upstream* $U_o = 11.1$ m/s

a. $U_{bl}/U_o = 0$

No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/w = -1/2		z/w = -5/12		z/w = -1/3		z/w = -1/4		z/w = -1/6		z/w = -1/12		z/w = 0		z/w = 1/12		z/w = 1/6		z/w = 1/4		z/w = 1/3		z/w = 5/12		z/w = 1/2	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1.000	-97.519	-0.456	-89.471	-0.408	-91.483	-0.420	-93.495	-0.432	-109.591	-0.527	-111.603	-0.538	-109.591	-0.527	-103.555	-0.491	-101.543	-0.479	-89.471	-0.408	-79.412	-0.349	-79.412	-0.349	-83.435	-0.373
2	0.933	-95.507	-0.444	-93.495	-0.432	-91.483	-0.420	-107.579	-0.515	-97.519	-0.456	-99.531	-0.467	-93.495	-0.432	-91.483	-0.420	-83.435	-0.373	-97.519	-0.456	-81.424	-0.361	-87.459	-0.396	-77.400	-0.337
3	0.867	-83.435	-0.373	-85.447	-0.385	-77.400	-0.337	-83.435	-0.373	-75.388	-0.326	-73.376	-0.314	-69.352	-0.290	-59.292	-0.231	-59.292	-0.231	-71.364	-0.302	-61.304	-0.243	-69.352	-0.290	-67.340	-0.278
4	0.800	-65.328	-0.266	-69.352	-0.290	-59.292	-0.231	-57.280	-0.219	-53.256	-0.195	-47.220	-0.160	-41.184	-0.125	-33.137	-0.077	-39.172	-0.113	-45.208	-0.148	-45.208	-0.148	-47.220	-0.160	-49.232	-0.172
5	0.733	-45.208	-0.148	-45.208	-0.148	-41.184	-0.125	-37.161	-0.101	-37.161	-0.101	-29.113	-0.054	-25.089	-0.030	-19.053	0.006	-21.065	-0.006	-25.089	-0.030	-27.101	-0.042	-29.113	-0.054	-25.089	-0.030
6	0.667	-29.113	-0.054	-29.113	-0.054	-27.101	-0.042	-23.077	-0.018	-19.053	0.006	-15.029	0.029	-13.017	0.041	-13.017	0.041	-13.017	0.041	-15.029	0.029	-17.041	0.017	-17.041	0.017	-17.041	0.017
7	0.600	-25.089	-0.030	-23.077	-0.018	-23.077	-0.018	-17.041	0.017	-13.017	0.041	-11.005	0.053	-8.993	0.065	-11.005	0.053	-11.005	0.053	-8.993	0.065	-11.005	0.053	-13.017	0.041	-15.029	0.029
8	0.533	-21.065	-0.006	-19.053	0.006	-15.029	0.029	-11.005	0.053	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-11.005	0.053	-11.005	0.053	-11.005	0.053
9	0.467	-15.029	0.029	-15.029	0.029	-13.017	0.041	-11.005	0.053	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-6.981	0.077	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-11.005	0.053
10	0.400	-13.017	0.041	-11.005	0.053	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-6.981	0.077	-6.981	0.077	-6.981	0.077	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-11.005	0.053	-11.005	0.053
11	0.333	-13.017	0.041	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-6.981	0.077	-6.981	0.077	-6.981	0.077	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-11.005	0.053	-11.005	0.053	-13.017	0.041
12	0.267	-11.005	0.053	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-11.005	0.053	-13.017	0.041	-13.017	0.041	-13.017	0.041	-15.029	0.029	-15.029	0.029
13	0.200	-13.017	0.041	-8.993	0.065	-8.993	0.065	-11.005	0.053	-13.017	0.041	-11.005	0.053	-13.017	0.041	-17.041	0.017	-19.053	0.006	-21.065	-0.006	-17.041	0.017	-19.053	0.006	-19.053	0.006
14	0.133	-17.041	0.017	-11.005	0.053	-13.017	0.041	-13.017	0.041	-21.065	-0.006	-19.053	0.006	-23.077	-0.018	-25.089	-0.030	-25.089	-0.030	-27.101	-0.042	-21.065	-0.006	-23.077	-0.018	-23.077	-0.018
15	0.067	-19.053	0.006	-13.017	0.041	-15.029	0.029	-19.053	0.006	-23.077	-0.018	-27.101	-0.042	-29.113	-0.054	-29.113	-0.054	-29.113	-0.054	-29.113	-0.054	-27.101	-0.042	-25.089	-0.030	-31.125	-0.065

b. $U_{bl}/U_o = 0.05$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1.00					-77.291	-0.337	-51.550	-0.185	-63.431	-0.255	-69.371	-0.290	-73.331	-0.313				
2	0.92					-69.371	-0.290	-73.331	-0.313	-59.470	-0.232	-57.490	-0.220	-63.431	-0.255				
3	0.83					-35.709	-0.092	-57.490	-0.220	-37.689	-0.104	-37.689	-0.104	-33.729	-0.081				
4	0.75					-15.908	0.024	-27.789	-0.046	-19.868	0.001	-21.848	-0.011	-39.371	-0.114				
5	0.67	-11.948	0.047	-9.968	0.059	-11.948	0.047	-13.928	0.036	-15.908	0.024	-15.908	0.024	-13.928	0.036	-11.948	0.047	-11.948	0.047
6	0.58	-13.928	0.036	-9.968	0.059	-9.968	0.059	-9.968	0.059	-11.948	0.047	-11.948	0.047	-13.928	0.036	-11.948	0.047	-11.948	0.047
7	0.50	-13.928	0.036	-11.948	0.047	-9.968	0.059	-9.968	0.059	-9.968	0.059	-11.948	0.047	-11.948	0.047	-11.948	0.047	-11.948	0.047
8	0.42	-13.928	0.036	-11.948	0.047	-11.948	0.047	-9.968	0.059	-9.968	0.059	-9.968	0.059	-11.948	0.047	-11.948	0.047	-13.928	0.036
9	0.33	-27.789	-0.046	-19.868	0.001	-15.908	0.024	-11.948	0.047	-11.948	0.047	-9.968	0.059	-11.948	0.047	-13.928	0.036	-15.908	0.024
10	0.25	-33.729	-0.081	-29.769	-0.057	-25.809	-0.034	-19.868	0.001	-17.888	0.012	-19.868	0.001	-21.848	-0.011	-27.789	-0.046	-27.789	-0.046
11	0.17	-43.630	-0.139	-35.709	-0.092	-37.689	-0.104	-29.769	-0.057	-35.709	-0.092	-33.729	-0.081	-31.749	-0.069	-39.669	-0.116	-37.689	-0.104
12	0.08	-47.590	-0.162	-37.689	-0.104	-39.669	-0.116	-39.669	-0.116	-39.669	-0.116	-41.649	-0.127	-39.669	-0.116	-37.689	-0.104	-41.649	-0.127

c. $U_{bl}/U_o = 0.09$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1.00					-71.224	-0.301	-49.441	-0.173	-61.323	-0.243	-67.264	-0.278	-71.224	-0.301				
2	0.92					-63.303	-0.255	-69.244	-0.289	-57.362	-0.220	-55.382	-0.208	-61.323	-0.243				
3	0.83					-31.618	-0.068	-53.401	-0.196	-35.579	-0.092	-35.579	-0.092	-31.618	-0.068				
4	0.75					-13.795	0.036	-25.677	-0.033	-19.736	0.002	-21.716	-0.010	-15.775	0.025				
5	0.67	-11.815	0.048	-9.834	0.060	-11.815	0.048	-13.795	0.036	-15.775	0.025	-15.775	0.025	-13.795	0.036	-11.815	0.048	-11.815	0.048
6	0.58	-13.795	0.036	-11.815	0.048	-9.834	0.060	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-13.795	0.036	-13.795	0.036	-11.815	0.048	-11.815	0.048
7	0.50	-13.795	0.036	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-11.815	0.048
8	0.42	-13.795	0.036	-13.795	0.036	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-9.834	0.060	-9.834	0.060	-11.815	0.048	-13.795	0.036	-13.795	0.036
9	0.33	-27.657	-0.045	-19.736	0.002	-15.775	0.025	-13.795	0.036	-11.815	0.048	-11.815	0.048	-13.795	0.036	-15.775	0.025	-17.756	0.013
10	0.25	-35.579	-0.092	-29.638	-0.057	-27.657	-0.045	-21.716	-0.010	-19.736	0.002	-21.716	-0.010	-23.697	-0.022	-27.657	-0.045	-29.638	-0.057
11	0.17	-45.480	-0.150	-37.559	-0.103	-39.539	-0.115	-29.638	-0.057	-37.559	-0.103	-33.598	-0.080	-33.598	-0.080	-39.539	-0.115	-39.539	-0.115
12	0.08	-49.441	-0.173	-39.539	-0.115	-41.520	-0.126	-41.520	-0.126	-41.520	-0.126	-43.500	-0.138	-41.520	-0.126	-39.539	-0.115	-43.500	-0.138

d. $U_{bl}/U_o = 0.14$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1.00					-55.096	-0.206	-41.230	-0.125	-51.134	-0.183	-53.115	-0.195	-53.115	-0.195				
2	0.92					-47.172	-0.160	-55.096	-0.206	-49.153	-0.171	-45.191	-0.148	-45.191	-0.148				
3	0.83					-23.402	-0.020	-43.211	-0.136	-31.325	-0.067	-33.306	-0.078	-27.364	-0.043				
4	0.75					-15.479	0.027	-23.402	-0.020	-19.440	0.003	-23.402	-0.020	-17.459	0.015				
5	0.67	-15.479	0.027	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-15.479	0.027	-17.459	0.015	-19.440	0.003	-17.459	0.015	-13.498	0.038	-13.498	0.038
6	0.58	-17.459	0.015	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-15.479	0.027	15.479	0.209	-13.498	0.038	-13.498	0.038
7	0.50	-17.459	0.015	-15.479	0.027	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-15.479	0.027
8	0.42	-17.459	0.015	-15.479	0.027	-15.479	0.027	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-13.498	0.038	-15.479	0.027	-17.459	0.015
9	0.33	-31.325	-0.067	-23.402	-0.020	-19.440	0.003	-17.459	0.015	-15.479	0.027	-27.364	-0.043	-17.459	0.015	-19.440	0.003	-19.440	0.003
10	0.25	-39.249	-0.113	-35.287	-0.090	-31.325	-0.067	-27.364	-0.043	-23.402	-0.020	-41.230	-0.125	-27.364	-0.043	-31.325	-0.067	-33.306	-0.078
11	0.17	-51.134	-0.183	-43.211	-0.136	-45.191	-0.148	-35.287	-0.090	-43.211	-0.136	-49.153	-0.171	-39.249	-0.113	-45.191	-0.148	-45.191	-0.148
12	0.08	-55.096	-0.206	-43.211	-0.136	-45.191	-0.148	-47.172	-0.160	-47.172	-0.160	-49.153	-0.171	-47.172	-0.160	-43.211	-0.136	-41.230	-0.125

Lampiran 3. Tabel Hasil CFD tekanan statik kecepatan *upstream* $U_o = 13.9$ m/s

c. $U_{bl}/U_o = 0.07$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1.00					-117.678	-0.574	-80.802	-0.357	-99.240	-0.466	-105.386	-0.502	-114.605	-0.556				
2	0.92					-102.313	-0.484	-111.532	-0.538	-90.021	-0.412	-86.948	-0.393	-99.240	-0.466				
3	0.83					-53.145	-0.195	-86.948	-0.393	-56.218	-0.213	-59.291	-0.231	-53.145	-0.195				
4	0.75					-25.488	-0.032	-43.926	-0.141	-31.634	-0.068	-34.707	-0.086	-25.488	-0.032				
5	0.67	-19.342	0.004	-16.269	0.022	-19.342	0.004	-22.415	-0.014	-25.488	-0.032	-25.488	-0.032	-22.415	-0.014	-19.342	0.004	-19.342	0.004
6	0.58	-22.415	-0.014	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-22.415	-0.014	-22.415	-0.014	-22.415	-0.014	-19.342	0.004
7	0.50	-22.415	-0.014	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-19.342	0.004
8	0.42	-22.415	-0.014	-22.415	-0.014	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-16.269	0.022	-16.269	0.022	-19.342	0.004	-22.415	-0.014	-22.415	-0.014
9	0.33	-43.926	-0.141	-31.634	-0.068	-25.488	-0.032	-22.415	-0.014	-19.342	0.004	-19.342	0.004	-22.415	-0.014	-25.488	-0.032	-28.561	-0.050
10	0.25	-53.145	-0.195	-46.999	-0.159	-43.926	-0.141	-34.707	-0.086	-31.634	-0.068	-34.707	-0.086	-37.780	-0.105	-43.926	-0.141	-43.926	-0.141
11	0.17	-71.583	-0.303	-59.291	-0.231	-62.364	-0.249	-50.072	-0.177	-59.291	-0.231	-56.218	-0.213	-53.145	-0.195	-62.364	-0.249	-62.364	-0.249
12	0.08	-77.729	-0.339	-62.364	-0.249	-65.437	-0.267	-65.437	-0.267	-65.437	-0.267	-68.510	-0.285	-65.437	-0.267	-62.364	-0.249	-68.510	-0.285

d. $U_{bl}/U_o = 0.011$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1.00					-92.688	-0.427	-68.099	-0.283	-83.467	-0.373	-86.541	-0.391	-89.615	-0.409				
2	0.92					-77.320	-0.337	-89.615	-0.409	-77.320	-0.337	-74.246	-0.319	-77.320	-0.337				
3	0.83					-37.362	-0.102	-71.173	-0.301	-49.657	-0.174	-52.731	-0.192	-43.510	-0.138				
4	0.75					-25.068	-0.030	-37.362	-0.102	-31.215	-0.066	-37.362	-0.102	-28.141	-0.048				
5	0.67	-25.068	-0.030	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-25.068	-0.030	-28.141	-0.048	-31.215	-0.066	-28.141	-0.048	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012
6	0.58	-25.068	-0.030	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-25.068	-0.030	-25.068	-0.030	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012
7	0.50	-28.141	-0.048	-25.068	-0.030	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012
8	0.42	-28.141	-0.048	-25.068	-0.030	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-21.994	-0.012	-25.068	-0.030	-28.141	-0.048
9	0.33	-49.657	-0.174	-37.362	-0.102	-31.215	-0.066	-28.141	-0.048	-25.068	-0.030	-25.068	-0.030	-28.141	-0.048	-31.215	-0.066	-31.215	-0.066
10	0.25	-61.952	-0.247	-52.731	-0.192	-49.657	-0.174	-40.436	-0.120	-37.362	-0.102	-43.510	-0.138	-43.510	-0.138	-49.657	-0.174	-49.657	-0.174
11	0.17	-80.394	-0.355	-65.025	-0.265	-71.173	-0.301	-55.804	-0.210	-68.099	-0.283	-65.025	-0.265	-58.878	-0.229	-71.173	-0.301	-68.099	-0.283
12	0.08	-86.541	-0.391	-68.099	-0.283	-71.173	-0.301	-74.246	-0.319	-74.246	-0.319	-77.320	-0.337	-74.246	-0.319	-68.099	-0.283	-74.246	-0.319

c. $U_{bl}/U_o = 0.09$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT
1	1.00					0.979	97.860	0.877	87.681	0.877	87.681	0.979	97.860	1.208	120.762				
2	0.92					1.208	120.762	0.928	92.771	0.902	90.226	0.928	92.771	1.106	110.584				
3	0.83					1.182	118.218	0.928	92.771	0.902	90.226	0.902	90.226	1.360	136.031				
4	0.75					0.928	92.771	0.953	95.315	0.902	90.226	0.902	90.226	1.080	108.039				
5	0.67	0.826	82.592	0.648	64.779	0.597	59.690	0.851	85.137	0.826	82.592	0.775	77.503	0.571	57.145	0.470	46.966	0.571	57.145
6	0.58	0.648	64.779	0.571	57.145	0.622	62.234	0.724	72.413	0.750	74.958	0.724	72.413	0.622	62.234	0.546	54.600	0.571	57.145
7	0.50	0.571	57.145	0.521	52.056	0.546	54.600	0.648	64.779	0.673	67.324	0.597	59.690	0.597	59.690	0.597	59.690	0.546	54.600
8	0.42	0.622	62.234	0.571	57.145	0.571	57.145	0.724	72.413	0.699	69.868	0.724	72.413	0.699	69.868	0.597	59.690	0.597	59.690
9	0.33	0.902	90.226	0.800	80.047	0.648	64.779	0.571	57.145	0.622	62.234	0.699	69.868	0.673	67.324	0.622	62.234	0.648	64.779
10	0.25	0.953	95.315	0.800	80.047	0.648	64.779	0.597	59.690	0.571	57.145	0.571	57.145	0.571	57.145	0.597	59.690	0.699	69.868
11	0.17	0.775	77.503	0.673	67.324	0.597	59.690	0.571	57.145	0.546	54.600	0.571	57.145	0.571	57.145	0.546	54.600	0.648	64.779
12	0.08	0.724	72.413	0.622	62.234	0.546	54.600	0.546	54.600	0.546	54.600	0.546	54.600	0.546	54.600	0.571	57.145	0.724	72.413

d. $U_{bl}/U_o = 0.14$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT
1	1.00					0.928	92.797	0.852	85.163	0.852	85.163	0.953	95.342	1.182	118.244				
2	0.92					1.157	115.700	0.903	90.252	0.877	87.707	0.903	90.252	1.081	108.065				
3	0.83					1.081	108.065	0.928	92.797	0.903	90.252	0.877	87.707	1.157	115.700				
4	0.75					0.775	77.529	1.030	102.976	0.903	90.252	0.903	90.252	0.750	74.984				
5	0.67	0.928	92.797	0.648	64.805	0.648	64.805	0.775	77.529	0.826	82.618	0.826	82.618	0.648	64.805	0.546	54.626	0.597	59.715
6	0.58	0.699	69.894	0.546	54.626	0.623	62.260	0.775	77.529	0.801	80.073	0.724	72.439	0.673	67.350	0.648	64.805	0.673	67.350
7	0.50	0.597	59.715	0.495	49.536	0.521	52.081	0.623	62.260	0.750	74.984	0.699	69.894	0.673	67.350	0.648	64.805	0.597	59.715
8	0.42	0.673	67.350	0.597	59.715	0.546	54.626	0.724	72.439	0.801	80.073	0.750	74.984	0.673	67.350	0.623	62.260	0.648	64.805
9	0.33	0.979	97.886	0.852	85.163	0.673	67.350	0.597	59.715	0.648	64.805	0.648	64.805	0.597	59.715	0.623	62.260	0.699	69.894
10	0.25	1.030	102.976	0.852	85.163	0.673	67.350	0.623	62.260	0.572	57.171	0.597	59.715	0.597	59.715	0.623	62.260	0.724	72.439
11	0.17	0.826	82.618	0.699	69.894	0.597	59.715	0.597	59.715	0.572	57.171	0.572	57.171	0.597	59.715	0.572	57.171	0.673	67.350
12	0.08	0.750	74.984	0.648	64.805	0.572	57.171	0.572	57.171	0.546	54.626	0.572	57.171	0.572	57.171	0.572	57.171	0.750	74.984

c. $U_{bl}/U_o = 0.07$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT
1	1.00					1.175	117.503	1.025	102.496	1.055	105.497	1.175	117.503	1.415	141.514				
2	0.92					1.415	141.514	1.115	111.500	1.085	108.499	1.115	111.500	1.325	132.510				
3	0.83					1.355	135.511	1.115	111.500	1.085	108.499	1.085	108.499	1.475	147.517				
4	0.75					1.115	111.500	1.145	114.502	1.085	108.499	1.085	108.499	1.265	126.507				
5	0.67	0.965	96.493	0.845	84.488	0.755	75.484	1.025	102.496	0.995	99.495	0.935	93.492	0.695	69.481	0.545	54.474	0.665	66.479
6	0.58	0.785	78.485	0.725	72.482	0.785	78.485	0.875	87.489	0.905	90.490	0.875	87.489	0.755	75.484	0.665	66.479	0.695	69.481
7	0.50	0.695	69.481	0.635	63.478	0.695	69.481	0.815	81.486	0.815	81.486	0.695	69.481	0.725	72.482	0.725	72.482	0.665	66.479
8	0.42	0.755	75.484	0.695	69.481	0.725	72.482	0.875	87.489	0.815	81.486	0.875	87.489	0.875	87.489	0.755	75.484	0.725	72.482
9	0.33	1.085	108.499	0.935	93.492	0.785	78.485	0.695	69.481	0.755	75.484	0.875	87.489	0.845	84.488	0.785	78.485	0.785	78.485
10	0.25	1.115	111.500	0.935	93.492	0.785	78.485	0.725	72.482	0.695	69.481	0.725	72.482	0.695	69.481	0.725	72.482	0.845	84.488
11	0.17	0.935	93.492	0.815	81.486	0.725	72.482	0.695	69.481	0.665	66.479	0.695	69.481	0.695	69.481	0.695	69.481	0.785	78.485
12	0.08	0.875	87.489	0.755	75.484	0.665	66.479	0.665	66.479	0.665	66.479	0.665	66.479	0.665	66.479	0.695	69.481	0.875	87.489

d. $U_{bl}/U_o = 0.11$

No	Lokasi Pressure Tap (y/h)	z/w = -1/2		z/w = -3/8		z/w = -1/4		z/w = -1/8		z/w = 0		z/w = 1/8		z/w = 1/4		z/w = 3/8		z/w = 1/2	
		IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT	IT (%)	IT
1	1.00					1.116	111.576	1.026	102.574	1.026	102.574	1.146	114.577	1.386	138.583				
2	0.92					1.356	135.582	1.086	108.575	1.056	105.574	1.086	108.575	1.296	129.581				
3	0.83					1.596	159.589	1.116	111.576	1.086	108.575	1.056	105.574	1.536	153.587				
4	0.75					1.086	108.575	1.236	123.579	1.086	108.575	1.086	108.575	0.966	96.572				
5	0.67	1.056	105.574	0.786	78.567	0.696	69.565	1.056	105.574	0.996	99.573	0.966	96.572	0.756	75.567	0.636	63.563	0.696	69.565
6	0.58	0.846	84.569	0.666	66.564	0.756	75.567	0.936	93.571	0.996	99.573	0.876	87.570	0.816	81.568	0.756	75.567	0.816	81.568
7	0.50	0.726	72.566	0.606	60.563	0.636	63.563	0.756	75.567	0.906	90.570	0.846	84.569	0.816	81.568	0.786	78.567	0.726	72.566
8	0.42	0.786	78.567	0.726	72.566	0.666	66.564	0.906	90.570	0.996	99.573	0.936	93.571	0.846	84.569	0.756	75.567	0.786	78.567
9	0.33	1.146	114.577	1.026	102.574	0.816	81.568	0.726	72.566	0.816	81.568	0.816	81.568	0.756	75.567	0.756	75.567	0.846	84.569
10	0.25	1.206	120.578	0.996	99.573	0.816	81.568	0.756	75.567	0.726	72.566	0.726	72.566	0.726	72.566	0.756	75.567	0.876	87.570
11	0.17	0.966	96.572	0.846	84.569	0.726	72.566	0.726	72.566	0.696	69.565	0.696	69.565	0.726	72.566	0.696	69.565	0.816	81.568
12	0.08	0.906	90.570	0.786	78.567	0.696	69.565	0.696	69.565	0.666	66.564	0.696	69.565	0.696	69.565	0.696	69.565	0.906	90.570

Lampiran 8. Tabel hasil eksperimen total gaya drag kecepatan *upstream* $U_o=11.1$ m/s

Detik (s)	Total Gaya Drag (N)			
	Ubl/Uo=0	Ubl/Uo=0.05	Ubl/Uo=0.09	Ubl/Uo=0.14
2	0.578	0.343	0.470	0.490
4	0.578	0.441	0.510	0.353
6	0.588	0.451	0.490	0.421
8	0.568	0.490	0.480	0.392
10	0.510	0.470	0.412	0.451
12	0.549	0.510	0.500	0.333
14	0.617	0.529	0.519	0.363
16	0.470	0.441	0.510	0.382
18	0.490	0.510	0.421	0.372
20	0.519	0.500	0.451	0.382
22	0.549	0.451	0.431	0.372
24	0.549	0.441	0.451	0.392
26	0.421	0.588	0.480	0.363
28	0.490	0.578	0.480	0.363
30	0.470	0.549	0.431	0.363
32	0.470	0.588	0.451	0.412
34	0.392	0.549	0.451	0.363
36	0.402	0.549	0.451	0.382
38	0.529	0.490	0.421	0.363
40	0.510	0.490	0.470	0.382
42	0.519	0.392	0.451	0.372
44	0.510	0.451	0.519	0.323
46	0.588	0.431	0.490	0.323
48	0.519	0.510	0.470	0.392
50	0.519	0.441	0.608	0.363
52	0.500	0.461	0.490	0.431
54	0.480	0.353	0.549	0.363
56	0.441	0.372	0.431	0.382
58	0.441	0.353	0.461	0.363
60	0.568	0.412	0.510	0.353
62	0.431	0.343	0.431	0.382
64	0.539	0.421	0.490	0.372
66	0.549	0.598	0.451	0.431
68	0.568	0.451	0.559	0.372
70	0.451	0.480	0.431	0.363
72	0.470	0.451	0.470	0.363
74	0.539	0.412	0.470	0.363
76	0.490	0.461	0.510	0.372
78	0.490	0.402	0.559	0.372
80	0.578	0.343	0.490	0.363
82	0.421	0.372	0.412	0.412
84	0.421	0.402	0.470	0.392
86	0.490	0.245	0.510	0.363
88	0.470	0.402	0.490	0.363
90	0.431	0.412	0.451	0.363
92	0.421	0.402	0.441	0.392
94	0.412	0.353	0.470	0.382
96	0.598	0.392	0.490	0.392
98	0.549	0.451	0.510	0.392
100	0.431	0.392	0.461	0.353

Lampiran 9. Tabel hasil eksperimen total gaya drag kecepatan *upstream* = 13.9 m/s

Detik(s)	Total Gaya Drag (N)			
	Ubl/Uo=0	Ubl/Uo=0.04	Ubl/Uo=0.07	Ubl/Uo=0.11
2	0.804	0.588	0.617	0.559
4	0.774	0.539	0.686	0.549
6	0.696	0.539	0.764	0.627
8	0.804	0.510	0.696	0.559
10	0.735	0.617	0.617	0.617
12	0.657	0.637	0.598	0.578
14	0.647	0.676	0.617	0.588
16	0.657	0.578	0.647	0.598
18	0.519	0.617	0.647	0.617
20	0.774	0.578	0.666	0.578
22	0.657	0.696	0.696	0.568
24	0.676	0.549	0.666	0.735
26	0.745	0.539	0.637	0.715
28	0.676	0.559	0.725	0.735
30	0.745	0.676	0.588	0.578
32	0.696	0.647	0.598	0.598
34	0.706	0.715	0.627	0.657
36	0.725	0.617	0.657	0.510
38	0.657	0.578	0.804	0.568
40	0.657	0.568	0.843	0.637
42	0.666	0.568	0.774	0.657
44	0.706	0.568	0.647	0.431
46	0.755	0.617	0.706	0.588
48	0.627	0.578	0.725	0.559
50	0.696	0.657	0.657	0.627
52	0.608	0.637	0.666	0.549
54	0.657	0.676	0.774	0.549
56	0.715	0.696	0.764	0.549
58	0.657	0.657	0.725	0.598
60	0.735	0.657	0.725	0.637
62	0.666	0.706	0.725	0.549
64	0.715	0.666	0.735	0.510
66	0.686	0.657	0.588	0.549
68	0.804	0.627	0.617	0.608
70	0.725	0.666	0.657	0.578
72	0.735	0.627	0.657	0.568
74	0.764	0.549	0.676	0.510
76	0.735	0.568	0.617	0.539
78	0.706	0.657	0.706	0.568
80	0.696	0.617	0.598	0.598
82	0.657	0.647	0.637	0.549
84	0.696	0.676	0.784	0.539
86	0.755	0.617	0.647	0.549
88	0.666	0.696	0.627	0.490
90	0.715	0.637	0.666	0.539
92	0.725	0.686	0.637	0.568
94	0.696	0.578	0.735	0.617
96	0.706	0.676	0.735	0.598
98	0.764	0.696	0.657	0.657
100	0.755	0.696	0.676	0.627

Lampiran 10. Tabel hasil eksperimen total gaya drag kecepatan *upstream* $U_o=16$ m/s

Detik (s)	Total Gaya Drag (N)			
	Ubl/Uo=0	Ubl/Uo=0.03	Ubl/Uo=0.06	Ubl/Uo=0.09
2	0.882	0.804	0.745	0.784
4	0.931	0.764	0.941	0.755
6	1.029	0.833	0.902	0.686
8	0.980	0.833	0.804	0.764
10	0.823	0.774	0.804	0.725
12	0.882	0.833	0.872	0.784
14	0.990	0.833	0.882	0.862
16	0.990	0.833	0.804	0.794
18	0.843	0.706	0.804	0.794
20	0.853	0.853	0.804	0.696
22	0.833	0.804	0.823	0.706
24	0.843	0.794	0.882	0.706
26	0.833	0.813	0.902	0.784
28	0.951	0.921	0.882	0.764
30	0.882	0.882	0.941	0.764
32	1.009	0.862	0.892	0.745
34	0.911	0.882	0.911	0.794
36	0.882	0.882	0.882	0.686
38	0.833	0.911	0.911	0.804
40	0.921	0.882	0.960	0.843
42	0.921	0.911	0.892	0.804
44	0.804	0.882	0.931	0.755
46	0.941	0.882	0.843	0.755
48	0.872	0.784	0.882	0.804
50	0.892	0.882	0.804	0.813
52	0.911	0.862	0.892	0.794
54	0.853	0.804	0.892	0.764
56	0.872	0.921	0.804	0.823
58	0.990	0.862	0.882	0.745
60	0.911	0.853	0.902	0.745
62	0.911	0.764	0.833	0.686
64	0.882	0.784	0.843	0.774
66	0.960	0.823	0.843	0.725
68	0.941	0.823	0.862	0.735
70	0.941	0.764	0.853	0.755
72	0.902	0.794	0.882	0.745
74	0.931	0.843	0.921	0.755
76	0.921	0.823	0.902	0.804
78	0.892	0.794	0.813	0.823
80	0.921	0.843	0.872	0.745
82	1.000	0.784	0.882	0.745
84	1.000	0.882	0.823	0.764
86	0.980	0.853	0.853	0.735
88	1.029	0.872	0.862	0.735
90	0.902	0.794	0.843	0.735
92	0.823	0.774	0.843	0.735
94	0.941	0.813	0.902	0.794
96	0.921	0.853	0.882	0.637
98	0.882	0.853	0.843	0.745
100	0.980	0.813	0.833	0.764