



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

**I GST MD FREDY LAY TERYANTO
0706163520**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

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

**I GST MD FREDY LAY TERYANTO
0706163520**

**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 : I Gst Md Fredy Lay Teryanto

NPM : 0706163520

Tanda Tangan : 

Tanggal : 28 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : I Gst Md Fredy Lay Teryanto
NPM : 0706163520
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Analisis pengaruh kontrol aktif aliran berupa
suction 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 : Dr. Ir. Warjito, M.Eng

()

Penguji 3 : Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Sc, M.Eng

()

Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)
Tanggal : 28 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Sang Hyang Widhi karena hanya dengan *sueca*-Nya lah penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. 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 serta bantuan lain baik dorongan moril maupun materiil.
2. I Gst Nym Suteja (Aji), Ni Made Merilani (Mama), dan Ni Gst Ayu Pt Dewanti B. (Mbotu) yang selalu memberikan doa dan semangat sehingga memacu penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya.
3. Ibu Rini Tampi, Bli Gusde, Pak Richard, Mba Linda, Mba Yunita, Mba Ratri dan segenap staff Putera Sampoerna Foundation atas segala dukungan baik moril dan materiil sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi tepat waktu.
4. Rustan Tarakka, S.T., M.T. dan Sabar Simanungkalit, S.T. selaku mahasiswa S3 dan S2 yang tergabung dalam penelitian ini yang banyak membantu dan membimbing penulis dalam penelitian ini
5. Andre Grivanzy, Ahmad Tri Ageng, Kenfery dan Edward selaku teman kelompok skripsi atas kerjasamanya dalam melakukan penelitian ini.
6. Kurniawan, Eka Kusuma Artha, Putu Wira Anggriyasa, dan Eka Yulia sebagai sahabat yang selalu memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi tepat waktu.
7. Karyawan Departemen Teknik Mesin yang telah membantu penulis selama penelitian.

8. Semua Mahasiswa Teknik Mesin 2007 yang selalu memberi semangat serta masukan kepada penulis dan juga sedang berjuang dengan tugas akhirnya.
9. Pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

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 : I Gst Md Fredy Lay Teryanto
NPM : 0706163520
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 :

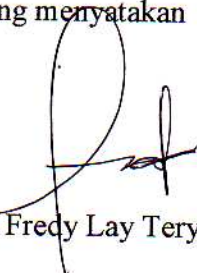
**ANALISIS PENGARUH KONTROL AKTIF ALIRAN
BERUPA *SUCTION* TERHADAP *DRAG* AERODINAMIKA
MODEL *REVERSED AHMED BODY***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, 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


(I Gst Md Fredy Lay Teryanto)

ABSTRAK

Nama : I Gst Md Fredy Lay Teryanto
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisis pengaruh kontrol aktif aliran berupa *suction* terhadap *drag* aerodinamika model *reversed Ahmed Body*

Kontrol aktif aliran merupakan salah satu metode yang efektif dalam mengurangi *drag* aerodinamika pada kendaraan untuk memenuhi tuntutan isu mengenai krisis sumber energi. Secara mendasar kontrol aktif aliran bertujuan untuk mengubah lapisan batas yang mengalami separasi. Untuk mencapai hal itu kontrol aktif aliran menggunakan sejumlah energi untuk memberikan eksitasi pada medan aliran berupa *blowing*, *suction* dan *synthetic jet*. Penelitian ini merupakan kajian pengurangan drag pada model kendaraan *family van* dengan menggunakan *suction* dimana *reversed Ahmed body* digunakan sebagai model untuk kendaraan ini. Penelitian dilakukan dengan menggunakan 2 pendekatan, yaitu komputasi dan eksperimental dengan variasi data kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s dan kecepatan hisapan 0.5 m/s, 0.75 m/s, dan 1 m/s. Software CFD Fluent dan pemodelan turbulensi k-epsilon digunakan dalam pendekatan komputasi untuk melihat karakteristik aliran dan performa aerodinamika. Hasil dari simulasi CFD menunjukkan pengurangan *drag* hingga 14.73%, sedangkan data eksperimental menunjukkan pengurangan *drag* hingga 16.52%.

Kata kunci : kontrol aktif aliran, *suction*, *reversed Ahmed body*, separasi aliran, olakan, pengurangan drag, CFD, model turbulensi k-epsilon

ABSTRACT

Nama : I Gst Md Fredy Lay Teryanto
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisis pengaruh kontrol aktif aliran berupa *suction* terhadap *drag* aerodinamika model *reversed Ahmed Body*

Active flow control is one kind of effective methods in order to achieve drag reductions at vehicle as the answer of the issue about energy resources crises. Basically the aim of active flow control is to modify boundary layer where the flow separation take place. To achieve that purposes active flow control uses some energy to give excitation in the flow field such as blowing, suction, and synthetic jet. This study concerns with drag reduction in family car model by using suction flow and reversed Ahmed body is used as the model of this kind vehicle. Both of computational and experimental methods was used to conduct this research with variations at upstream flow velocity of 11.1 m/s, 13.9 m/s, 16.7 m/s, and at suction flow velocity of 0.5 m/s, 0.75 m/s and 1 m/s. CFD Fluent software was used as solver, and k-epsilon turbulence model was applied in numerical computation to get characteristic of flow field and aerodynamics performance. The solution offered by CFD simulation showed drag reduction up to 14.73%, while experimental methods showed drag reductions up to 16.52%.

Keywords : active flow control, suction flow, reversed Ahmed body, flow separation, wake, drag reduction, CFD, k-epsilon turbulence model

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 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
2. LANDASAN TEORI	5
2.1 Konsep Gaya <i>Drag</i> Aerodinamika	5
2.1.1 Komponen Gaya Drag Aerodinamika	5
2.2 Lapisan Batas, Separasi Aliran, dan Intensitas Turbulensi	8
2.2.1 Lapisan batas	8
2.2.2 Separasi aliran	9
2.2.2.1 Separasi Aliran pada Model Bluff Body Kendaraan	11
2.2.3 Intensitas turbulensi	12
2.3 Modus Kontrol Aliran	12
2.3.1 Kontrol Aktif Separasi Aliran dengan Modus Hisapan Kontinyu	14
2.4 Kajian Aliran Fluida	15
2.4.1 Metode Komputasi Numerikal	15
2.4.1.1 Diskritisasi Menggunakan Finite-Volume Method	17
2.4.1.2 Kondisi Batas dan Karakteristik Grid	17
2.4.1.3 Tahapan Proses CFD	18
2.4.1.4 Model k-epsilon	19
2.4.2 Metode Eksperimen dengan Terowongan Angin	20
2.5 Prinsip Kerja Strain Gage	23
2.5.1 Jenis strain gage	25
2.5.2 Struktur foil pada strain gage	25
2.5.3 Prinsip pengukuran strain	26
2.5.4 Strain gage sistem 4-gage	27
3. METODOLOGI PENELITIAN	28
3.1 Diagram Alir Penelitian	28

3.2 Metode CFD	30
3.2.1 Geometri Model dan Domain	30
3.2.2 Grid Generation	32
3.2.3 Kondisi Batas dan Model Simulasi	32
3.3 Metode Eksperimen	34
3.4 Fasilitas dan Peralatan Lab Pengujian	36
3.4.1 Terowongan angin	36
3.4.2 Peralatan	38
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Medan Aliran	44
4.1.1 Medan Kecepatan	44
4.1.1.1 Tanpa Kontrol Aliran	44
4.1.1.2 Pengaruh Kontrol Aliran	47
4.1.2 Distribusi Tekanan	51
4.1.2.1 Tanpa Kontrol Aliran	51
4.1.2.2 Pengaruh Kontrol Aliran	54
4.2 Intensitas Turbulensi	58
4.3.1 Tanpa kontrol aliran	59
4.3.2 Pengaruh kontrol aliran	61
4.3 Gaya <i>Drag</i> Aerodinamika	66
4.3.1 Metode CFD	66
4.3.2 Metode Eksperimen	68
5. PENUTUP	74
5.1 Kesimpulan	74
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gambar skematik untuk model Onorato.....	7
Gambar 2.2	Lapisan batas di sepanjang plat rata	9
Gambar 2.3	Separasi aliran yang terjadi pada silinder	10
Gambar 2.4	Distribusi tekanan pada permukaan silinder.....	10
Gambar 2.5	Skema model <i>Ahmed Body</i>	11
Gambar 2.6	Sket dari time-averaged flow pada daerah near wake sebagai fungsi dari sudut φ	12
Gambar 2.7	Medan koefisien total tekanan jatuh pada bidang tengah longitudinal	14
Gambar 2.8	Grid pada model aliran 2D melewati sebuah airfoil.....	17
Gambar 2.9	Jenis pengujian pada terowongan angin	21
Gambar 2.10	Bagian-bagian utama sebuah terowongan angin	22
Gambar 2.11	Desain electronic force measurement pada wind tunnel T-38, VTI-Serbia.....	22
Gambar 2.12	Batang yang mengalami gaya tarik dan tekan	24
Gambar 2.13	Struktur pembentukan strain gage	25
Gambar 2.14	Aplikasi Jembatan Wheatstone pada strain gage.....	27
Gambar 2.15	Konfigurasi sistem 4-gage	27
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	29
Gambar 3.2	Perbandingan <i>Ahmed Body</i> dengan model eksperimen.....	30
Gambar 3.3	Domain aliran dalam CFD	31
Gambar 3.4	Model simulasi dengan penambahan modus kontrol aktif.....	31
Gambar 3.5	Tampilan grid yang digunakan pada CFD.....	32
Gambar 3.6	Variasi pengambilan data model reversed Ahmed body dengan kontrol aktif aliran	33
Gambar 3.7	Skema pemodelan pada CFD	34
Gambar 3.8	Penempatan model pada load cell	35
Gambar 3.9	Skema pengukuran gaya drag pad terowongan angin	36
Gambar 3.10	Terowongan angin subsonik.....	37
Gambar 3.11	Motor DC dan unit kontrol penggerak blower axial	38

Gambar 3.12 Pengukuran kecepatan dalam seksi uji dengan hot wire.	38
Gambar 3.13 Pengukuran tekanan statik dan dinamik pada seksi uji dengan tabung pitot.....	39
Gambar 3.14 Konfigurasi 4 gage aktif untuk pengukuran bending	39
Gambar 3.15 A12 produk dari Excellent Scale	40
Gambar 3.16 Strain gage yang telah ditempelkan pada plat stainless steell	41
Gambar 3.17 Hot wire	42
Gambar 3.18 Vacuum cleaner	43
Gambar 4.1 Pathline pada model uji tanpa kontrol aliran	45
Gambar 4.2 Kontur penuh dari besaran kecepatan pada bidang tengah model uji tanpa kontrol aliran.....	46
Gambar 4.3 Pathline pada model uji dengan kontrol aliran pada $V_{o1}=11.1$ m/s...	48
Gambar 4.4 Pathline pada model uji dengan kontrol aliran pada $V_{o2}=13.9$ m/s...	49
Gambar 4.5 Pathline pada model uji dengan kontrol aliran pada $V_{o3}=16.7$ m/s...	50
Gambar 4.6 Disitribusi tekanan dalam C_p pada sisi belakang model uji tanpa kontrol aliran	53
Gambar 4.7 Distribusi dalam C_p pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o1}= 11.1$ m/s	55
Gambar 4.8 Distribusi tekanan dalam C_p pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o2}=13.9$ m/s	56
Gambar 4.9 Distribusi tekanan dalam C_p pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o3}=16.7$ m/s	57
Gambar 4.10 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji tanpa kontrol aliran.....	60
Gambar 4.11 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o1}= 11.1$ m/s	62
Gambar 4.12 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o2}=13.9$ m/s	63
Gambar 4.13 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o3}=16.7$ m/s	64
Gambar 4.14 Perbandingan koefisien drag terhadap kecepatan suction dengan metode CFD.....	68

Gambar 4.15 Fluktuasi data drag eksperimen dengan variasi kecepatan upstream..69

Gambar 4.16 Kurva distribusi gaya terhadap frekuensi untuk setiap kecepatan
usptream dengan variasi kecepatan hisapan 70

Gambar 4.16 Perbandingan koefisien drag terhadap kecepatan suction dengan
metode eksperimen 71



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kontribusi dari gaya drag tekanan (D_p) dan drag gesekan viskos (D_f)	6
Tabel 3.1 Nilai intensitas turbulensi pada free stream dengan $V_o=16.7$ m/s sepanjang garis tengah pada seksi uji terowongan angin subsonik	4
Tabel 4.1 Nilai minimum dan maksimum koefisien tekanan statik pada sisi belakang model uji tanpa kontrol aliran	51
Tabel 4.2 Nilai minimum dan maksimum koefisien tekanan statik pada sisi belakang model uji tanpa kontrol aliran	58
Tabel 4.3 Nilai intensitas turbulensi maksimum untuk pada model uji tanpa kontrol aliran untuk tiap kecepatan upstream yang berbeda	59
Tabel 4.4 Nilai maksimum intensitas turbulensi pada model uji dengan kontrol aliran untuk tiap kecepatan upstream yang berbeda	65
Tabel 4.5 Data gaya drag aerodinamika dengan metode komputasi	67
Tabel 4.6 Data drag aerodinamika pada eksperimen	71

DAFTAR NOTASI

D	= Total gaya <i>drag</i> (N)
C_D	= Koefisien hambatan
C_p	= Koefisien tekanan
ρ	= Massa jenis fluida (kg/m^3)
V	= Kecepatan rata-rata di lokasi tertentu dalam waktu yang sama
V_c	= Kecepatan suara di udara
V_o	= Kecepatan <i>upstream</i> (m/s)
V_x	= Kecepatan dalam arah sumbu x
V_y	= Kecepatan dalam arah sumbu y
V_z	= Kecepatan dalam arah sumbu z
F_x	= Gaya dalam arah sumbu x
V_{sc}	= Kecepatan <i>suction</i> (m/s)
V'	= Akar kuadrat atau deviasi standart dari fluktuasi kecepatan turbulen di suatu lokasi tertentu dalam periode tertentu
A	= Luas karakteristik/proyeksi benda (m^2)
L	= Panjang karakteristik (m)
R	= Hambatan (ohm)
Re	= Bilangan Reynolds
μ	= Viskositas dinamik (Ns/m^2)
ν	= Viskositas kinematik (Ns/m^2)
C_p	= Koefisien tekanan
P	= Tekanan pada permukaan (Pa)
P_o	= Tekanan streamline atau garis arus (Pa)
ε	= <i>Strain</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Detail gambar <i>model reversed Ahmed body</i>	78
Lampiran 2	Tabel data koefisien tekanan statik hasil simulasi CFD	79
Lampiran 3	Tabel data intensitas turbulensi (%) hasil simulasi CFD	87
Lampiran 4	Data Gaya Drag Eksperimen (gr)	95



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan populasi pada negara berkembang umumnya diikuti oleh laju urbanisasi yang tinggi, sehingga kota-kota pada negara berkembang memiliki pemukiman yang semakin padat dan meluas. Salah satu permasalahan terjadi adalah mengenai sistem transportasi. Model transportasi massal yang ada belum mampu memberikan layanan yang maksimal, sehingga masyarakat memiliki ketergantungan yang tinggi pada kendaraan penumpang (pribadi). Jenis kendaraan penumpang yang ada bervariasi, namun di Indonesia dimana kultur sosial masyarakat memiliki pola ikatan kekeluargaan yang kuat mendorong produsen kendaraan penumpang membuat kendaraan-kendaraan berkapasitas besar (MPV) yang sangat diminati di pasaran. Jenis kendaraan ini memiliki mesin yang berkapasitas besar dan bentuk-bentuk yang kurang memperhatikan aspek aerodinamis karena terbentur dengan ruang yang ada. Dengan begitu konsumsi energi kendaraan ini menjadi lebih besar dibandingkan dengan jenis kendaraan lain yang lebih slim. Berlawanan dengan hal itu, konsumsi energi dibatasi oleh berkurangnya cadangan energi dunia yang berasal dari bahan bakar minyak serta belum terbentuknya kematangan dalam aplikasi sumber-sumber energi terbarukan.

Terkait dengan hal tersebut, salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan mengkaji segi aerodinamika kendaraan mengingat bahwa konsumsi energi kendaraan juga disebabkan oleh munculnya gaya *drag* aerodinamika. Kajian aerodinamika kendaraan ini terkait dengan upaya kontrol aliran di sekitar kendaraan dengan tujuan meningkatkan performa aerodinamika. Berbagai upaya dalam kontrol aliran di sekitar kendaraan telah dikaji dan diterapkan sejak era 1970-an. Optimasi oleh kontrol pasif pada kendaraan sendiri telah memberikan efek yang signifikan pada pengurangan gaya *drag* (dari $C_x=0.45$ pada 1975 menuju $C_x=0.35$ pada 1985)^{[1][2]}, dimana C_x adalah koefisien *drag* rata-rata. Kebutuhan akan pengurangan gaya *drag* yang lebih efektif mendorong pada perancangan otomobil yang lebih kreatif dalam mengembangkan model kontrol

aktif yang inovatif. Dengan metode kontrol aktif memungkinkan untuk memodifikasi topologi aliran tanpa merubah bentuk dari kendaraan^[3]

Dalam lingkup universitas dan laboratorium industri metode kontrol aktif telah dan masih dikembangkan dengan metode komputasi maupun eksperimen, dan hasil yang signifikan telah diperoleh pada kerangka akademik. Sebagai contoh pengurangan *drag* secara signifikan yang mencapai 30% telah dibuktikan oleh Bourguis dan Tensi untuk model silinder dengan modus hisapan^[4]. Hasil serupa juga dinyatakan oleh Romueas pada model 2D fastback car yang disederhanakan^[5]. Dengan demikian, solusi hisapan maupun tiupan secara kontinyu menawarkan suatu alternatif yang menjanjikan^[6].

Untuk dapat menerapkan kontrol aktif aliran secara nyata pada kendaraan masih diperlukan penelitian lebih lanjut. Pendekatan secara eksperimen perlu dilakukan sejalan dengan pendekatan komputasi numerik. Dalam penelitian ini, penulis mengkaji penerapan kontrol aktif aliran dengan modus hisapan melalui pendekatan komputasi dan eksperimen untuk model kendaraan keluarga yang disederhanakan (*simplified family car*). Model ini didekati dengan model *reverse Ahmed body* karena dianggap dapat menggambarkan keadaan aliran pada model real.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, sebuah permodelan dari kendaraan jenis *Multi Purposed Vehicle* (MVP) berupa *Ahmed Body* dimodifikasi dengan melakukan perubahan pada orientasi arah aliran udara (*modified/reversed Ahmed Body*). Model tersebut dilengkapi dengan slot kontrol aktif berupa *suction* pada bagian belakang.

Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan kontrol aktif berupa *suction* terhadap medan aliran dan intensitas turbulensi serta koefisien *drag* pada *reversed Ahmed Body* dengan melakukan variasi pada kecepatan aliran *upstream* dan kecepatan aliran *suction*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui medan aliran dan intensitas turbulensi di sekitar *reversed Ahmed body*.
2. Mengetahui gaya *drag* aerodinamika (*form drag*) pada *reversed Ahmed body*.
3. Mengetahui pengaruh penambahan kontrol aktif berupa *suction* terhadap medan aliran dan intensitas turbulensi pada *reversed Ahmed body*.
4. Mengetahui pengaruh penambahan kontrol aktif berupa *suction* terhadap pengurangan *drag* pada *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 pada aliran bebas jauh di hulu (*mean free stream at far upstream region*).
- b. *Reversed Ahmed Body* memiliki dimensi $\frac{1}{4}$ dari *Ahmed Body* versi original. 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 aliran udara adalah 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s.
- e. Kecepatan aliran kontrol aktif berupa *suction* adalah 0.5 m/s, 0.75 m/s dan 1 m/s.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan hasil penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang saling berhubungan. Adapun urutan dalam penulisan laporan ini terlihat pada uraian dibawah ini :

BAB 1 : PENDAHULUAN

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

BAB 2 : DASAR TEORI

Pada bab ini diuraikan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi 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 ini

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Konsep Gaya *Drag* Aerodinamika

Drag aerodinamika merupakan gaya-gaya aerodinamika yang bekerja berlawanan dengan gerak relatif suatu benda yang memiliki arah sejajar dengan aliran bebas. Gaya *drag* dirumuskan sebagai hasil kali koefisien *drag*, tekanan dinamis arus bebas dan luas karakteristik /luas frontal dari benda. Dapat dituliskan sebagai berikut :

$$D = C_D \frac{\rho V_s^2}{2} A \quad (1)$$

2.1.1 Komponen Gaya *Drag* Aerodinamika




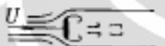
Total gaya *drag* yang bekerja pada suatu benda dapat didefinisikan merupakan penjumlahan dari 4 komponen *drag*^[7].

Total gaya *drag* = *drag* tekanan + *drag* gesekan viskos fluida
+ *drag* interferensi + *drag* induksi

Drag tekanan adalah bentuk paling umum yang digunakan untuk mendefinisikan *drag* pada benda yang disebabkan oleh resistansi fluida untuk mengubah aliran untuk mengisi ruang di belakang benda, sehingga menimbulkan perbedaan tekanan antara aliran *upstream* dan *downstream*. Ini menyebabkan tekanan total pada bagian belakang lebih rendah dari bagian depan, sehingga memunculkan hisapan ke arah belakang. *Drag* ini memiliki ketergantungan yang sangat kuat pada bentuk dari benda. 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. Untuk mendapatkan nilai gaya *drag* tekanan ini, maka dibutuhkan data distribusi tekanan sepanjang permukaan model. Tabel

2.1 menunjukkan kontribusi dari gaya *drag* tekanan dan *drag* gesekan viskos untuk bentuk profil yang berbeda-beda.

Tabel 2.1 Kontribusi dari gaya *drag* tekanan (D_p) dan *drag* gesekan viskos (D_f)^[8]

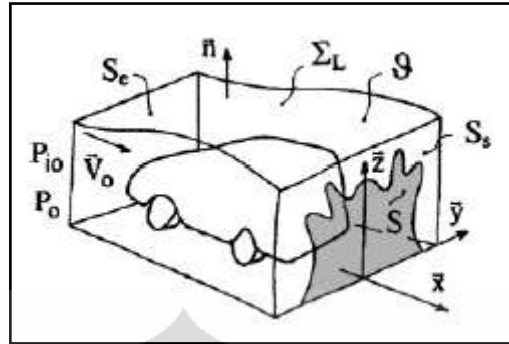
Shape	Pressure drag D_p (%)	Friction drag D_f (%)
	0	100
	≈ 10	≈ 90
	≈ 90	≈ 10
	100	0

Untuk menyatakan nilai *drag* tekanan, parameter tidak berdimensi C_p secara umum digunakan.

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

Drag gesekan viskos fluida disebabkan oleh tegangan geser pada permukaan benda yang mengarah tangensial terhadap permukaan benda. *Drag* interferensi merupakan *drag* yang muncul karena adanya interaksi fluida alir dengan defect pada permukaan, perpotongan pada permukaan, lubang, dsb yang menyebabkan munculnya olakan. *Drag* induksi adalah *drag* yang muncul karena interaksi *vortex* pada bagian *downstream* dengan benda.

Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik akan fenomena fisik ini, maka diperlukan suatu pendekatan yang memungkinkan kita mendefinisikan parameter yang paling berpengaruh dalam usaha untuk mengurangi gaya *drag* aerodinamika. Berdasarkan definisi *drag* aerodinamika di atas, Onorato et al (1984)^[9] mengajukan suatu model matematika yang didasarkan atas persamaan momentum aliran dalam suatu terowongan terhadap model kendaraan yang ada di dalamnya. Gambar 2.1 menunjukkan model kendaraan beserta komponen gaya *drag* yang bekerja padanya.



Gambar 2.1 Gambar skematik untuk model Onorato^[9]

Model ini dinyatakan dalam persamaan matematika berikut.

$$F_x = -\frac{\rho V_0^2}{2} \int_S \left(1 - \frac{v_x}{V_0}\right)^2 d\sigma + \frac{\rho V_0^2}{2} \int_S \left(\frac{v_y^2}{V_0^2} + \frac{v_z^2}{V_0^2}\right) d\sigma + \int_S (P_{10} - P_i) d\sigma \quad (3)$$

Bagian pertama dalam persamaan model Onorato menyatakan *drag* yang berhubungan dengan defisit kecepatan longitudinal yang terukur pada daerah olakan, ini berhubungan dengan munculnya *vortex* transversal pada daerah bawah. Bagian kedua berhubungan dengan *drag vortex* yang muncul karena adanya *vortex* longitudinal pada *domain* aliran, dan bagian ketiga menyatakan *drag* yang muncul karena perbedaan tekanan total antara aliran *upstream* dan *downstream*, ini berhubungan dengan pembentukan dan keberadaan lapisan terseparasi dan struktur pusaran di dalamnya.

Berdasarkan model Onorato, gaya *drag* aerodinamika dari sebuah model kendaraan secara prinsip disebabkan oleh pembentukan lapisan terseparasi pada model, juga pembentukan struktur pusaran-pusaran transversal dan longitudinal pada daerah olakan. Oleh karena itu, pengurangan *drag* dapat diperoleh dengan mengurangi, atau menghilangkan *vortex* longitudinal, dengan mengurangi luasan area olakan, atau dengan membatasi jatuh tekanan total pada daerah olakan^[7].

2.2 Lapisan Batas, Separasi Aliran, dan Intensitas Turbulensi

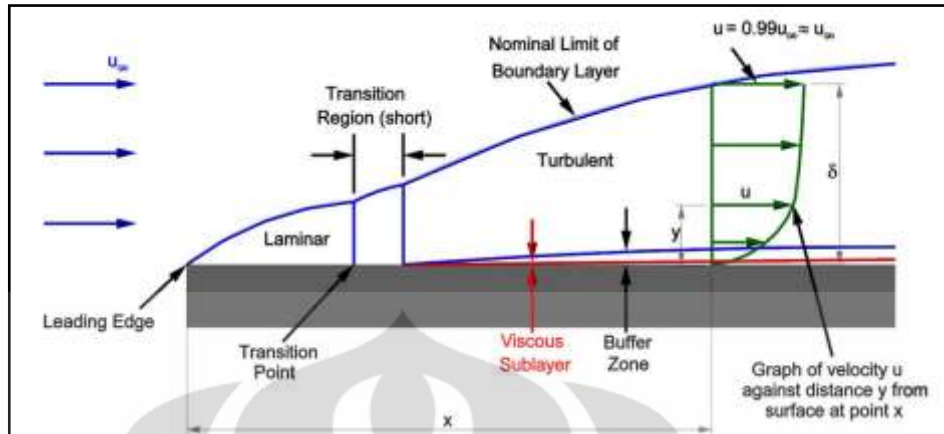
2.2.1 Lapisan Batas

Konsep lapisan batas merupakan konsep yang dikembangkan oleh Ludwig Prandtl (1874-1953), seorang ilmuwan dari Universitas Gottingen. Lapisan batas muncul pada permukaan benda karena sifat viskositas dari fluida yang cenderung menempel pada permukaan. Lapisan tepat di atas permukaan yang bersifat stasioner menyebabkan aliran fluida di atasnya melambat karena interaksi berupa tumbukan antarmolekul. Kecepatan pada daerah lapisan batas meningkat secara perlahan hingga mencapai kecepatan aliran bebas (*freestream*). Di luar daerah lapisan batas, fluida dengan kecepatan aliran bebas dapat dimodelkan sebagai fluida inviscid.

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 :

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)_{y=0} \quad (4)$$

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 menunjukkan perkembangan lapisan batas pada sebuah plat datar sejajar dengan arah aliran.



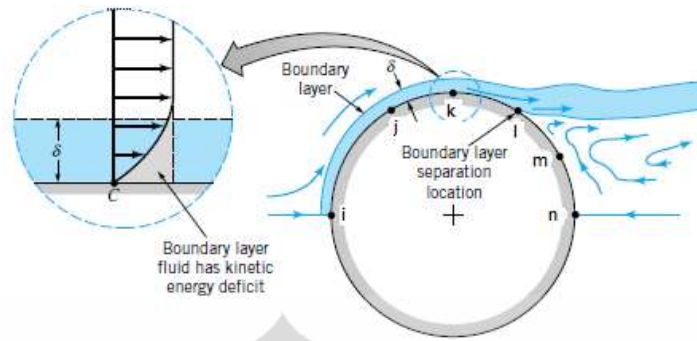
Gambar 2.2 Lapisan batas di sepanjang sebuah pelat rata

Pada aliran turbulen, terjadi kontak antar lapisan pada lapisan batas dengan intensitas tinggi. Hal ini membutuhkan sejumlah energi, sehingga lapisan dengan aliran yang lebih cepat pada daerah atas turut melambat, dan menghasilkan gradien kecepatan yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan gaya gesekan viskos.

2.2.2 Separasi Aliran

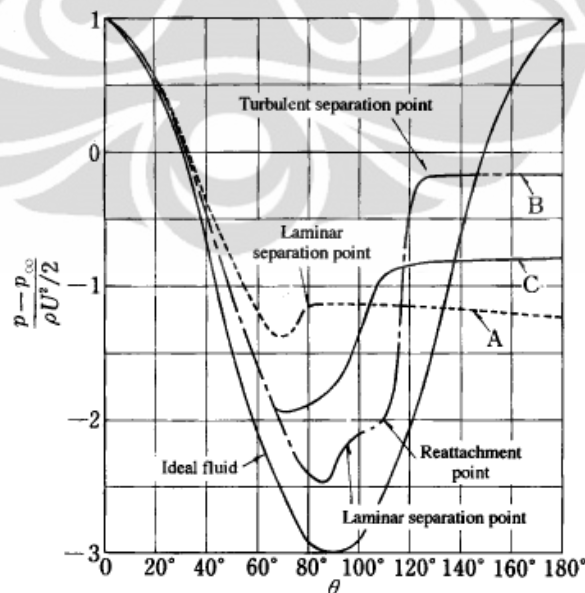
Ketika kontur permukaan suatu benda berubah secara drastis, aliran fluida pada kondisi tertentu tidak mampu untuk bergerak mengikuti kontur tersebut dan mengalami separasi aliran. Separasi aliran menyebabkan munculnya daerah olakan yang memiliki tekanan rendah sehingga menimbulkan gaya *drag*. Adanya daerah bertekanan rendah ini menyebabkan perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang model kendaraan, yang merupakan kontributor utama dari keseluruhan *drag*^[10].

Separasi aliran merupakan bentuk efek viskos dari fluida. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.3, 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 l adalah titik dimana separasi aliran terjadi. Di luar titik l (l menuju n) terjadi aliran balik karena perbedaan kecepatan yang tinggi antara daerah olakan dengan lapisan batas.



Gambar 2.3 Separasi aliran yang terjadi pada silinder^[11]

Parameter yang menjadi ukuran terjadinya separasi aliran adalah bilangan Re yang menyatakan perbandingan antara efek inersia dengan efek viskos pada aliran. Untuk sebuah silinder pada aliran terendam, pada bilangan Re rendah separasi aliran terjadi karena lapisan batas laminar, dan separasi terjadi pada sudut kurang dari 100° (sudut dihitung dari sumbu horizontal sisi kiri, putaran *clockwise*), sedangkan pada bilangan Re tinggi separasi aliran terjadi karena lapisan batas turbulen, dan separasi terjadi pada sudut hingga mendekati 130° . Gambar 2.4 menunjukkan lokasi separasi yang berbeda-beda pada permukaan silinder dengan variasi bilangan Re .

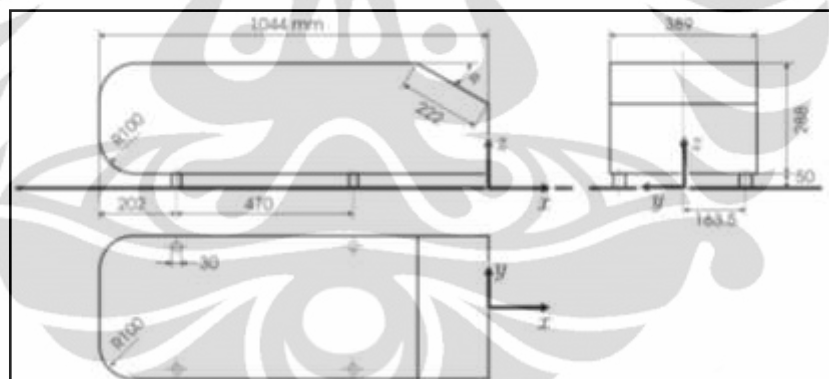


Gambar 2.4 Distribusi tekanan pada permukaan silinder : A, $Re=1.1 \times 10^5 < Re_c$; B, $Re=6.7 \times 10^5 > Re_c$; C, $Re=8.4 \times 10^6 > Re_c$ ^[8]

Keberadaan lapisan batas memberikan pengaruh yang sangat besar pada gaya *drag* yang dialami oleh benda pada aliran terendam. Oleh karena itu mempertahankan agar lapisan batas tetap menempel pada permukaan benda menjadi penting dalam konteks pengurangan *drag*.

2.2.2.1 Separasi Aliran pada Model *Bluff Body* Kendaraan

Untuk memodelkan kendaraan dalam kajian aerodinamika aliran terendam, model Ahmed *Body* merupakan bentuk paling umum yang digunakan. Bentuk ini merupakan salah satu contoh model *bluff body* kendaraan, yaitu model kendaraan yang memiliki karakteristik bidang frontal bagian depan yang luas, dan tidak ada permukaan miring yang cukup untuk mentransfer energi tekanan menjadi energi kinetik. Contoh kendaraan dengan model *bluff* adalah bus, kereta api lama, kendaraan angkut barang, dan beragam model kendaraan keluarga. Gambar 2.5 menunjukkan skema model Ahmed *body* yang umum digunakan dalam pemodelan aerodinamika kendaraan model *bluff body*.

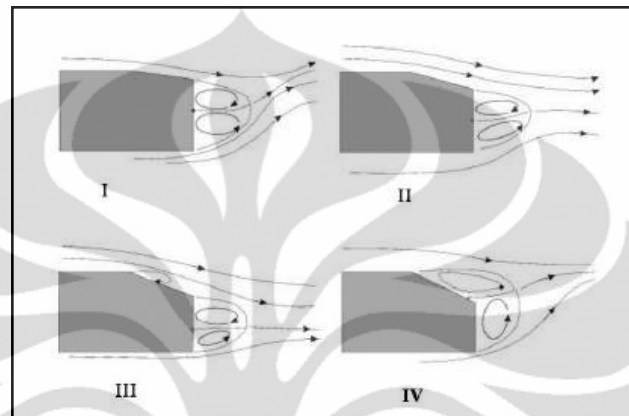


Gambar 2.5 Skema model Ahmed *Body* (dimensi dalam mm)^[12]

Penelitian yang dilakukan oleh Ahmed et al (1984)^[13] menunjukkan bahwa aliran pada bidang miring belakang model bergantung pada sudut ϕ yang diinvestigasi. Penelitian yang dilakukan dengan sudut ϕ mulai dari 0° hingga 40° menunjukkan bahwa terdapat 2 sudut kritis (12.5° , dan 30°), dimana struktur aliran berubah drastis^[14]. Sudut ϕ dibawah 12.5° (ϕ_1) menunjukkan pola aliran yang masih menempel dengan permukaan bidang miring sebelum akhirnya mengalami separasi pada ujung jatuh vertikal. Untuk bidang miring dengan sudut antara 12.5° hingga 30° aliran menjadi bersifat sangat 3 dimensional. Hal ini disebabkan

Universitas Indonesia

karena munculnya *vortex* lateral dari kedua sisi samping model. Dekat dengan sudut kritis kedua, aliran mengalami separasi sebagian namun kembali menempel pada sebelum ujung jatuh vertikal. Sudut ϕ diatas 30° (ϕ_2) menunjukkan aliran yang terseparasi penuh. Gambar 2.6 menunjukkan fenomena aliran ini.



Gambar 2.6 Sket dari *time-averaged flow* pada daerah *near wake* sebagai fungsi dari sudut ϕ (I dan II : $\phi < \phi_1$; III : $\phi_1 < \phi < \phi_2$; IV : $\phi > \phi_2$)^[15]

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 mengkarakteristikan turbulen dalam persen. Persamaan dari TI adalah :

$$TI = \frac{V'}{V} \quad (5)$$

2.3 Modus Kontrol Aliran

Kontrol aliran pada *bluff body* dengan tujuan mendapatkan pengurangan *drag* menjadi salah satu kajian utama dalam bidang aerodinamika kendaraan.

Secara umum, teknik kontrol aliran yang telah dikembangkan dapat dibedakan menjadi 4 berdasarkan konfigurasi dan tujuannya^[16] :

- a) Melakukan kontrol terhadap lapisan geser (*shear layer*) pada titik separasi. Ini akan lebih mudah jika lokasi dari titik separasi terdefinisi dengan jelas, seperti pada kasus aliran *backward-facing step* atau *Ahmed Body*.
- b) Melakukan kontrol terhadap lapisan batas pada *upstream* dari titik separasi, dengan begitu akan memodifikasi lokasi dari titik separasi dan sifat dari lapisan geser.
- c) Melakukan kontrol aliran dengan aktuasi sepanjang dinding *downstream* dimana separasi terjadi, seperti dengan tiupan, hisapan, atau sintetik jet. Teknik ini bisa menjadi strategi kontrol yang efisien, tetapi harus disesuaikan dengan aliran *upstream*.
- d) Melakukan kontrol aliran dengan aktuasi pada region *downstream* dimana separasi terjadi. Sebagai contoh, hal ini telah dibuktikan baik secara teoritis dan eksperimental bahwa aliran pada near wake silinder dengan diameter d dapat dimodifikasi dengan menggunakan silinder dengan diameter yang lebih kecil.

Sedangkan berdasarkan modus yang digunakan, secara umum metode kontrol aliran dapat dibedakan menjadi 2, yaitu kontrol pasif atau tanpa penambahan sejumlah energi dan dengan kontrol aktif atau dengan penambahan sejumlah energi.

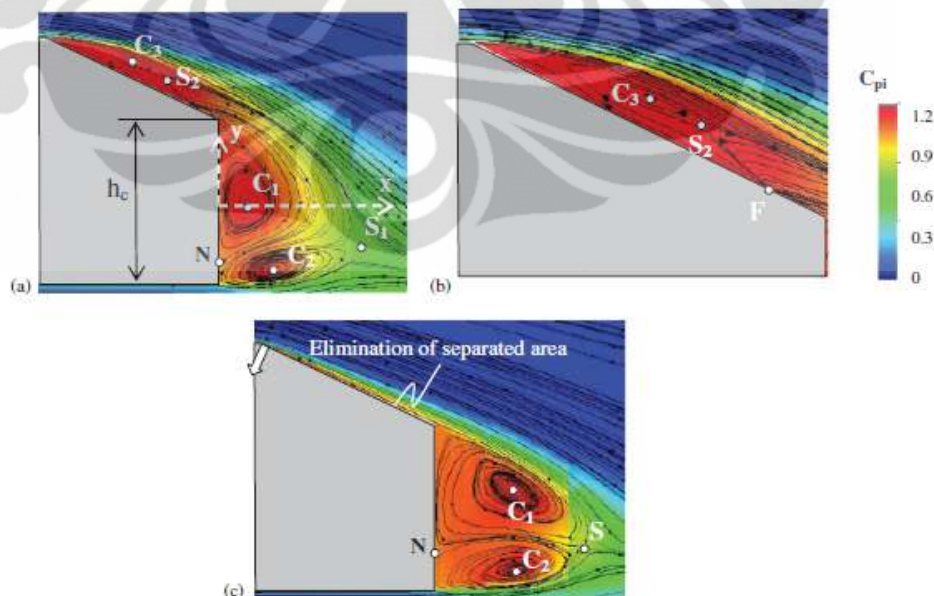
- Sistem kontrol pasif pada kendaraan didasarkan pada modifikasi distribusi tekanan di bagian belakang dan kaca belakang (*rear window*) dengan menggunakan berbagai jenis perangkat, seperti pemakaian spoiler atau fin. Sistem ini berfungsi mengurangi perkembangan zona resirkulasi di kaca belakang atau di bagian belakang serta mengurangi interaksi antar struktur-struktur olakan yang berpusar (*swirling wake structur*).
- 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.

2.3.1 Kontrol Aktif Separasi Aliran dengan Modus Hisapan Kontinyu

Berbagai penelitian mengenai pengaruh dari hisapan pada separasi aliran telah dilakukan. Adanya hisapan berpengaruh pada kondisi lapisan batas seperti yang dinyatakan oleh Jean-Luc Aider^[16] dalam poin ketiga pada subbab sebelumnya. Penelitian eksperimental yang dilakukan oleh Bourgois dan Tensi, pada model silinder menunjukkan terjadi pengurangan *drag* secara signifikan hingga mendekati 30%^[4]. Prinsipnya adalah dengan memberikan hisapan pada aliran akan memindahkan lapisan separasi yang terjadi pada model hingga mencapai titik tertentu.

Selain pada model silinder, penelitian mengenai efek hisapan pada separasi aliran juga telah dilakukan secara luas pada model Ahmed *body*. Penelitian yang dilakukan oleh Roumeas et al^[3] menunjukkan bahwa pengaruh dari hisapan memberikan efek *reattachment* pada aliran yang terseparasi pada dinding bidang miring Ahmed *body*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Medan koefisien total tekanan jatuh pada bidang tengah longitudinal : a. tanpa kontrol aliran ; b. sisi miring tanpa kontrol aliran ; c. dengan kontrol aliran^[3]

Dengan adanya *reattachment* mengakibatkan efek positif dalam pengurangan *drag*. Ini terkait dengan berkurangnya total tekanan jatuh pada daerah olakan, berkurangnya region olakan pada *downstream*, dan meningkatnya tekanan statik pada dinding belakang model Ahmed *body*. Penelitian oleh Roumeas et al, ini menunjukkan pengurangan *drag* hingga 17% pada kecepatan hisapan 0.6 V_0 , dan peningkatan kecepatan hisapan lebih dari nilai ini tidak membawa dampak yang signifikan pada pengurangan *drag*.

2.4 Kajian Aliran Fluida

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.

Kajian teoritis dan eksperimental dalam fenomena aliran fluida yang kini dikembangkan didasarkan atas metode ini. Untuk memahami fenomena aliran fluida umumnya digunakan 3 pendekatan, baik secara simultan atau berdiri sendiri.

- Pendekatan teoritis
- Pendekatan eksperimental
- Pendekatan komputasi numerikal

Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah metode komputasi numerikal dan eksperimental.

2.4.1 Metode Komputasi Numerikal

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

- Hukum kekekalan massa

Yaitu massa tidak dapat diciptakan atau dihancurkan.

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

(6)

- Hukum momentum linier

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

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\text{grad } p + \rho \mathbf{b}.$$

(7)

- Hukum kekekalan energi

Yaitu energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan

$$E_{\text{total}} = E_{\text{kinetic}} + E_{\text{internal}}$$

(8)

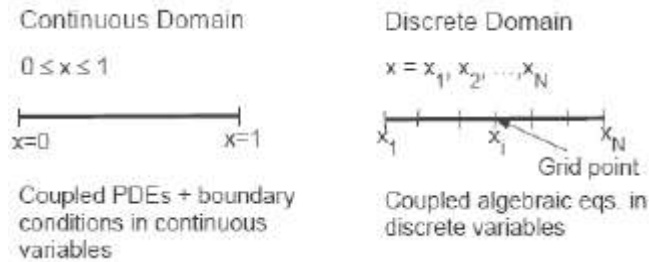
Persamaan-persamaan ini merupakan persamaan non-linier diferensial parsial dan merupakan persamaan atur pada banyak aplikasi di bidang *engineering* terutama mekanika fluida. Akan sangat sulit untuk menyelesaikan persamaan ini secara analitis. Meskipun begitu, dimungkinkan untuk mendapatkan solusi dari 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 1 dimensional kontinyu didefinisikan sebagai berikut :

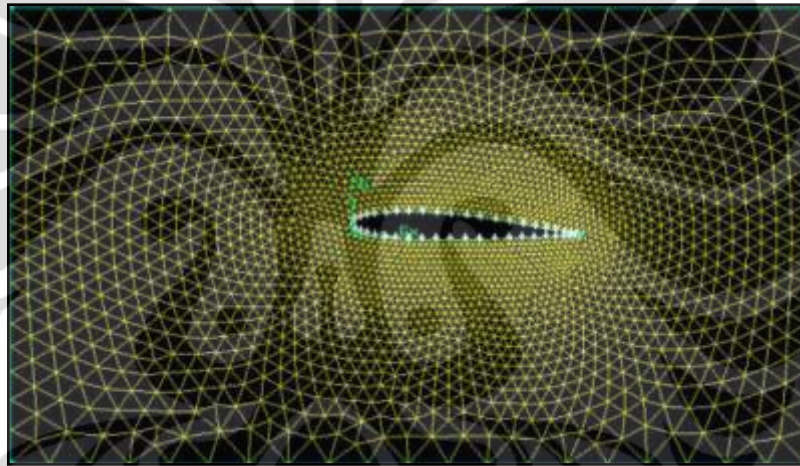
$$p = p(x), 0 < x < 1$$

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. Gambar 2.8 menunjukkan contoh grid yang digunakan dalam penyelesaian solusi aliran 2D yang melewati airfoil.



Gambar 2.8 Grid pada model aliran 2D melewati sebuah airfoil

2.4.1.1 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.

2.4.1.2 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.

2.4.1.3 Tahapan Proses CFD

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

a. *PreProcessor*

Pada tahapan ini proses yang dilakukan adalah :

- Mendefinisikan geometri model untuk menjadi *domain* komputasi
- Pembuatan grid
- Mendefinisikan properti 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. *PostProcessor*

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

2.4.1.4 Model k-epsilon

Untuk memodelkan aliran pada region turbulen terdapat beberapa pendekatan yang umum digunakan. Salah satu model pendekatan tersebut adalah model k-epsilon. Model ini dikembangkan awalnya oleh Launder & Spalding. Pemodelan turbulensi dengan model ini memberikan keuntungan berupa efisiensi sumber daya komputasi, kestabilan perhitungan numerikal, dan akurasi solusi yang dihasilkan.

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 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b + \rho \epsilon - Y_M + S_K A \quad (9)$$

Persamaan dissipasi turbulen ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (10)$$

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.

2.4.2 Metode Eksperimen dengan Terowongan Angin

Terowongan angin (*wind tunnel*) merupakan peralatan pengujian untuk melihat fenomena aliran di sekitar benda uji. Dengan menggunakan terowongan angin, kajian eksperimental yang dapat dilakukan beragam seperti visualisasi aliran, pengukuran gaya *drag* aerodinamika, pengukuran distribusi tekanan, dan intensitas turbulensi.

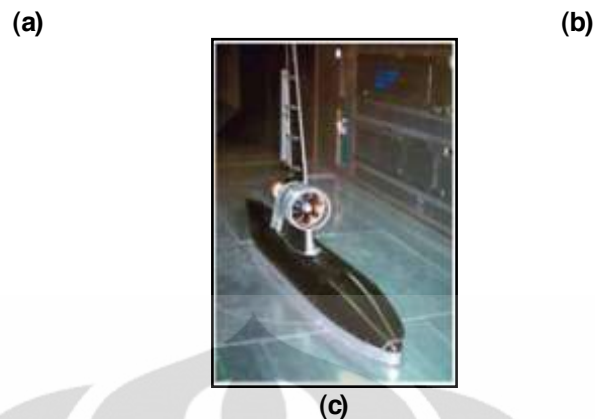
Pada prinsipnya terowongan angin bekerja dengan mengalirkan udara dengan karakteristik tertentu melewati benda uji, konsep pergerakan relatif diterapkan dalam hal ini. Dilihat dari jangkauan kecepatan aliran udara yang mampu dialirkan, terowongan angin dibedakan menjadi 3, yaitu :

- Terowongan angin subsonik untuk pengujian model aliran dengan $V < V_c$
- Terowongan angin transonik untuk pengujian model aliran dengan $V \approx V_c$
- Terowongan angin supersonik untuk pengujian model aliran dengan $V > V_c$

Prinsip dari pengujian model aliran adalah dengan hukum keserupaan yang didasarkan atas bilangan tidak berdimensi Re . Oleh karena itu ukuran dari terowongan angin beragam, disesuaikan dengan geometri model uji, dan kemampuan untuk membangkitkan aliran dalam terowongan. Jenis pengujian model yang dapat dilakukan pada terowongan angin beragam, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9.

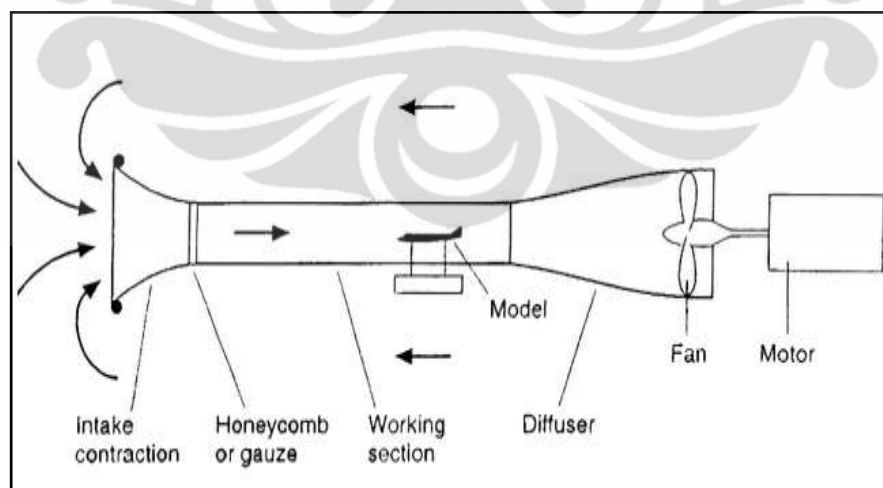


Universitas Indonesia



Gambar 2.9 Jenis pengujian pada terowongan angin (a. pengujian untuk benda terendam penuh ; b. pengujian untuk kendaraan dengan *rolling road*; c. pengujian untuk benda terendam sebagian)

Sebuah paket terowongan angin memiliki komponen utama seperti blower axial, diffuser, seksi uji, dan intake nozzle seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10. Selain itu, untuk memastikan terowongan angin memiliki karakteristik aliran tertentu, maka dalam terowongan angin terdapat komponen penunjang seperti diffuser bertingkat untuk memastikan keseragaman arah aliran, kontrol *boundary layer* dengan hisapan dan tiupan, *pressure tap* pada dinding untuk memastikan konvergensi dengan CFD. Umumnya terowongan angin yang layak untuk sebuah penelitian adalah yang memiliki aliran pada seksi uji dengan nilai intensitas turbulensi kurang dari 2%.



Gambar 2.10 Bagian-bagian utama sebuah terowongan angin

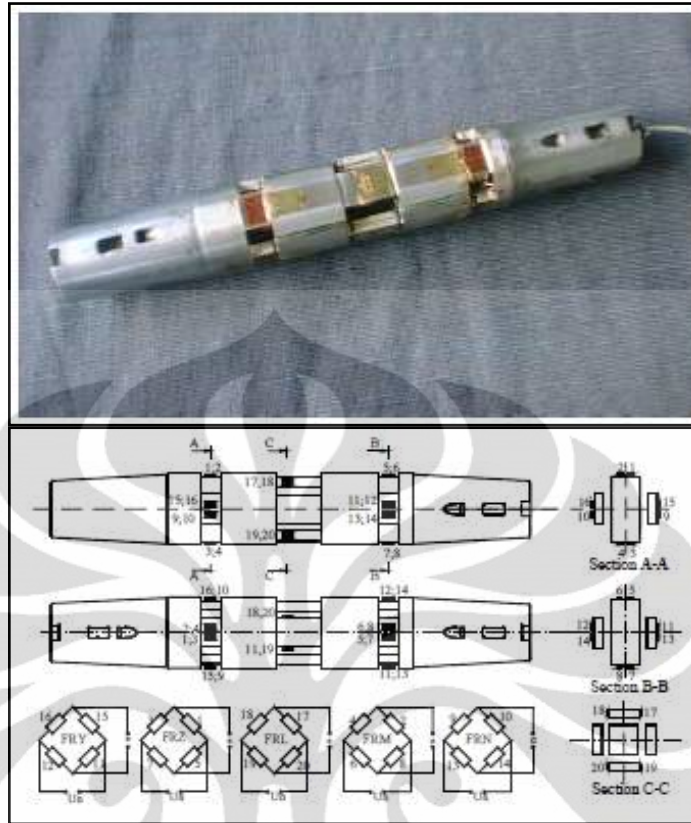
Komponen lainnya dalam sebuah terowongan angin adalah instrumen untuk mengukur gaya-gaya aerodinamika seperti gaya normal, samping, dan axial, juga

momen *yawing*, *pitching*, dan *rolling*. Instrumen yang digunakan dapat berupa *manual mass balance* dan *electronic force measurement*.

Pada *manual mass balance* pengukuran gaya dilakukan dengan menggunakan prinsip gravitasi, yaitu dengan menggeser sejumlah beban massa pada garis skala tertentu hingga diperoleh kesetimbangan sesuai kondisi awal pada model uji. Terdapat kelemahan pada *manual mass balance* yaitu, tidak bisa mengukur nilai dan perubahan gaya yang sangat kecil, juga tidak bisa mengukur dinamika dan frekuensi gaya aerodinamika yang terjadi dalam frame waktu. Oleh karena itu *electronic force measurement* merupakan instrumen yang umum digunakan saat ini karena memiliki akurasi pengukuran yang tinggi.

Prinsip pengukuran dengan *electronic force measurement* didasarkan atas kerja sensor gerak atau deformasi. Sensor yang umum digunakan adalah *strain gage* yang mampu mengukur perubahan dimensi panjang benda dengan mentransformasikan nilai tersebut ke dalam perubahan tahanan material *strain gage*.

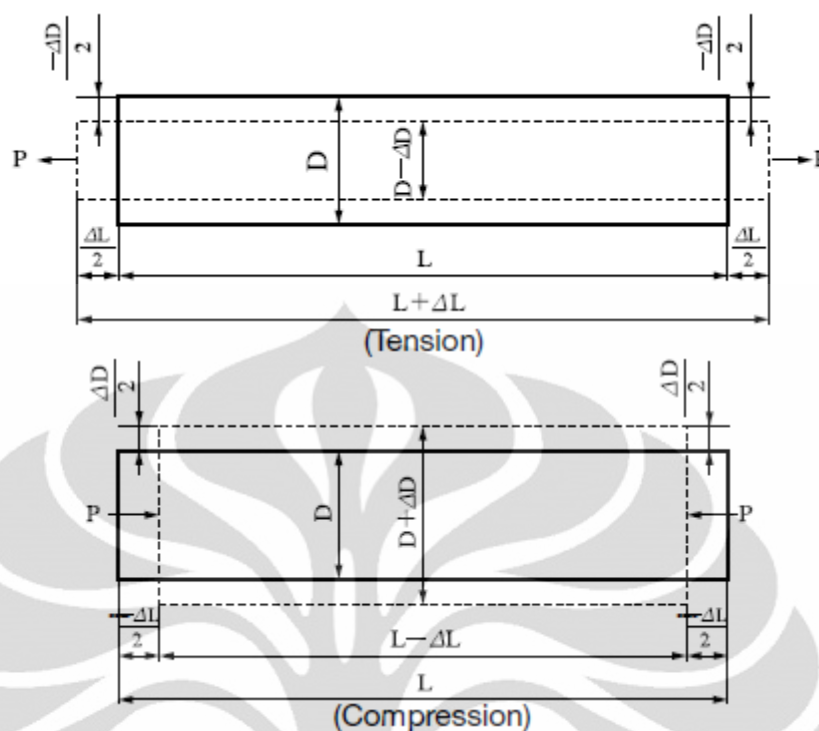
Terdapat berbagai jenis desain dari *electronic force measurement* pada terowongan angin yang didasarkan atas kebutuhan. Kompleksitas kajian pengukuran gaya menjadi salah satu pertimbangan desain *force measurement*. Sebagai contoh, gambar 2.10 menunjukkan *force measurement* pada terowongan angin T-38 di Vojnotenicki Institut (VTI), Serbia, yang memiliki kemampuan untuk mengukur 3 jenis gaya dan 3 jenis momen aerodinamika.



Gambar 2.11 Desain *electronic force measurement* pada wind tunnel T-38, VTI-Serbia

2.5 Prinsip Kerja *Strain Gage*

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 sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 : Batang yang mengalami gaya tarik dan tekan

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (11)$$

Adanya perubahan pada dimensi benda akibat gaya di atas, mengakibatkan terjadinya perubahan pada nilai tahanan elektrikal benda. Misalkan hambatan mula-mula adalah R dan strain menginisiasi perubahan hambatan sebesar ΔR , maka persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta L}{L} = K_s \varepsilon \quad (12)$$

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.

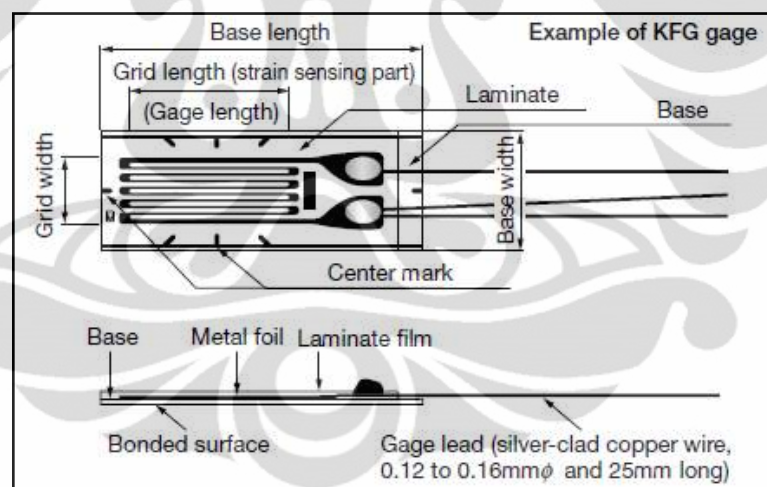
2.5.1 Jenis *strain gage*

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)

2.5.2 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 2.13 berikut.



Gambar 2.13 : Struktur pembentukan *strain gage*

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.

2.5.3 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 3, 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 :

$$e_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} E_{exc} \quad (13)$$

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

$$e_0 = \frac{(R_1 + \Delta R) R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R + R_3)(R_2 + R_4)} E_{exc} \quad (14)$$

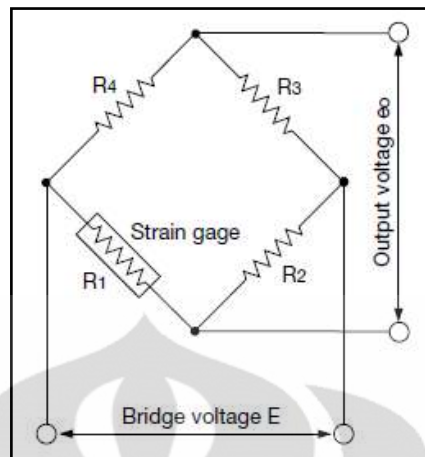
Apabila, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$,

$$e_0 = \frac{R^2 - R\Delta R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} E_{exc} \quad (15)$$

Sejak R dianggap jauh lebih besar dari nilai ΔR ,

$$e_0 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E = \frac{1}{4} K_s \varepsilon E_{exc} \quad (16)$$

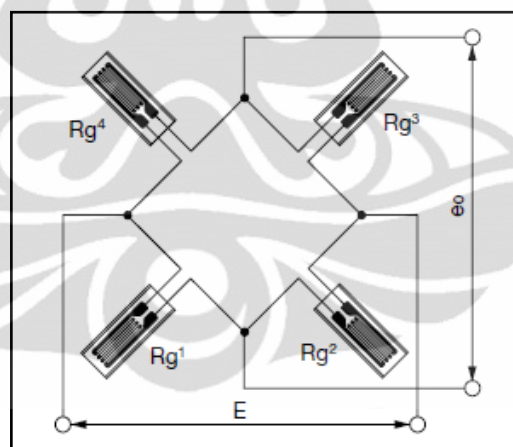
Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh keluaran hambatan yang proporsional dengan perubahan hambatan, sebagai contoh akibat perubahan *strain*. Keluaran tegangan yang sangat kecil, ini diamlifikasikan untuk pembacaan analog atau pun indikasi digital dari *strain*.



Gambar 2.14 : Aplikasi Jembatan *Wheatstone* pada *strain gage*

2.5.4 *Strain gage* sistem 4-*gage*

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 2.15 : Konfigurasi sistem 4-*gage*

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 :

$$e_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) E_{exc} \quad (17)$$

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

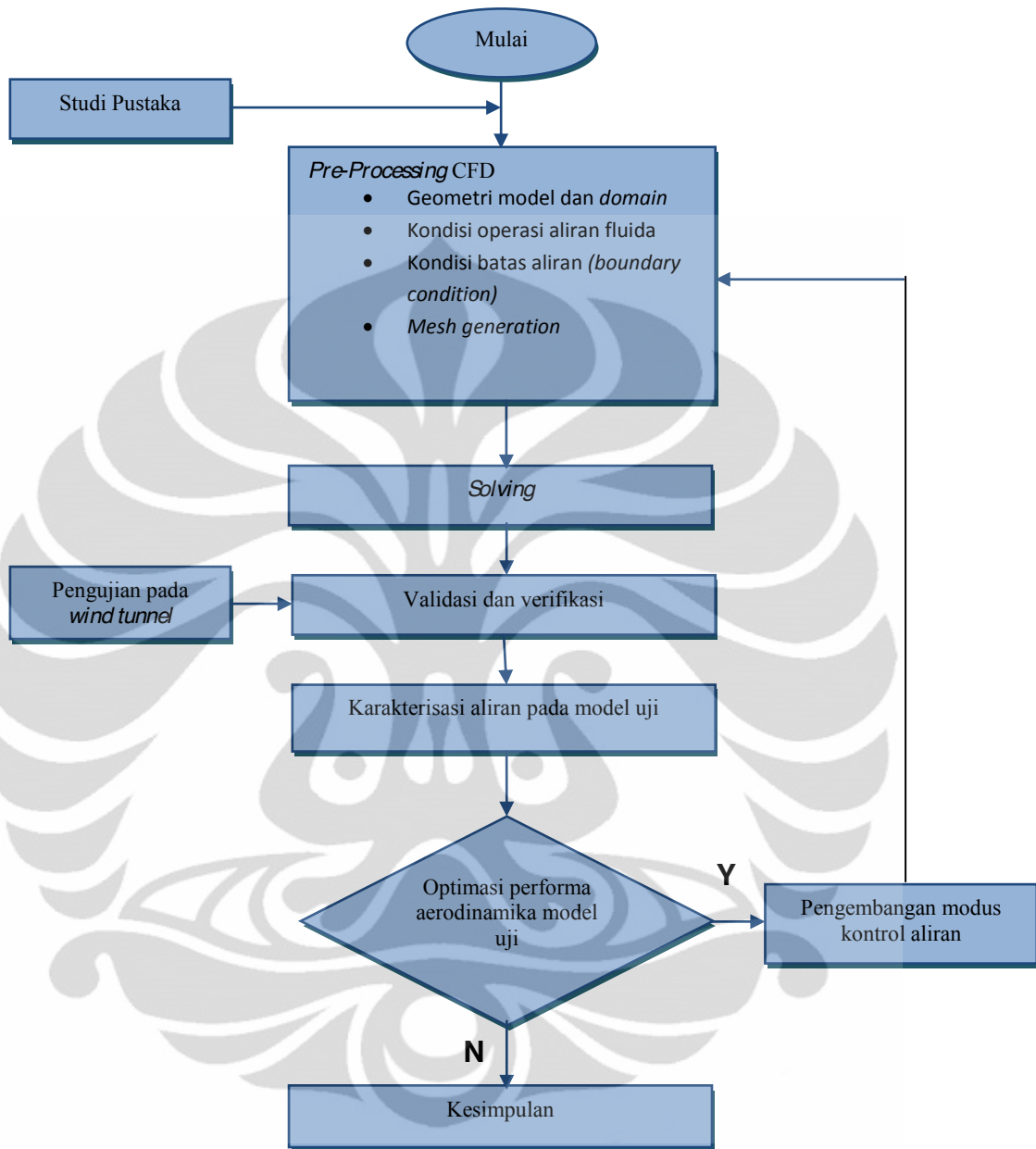
3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian untuk melihat pengaruh dari penambahan modus kontrol aktif aliran berupa hisapan kontinyu pada performa aerodinamika model kendaraan MPV. Sebagai penyederhanaan atas bentuk model kendaraan yang kompleks, maka digunakan model *reversed Ahmed body*, yaitu dengan memodifikasi arah aliran pada bentuk model uji standar Ahmed Body.

Penelitian menggunakan pendekatan komputasi numerik berbasis metode volume terbatas (FVM) untuk menganalisa performa aerodinamika dan fenomena aliran fluida disekitar model uji. Untuk *grid generation* digunakan software Gambit 2.4.6, sedangkan untuk *solver* dan *postprocessing* digunakan Fluent 6.3.26. Dengan metode CFD dapat diketahui pola aliran, distribusi tekanan, dan gaya *drag* aerodinamika pada model uji.

Sebagai validasi untuk solusi yang diperoleh dari CFD, maka dilakukan pengujian secara eksperimental pada model uji dengan menggunakan terowongan angin. Model uji pada terowongan angin memiliki dimensi yang sama seperti pemodelan CFD. Data gaya *drag* aerodinamika yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari CFD.

Nilai parameter-parameter kajian ini kemudian disajikan dalam bentuk grafik, diagram, dan kontur penuh dalam bab berikutnya sehingga memudahkan dalam melihat pengaruh dari penambahan kontrol aktif separasi aliran. Gambaran menyeluruh mengenai penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada diagram alir berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Metode CFD

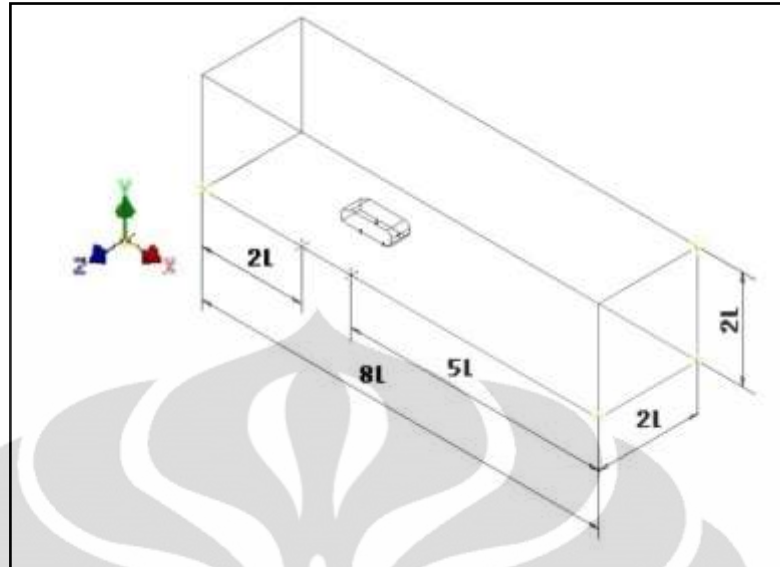
3.2.1 Geometri Model dan *Domain*

Dalam penelitian mengenai model kendaraan yang terkait dengan separasi aliran pada umumnya digunakan model Ahmed body, namun model ini tidak dapat mencerminkan bentuk kendaraan van keluarga umumnya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan model yang berbeda, yaitu dengan memodifikasi model Ahmed body. Pada model penelitian ini, arah aliran untuk model Ahmed body dibalik (*reversed Ahmed body*) dan geometri disesuaikan dengan rasio 0.25 sehingga model memiliki dimensi panjang $l=0.261$ m, lebar $w=0.09725$ m, dan tinggi $h=0.072$ m. Gambar 3.2 menunjukkan perbandingan tampak samping model Ahmed *body* dengan model uji.



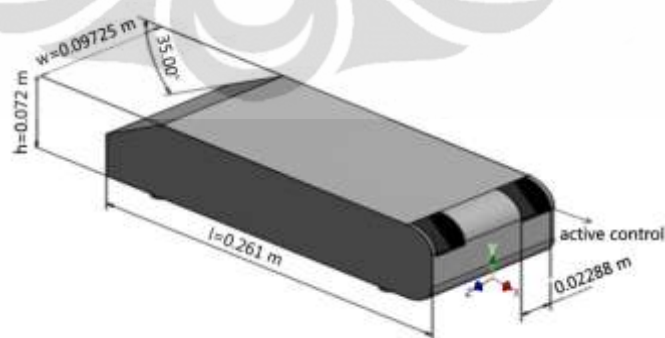
Gambar 3.2 Perbandingan geometri tampak samping Ahmed Body dengan model uji

Domain aliran yang digunakan memiliki bentuk balok dengan dimensi panjang=81, lebar=21, dan tinggi=21 (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

Tahapan awal simulasi CFD adalah untuk mengetahui aliran di sekitar model uji tanpa penambahan kontrol aliran. Solusi CFD yang diperoleh kemudian dianalisa dan digunakan untuk merancang modus kontrol aktif aliran berupa hisapan kontinyu. Dalam kajian ini, modus kontrol aktif belum divariasikan secara topology dan peletakan, namun difokuskan untuk mengkaji nilai optimum kecepatan hisapan terhadap pengurangan *drag* aerodinamika. Eksitasi aliran ditempatkan pada kedua ujung tepi sisi belakang model seperti ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Model simulasi CFD 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,

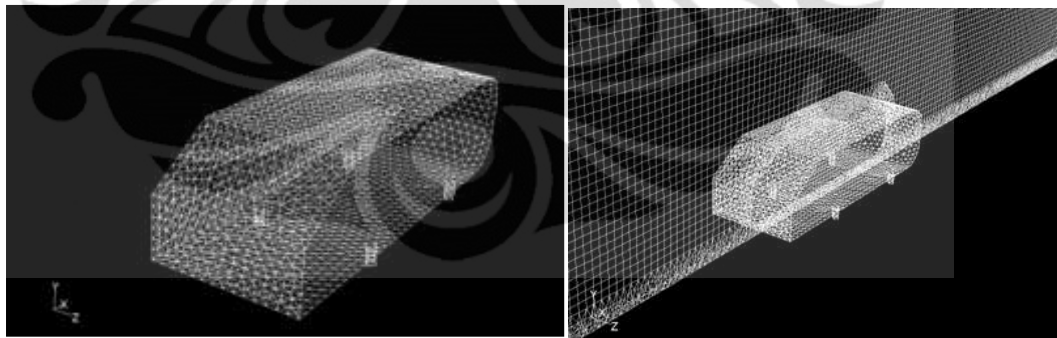
γ = Sudut yang dibentuk oleh juring eksitasi (78.52°)

r = Radius kelengkungan tepi atas model (0.025 m)

z = lebar slot eksitasi (0.02288 m)

3.2.2 Grid Generation

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 / solusi 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 menunjukkan tampilan grid pada model uji.

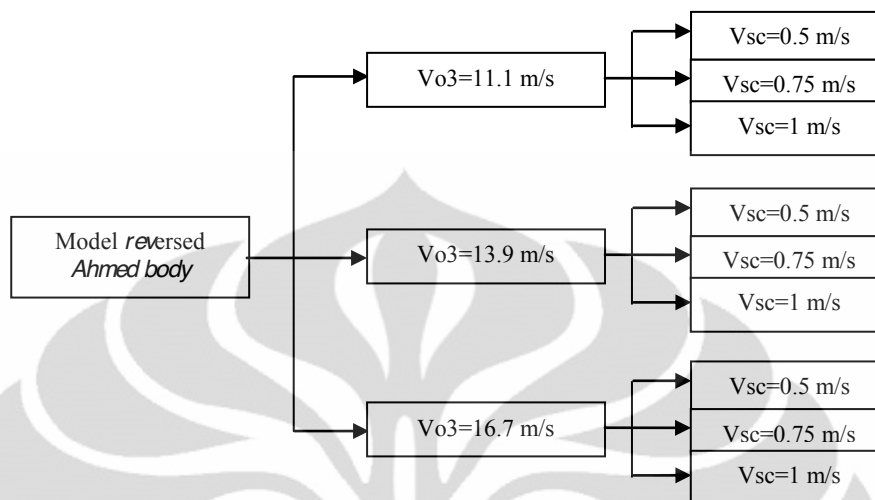


Gambar 3.5 Tampilan grid yang digunakan pada CFD

3.2.3 Kondisi Batas dan Model Simulasi

Dalam kajian penelitian ini, model dialiri oleh fluida (udara) dengan 3 kecepatan berbeda, 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 1.99×10^5 , 2.48×10^5 , 2.98×10^5 dengan acuan panjang model uji (1).

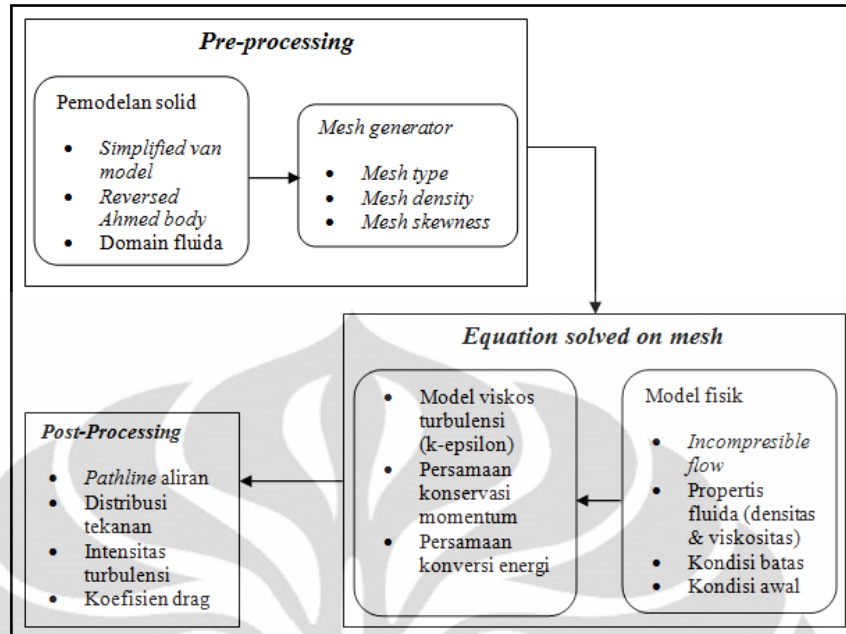
Variabel lainnya dalam penelitian ini adalah variasi kecepatan hisapan modus kontrol aktif aliran, yaitu 0.5 m/s, 0.75 m/s, dan 1 m/s.



Gambar 3.6 Variasi pengambilan data model *reversed Ahmed body* dengan kontrol aktif aliran

Pendekatan model aliran yang digunakan adalah model turbulensi *k-epsilon* standard, karena aliran pada model telah berada pada region turbulen. Model *k-epsilon* standard ini telah digunakan secara luas dalam penelitian aerodinamika kendaraan dan menunjukkan hasil yang sesuai dengan data eksperimen pada terowongan angin.

Dalam simulasi CFD ini diasumsikan bahwa medan aliran bersifat tidak mampu mampat (aliran subsonik, $v \ll v_c$), dan aliran bebas jauh di hulu (*mean free stream at far upstream region*) berada dalam kondisi tunak dan seragam. Gambar 3.7 menunjukkan ringkasan metode CFD yang diterapkan dalam penelitian ini.



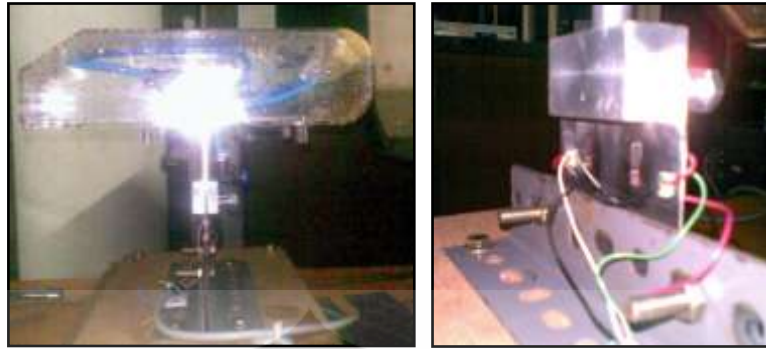
Gambar 3.7 Skema pemodelan pada CFD

3.1 Metode Eksperimen

Pada metode eksperimen, model *reversed Ahmed body* dibuat dengan bahan akrilik. Model *reversed Ahmed body* terdiri dari 2 model yaitu, model untuk aliran tanpa eksitasi dan model untuk aliran dengan eksitasi berupa hisapan. Model ini ditempatkan di dalam terowongan angin yang mengalirkan udara *free stream* ke model. Parameter yang akan dikaji gaya *drag* aerodinamika.

Data gaya *drag* aerodinamika diambil dengan menggunakan sel *strain gage* yang ditempatkan dalam sebuah plat yang didirikan vertikal sehingga membentuk sebuah *load cell*. *Load cell* tersusun dari sebuah plat *stainless steel* yang telah *dimounting strain gauge* pada sisi depan dan belakang, dan dihubungkan ke model *reversed Ahmed body* dengan menggunakan batang aluminium. Model *reversed Ahmed body* yang ditempatkan dalam terowongan angin kemudian dialiri udara sehingga model menerima gaya dorong berupa gaya axial.

Prinsip dari pengambilan data gaya didasarkan atas deformasi bending pada suatu material akibat gaya yang membentuk momen yang berada pada jarak y dari titik dasar. *Strain gauge* akan membaca proses tersebut dalam bentuk perubahan hambatan material dan menghasilkan tegangan keluar sebagai *output*.

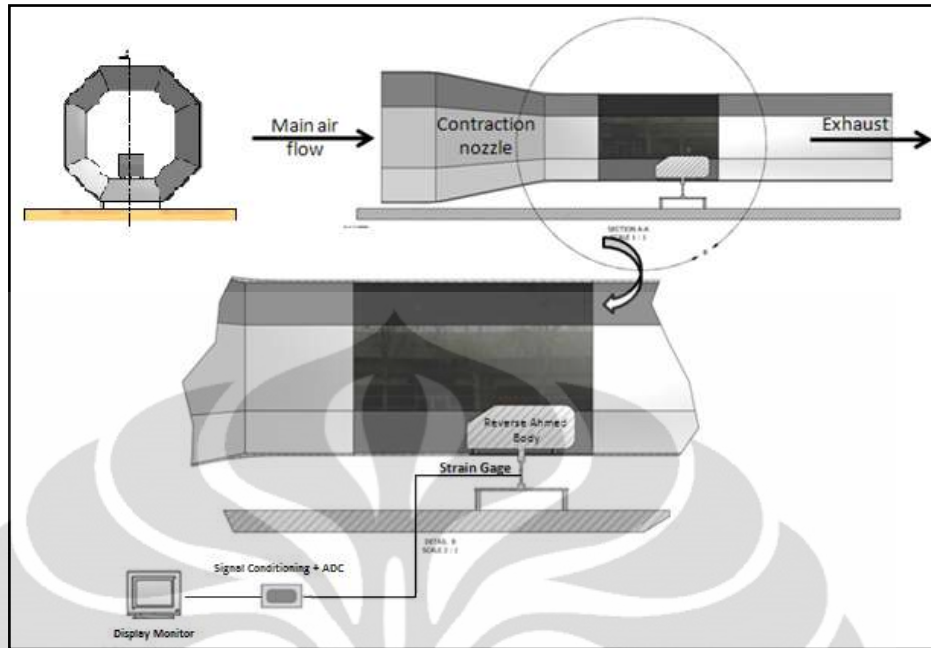


Gambar 3.8 Penempatan model pada load cell

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

1. Model diletakkan di atas plat *stainless steel* yang telah dipasangkan *strain gage*
2. Model dimasukkan ke dalam seksi uji namun plat tetap berada di luar terowongan angin
3. Motor terowongan angin dinyalakan sehingga udara mengalir 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.

Skema instalasi peralatan untuk pengukuran gaya *drag* ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Skema pengukuran gaya *drag* pad terowongan angin

3.2 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.

3.2.1 Terowongan angin

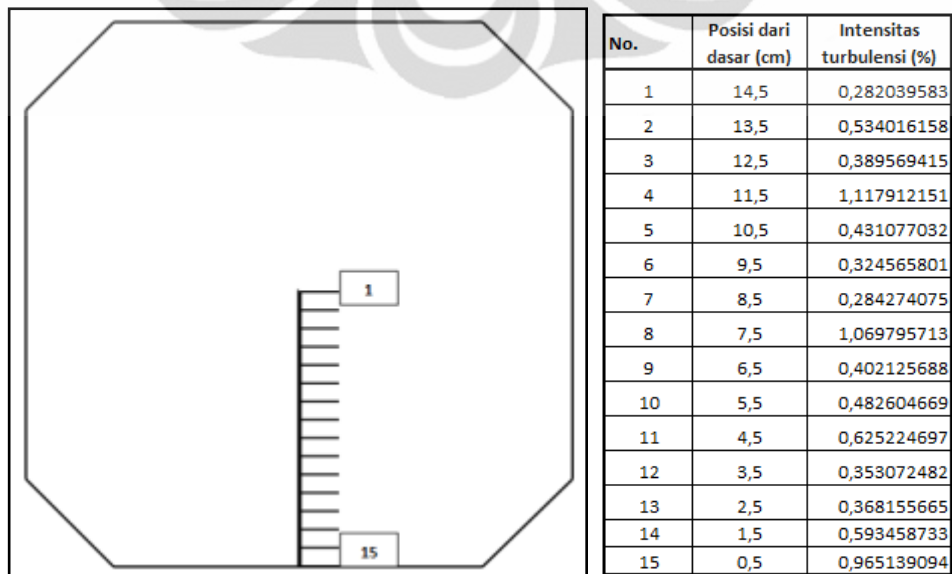
Terowongan angin yang digunakan merupakan produk dari Armfield dengan kode C2-00, mempunyai geometri panjang 260 cm dan diameter mulut 55 cm. Aliran dalam terowongan angin digerakkan blower axial dengan penggerak motor DC yang memiliki putaran 2800 rpm dan daya 1.5 kW. Terowongan angin memiliki satu sesi diffuser yang berfungsi untuk menyeragamkan arah aliran. Kecepatan aliran udara maksimum yang mampu dibangkitkan dalam seksi uji adalah 70 km/jam atau 19.44 m/s.



Gambar 3.10 Terowongan angin subsonik

Untuk memastikan bahwa aliran pada terowongan angin berada dalam keadaan steady pada *free stream* maka perlu diukur nilai intensitas turbulensinya terlebih dahulu. 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 buah untuk setiap titik ukur pada garis tengah. Nilai intensitas turbulensi pada seksi uji untuk kecepatan aliran bebas 16.7 m/s diperoleh $\pm 1\%$ (tabel 3.1) dan menunjukkan bahwa terowongan angin memiliki aliran yang *steady* pada keadaan *free stream*.

Tabel 3.1 Nilai intensitas turbulensi pada free stream dengan $V_0=16.7$ m/s sepanjang garis tengah pada seksi uji terowongan angin subsonik



Selain mengukur intensitas turbulensi pada keadaan free stream, kecepatan aliran pada seksi terowongan angin perlu dikalibrasi dan disesuaikan dengan putaran blower axial yang dikontrol dalam suatu unit panel. Untuk mengukur kecepatan aliran digunakan instrumen *hot wire*.



Gambar 3.11 Motor DC dan unit kontrol penggerak blower axial



Gambar 3.12 Pengukuran kecepatan dalam seksi uji dengan *hot wire*.

3.2.2 Peralatan

a. Tabung Pitot

Tabung pitot digunakan sebagai instrumen untuk mengukur tekanan static dan dinamik dalam seksi uji pada keadaan aliran bebas. Tabung pitot ditempatkan menghadap ke hulu di tengah terowongan angin yang sedang mengalirkan udara seperti ditunjukkan pada gambar 3.13.

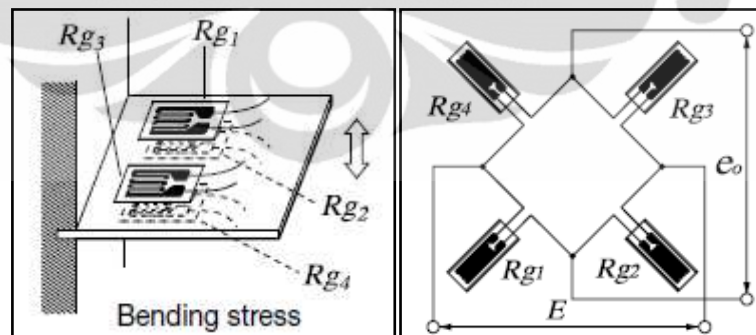


Gambar 3.13 Pengukuran tekanan statik dan dinamik pada seksi uji dengan tabung pitot

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

b. Load Cell

Untuk mengukur gaya-gaya aerodinamika akibat aliran dalam terowongan angin digunakan strain gauge yang ditempatkan pada sebuah plat dengan membentuk konfigurasi sistem 4 gage aktif. *Strain gage* yang digunakan berjumlah 4 buah yang kemudian dirangkai menjadi sebuah jembatan wheatstone penuh.



Gambar 3.14 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

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

Operating temperature/humidity : 0-40 $^{\circ}\text{C}$; $\leq 90\%$ RH



Gambar 3.15 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 tegangan yang dikeluarkan oleh sistem 4 gage aktif.

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

1. Mempersiapkan alat untuk proses pemasangan *strain gage*.
2. Menggosok dengan amplas bagian yang akan dipasang *strain gage*, ini dilakukan dengan pola melingkar dengan menggunakan amplas yang memiliki tingkat kekasaran yang semakin halus hingga nomor kekasaran 1500.

3. Menandai lokasi pemasangan, kemudian membersihkan dengan menggunakan *acetone* dan kertas tissue. Arah menggosok satu arah saja sampai tidak ada kotoran membekas di kertas tissue.
4. Memosisikan *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 dengan segera dan tekan seluruh permukaannya dengan ibu jari selama 60 detik.
7. Memberikan solder pada kaki *strain gage* sehingga terhubung dengan terminal.
8. Melakukan tes tahanan antara kedua kaki *strain gage*, juga cek apakah terjadi short dengan *body part* yang akan diukur.
9. Melakukan instalasi alat pengkondisian sinyal dan monitor.
10. Melakukan kalibrasi



Gambar 3.16 *Strain gage* yang telah ditempelkan pada plat *stainless steel*

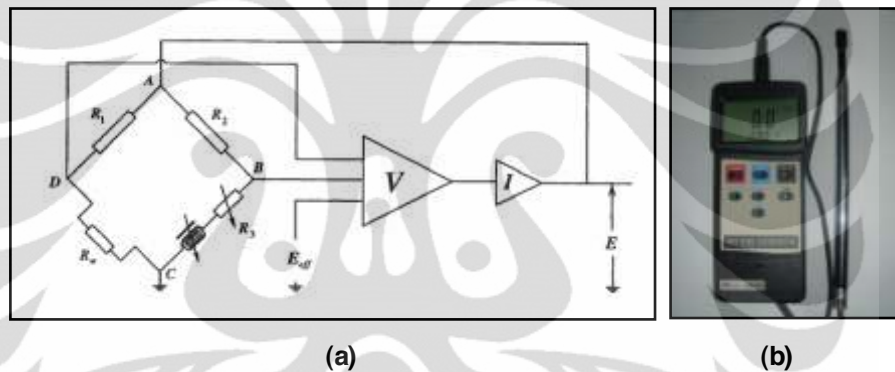
Kalibrasi dari load cell dilakukan dengan menempatkan beban yang telah diketahui massanya pada ujung dari load cell. Nilai beban ini pertama dimasukkan sebagai data awal yang direkam oleh monitor, kemudian beban massa sesungguhnya diletakkan pada load cell dan monitor akan menyimpan informasi setting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

Untuk mengukur kecepatan aliran dalam seksi uji dan aliran eksitasi digunakan *hot wire*. 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 dengan jenis *constant temperature anemometry* (CTA), dimana bidang sensor tegak lurus dengan sumbu batang probe.



Gambar 3.17 Hot wire (a. Skema elektrikal dari model hot wire tipe CTA ; b. *hot wire* AM-4204)

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. Vacuum Cleaner

Untuk memberikan eksitasi pada aliran disekitar model digunakan vacuum cleaner dengan daya hisapan maksimal terukur pada area eksitasi model adalah 1 m/s.



Gambar 3.18 *Vacuum cleaner*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

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

4.1 Medan Aliran

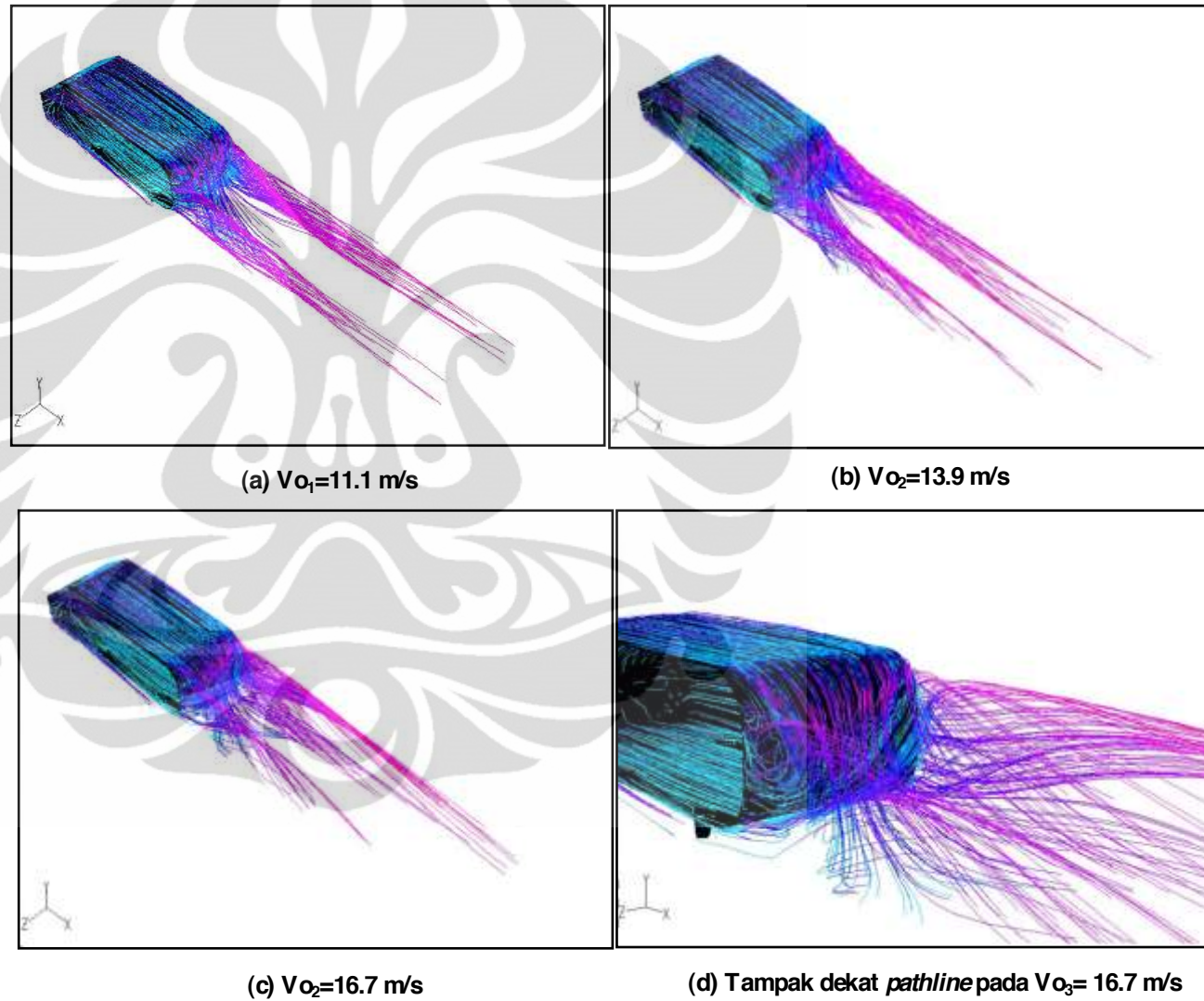
Medan aliran merupakan penggambaran karakteristik aliran pada *range* daerah atau luasan tertentu. Medan aliran ini dapat dinyatakan dengan medan kecepatan, dan distribusi tekanan.

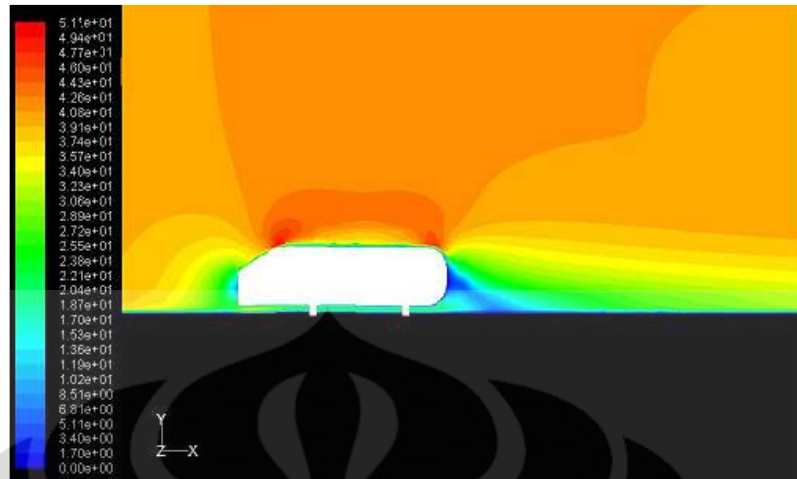
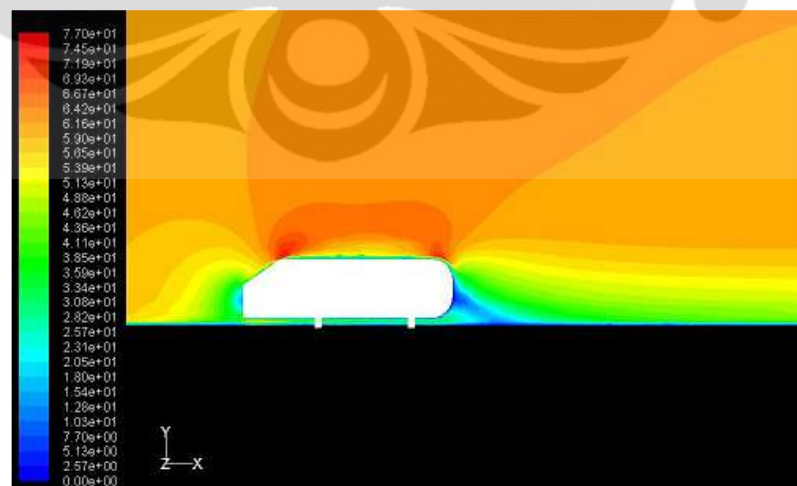
4.1.1 Medan Kecepatan.

4.1.1.1 Tanpa Kontrol Aliran

Medan kecepatan dapat dinyatakan dengan *pathline* aliran dan gambar kontur dari besaran kecepatan. Pada gambar 4.1 berikut kita dapat melihat adanya separasi aliran yang terjadi pada bagian belakang model uji, dan mengakibatkan adanya daerah olakan. Separasi aliran terjadi karena fluida tidak dapat mengalir mengikuti bentuk permukaan benda. Struktur olakan, selain disebabkan oleh separasi aliran juga dipengaruhi oleh adanya *vortex* longitudinal yang muncul pada dari bagian tepi samping, sisi belakang model uji. *Vortex* longitudinal ini terbentuk karena adanya perbedaan kecepatan aliran antara daerah olakan dan daerah samping. Pada daerah olakan dimana terjadi separasi aliran terjadi, muncul region dimana kecepatan aliran dari fluida lebih rendah dari kecepatan *upstream*. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 4.2.

Gambar 4.1 *Pathline* pada model uji tanpa kontrol aliran



(a) $V_{01}=11.1$ m/s(b) $V_{02}=13.9$ m/s(c) $V_{03}=16.7$ m/s

Gambar 4.2 Kontur penuh dari besaran kecepatan pada bidang tengah model uji tanpa kontrol aliran

Dari gambar 4.2 (a, b, dan c) terlihat region di sisi belakang model uji yang memiliki kecepatan lebih rendah. Sedangkan kecepatan aliran tertinggi terjadi pada ujung sisi patahan bidang miring bagian depan dan sisi atas dari kontur melengkung pada bagian belakang model uji. Fenomena aliran yang juga dapat diamati adalah terjadinya titik stagnasi pada sisi tegak bagian depan dari model uji, yang menyebabkan terjadinya perubahan seluruh energi kinetik menjadi energi tekanan.

Untuk tiap kecepatan *upstream* yang berbeda, terbentuk pola kontur besarnya kecepatan alir yang berbeda. Hal ini terutama dapat diamati pada aliran *downstream*, pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s region berkecepatan lebih rendah memiliki luasan yang lebih besar dibanding pada pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s. Hal ini disebabkan karena fluida mengalir pada bilangan Re yang berbeda-beda. Pada aliran dengan bilangan Re lebih rendah ($V_0=11.1$ m/s), efek viskos pada aliran lebih terlihat dan memberikan pengaruh lebih dibanding aliran dengan bilangan Re lebih tinggi ($V_0=16.7$ m/s).

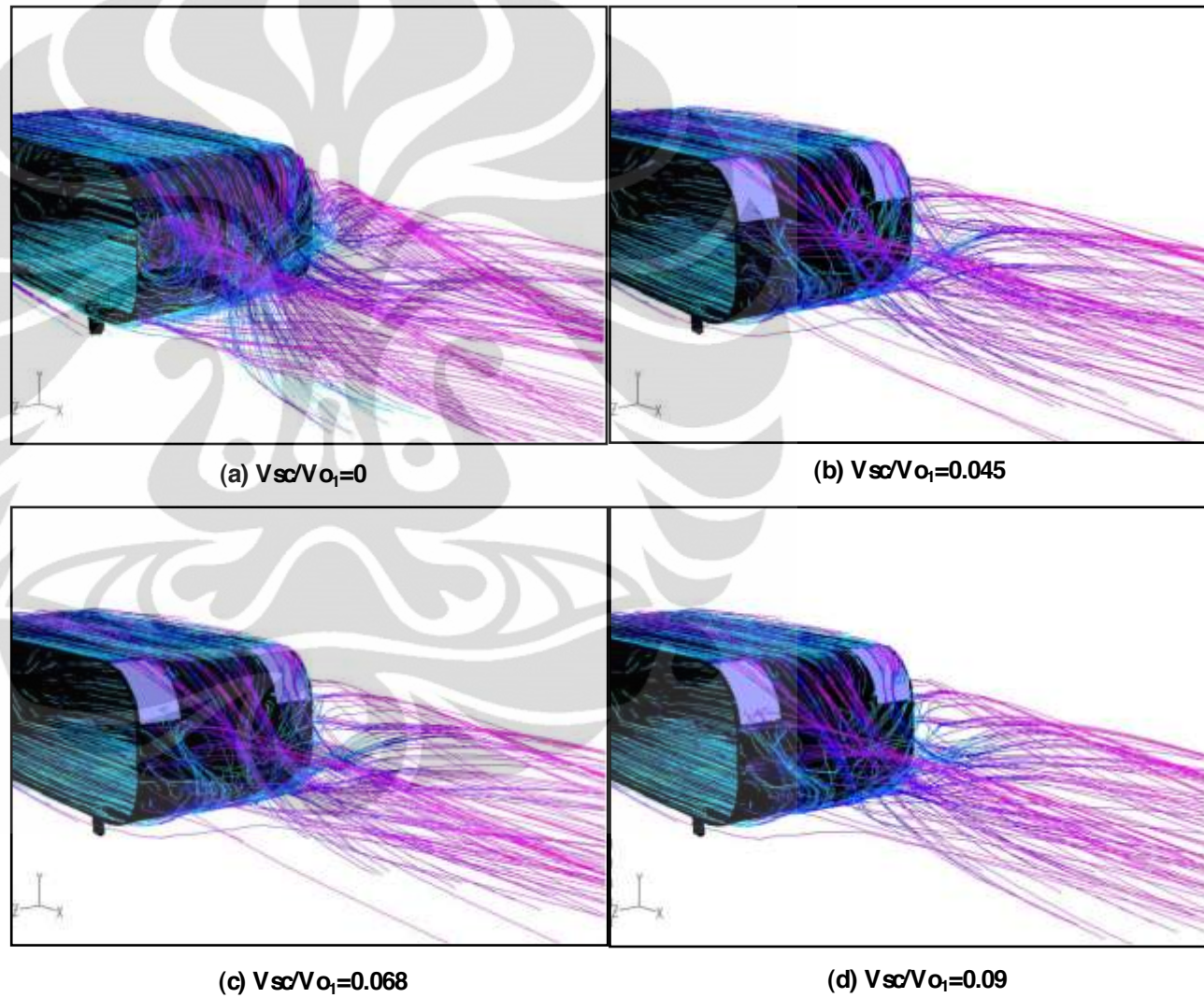
Dari definisi *drag* yang diberikan oleh Onorato et al (1984)^[9], bahwa terbentuknya *drag* aerodinamika pada kendaraan selain disebabkan oleh aliran terseparasi dan tekanan jatuh, juga merupakan efek dari interaksi *vortex* longitudinal, maka daerah eksitasi aliran ditempatkan pada sisi belakang dekat tepi samping dimana *vortex* longitudinal terbentuk dengan tujuan mengurangi struktur *vortex* yang terbentuk, mengurangi luasan area olakan dan mengurangi total tekanan jatuh.

4.1.1.2 Pengaruh Kontrol Aliran

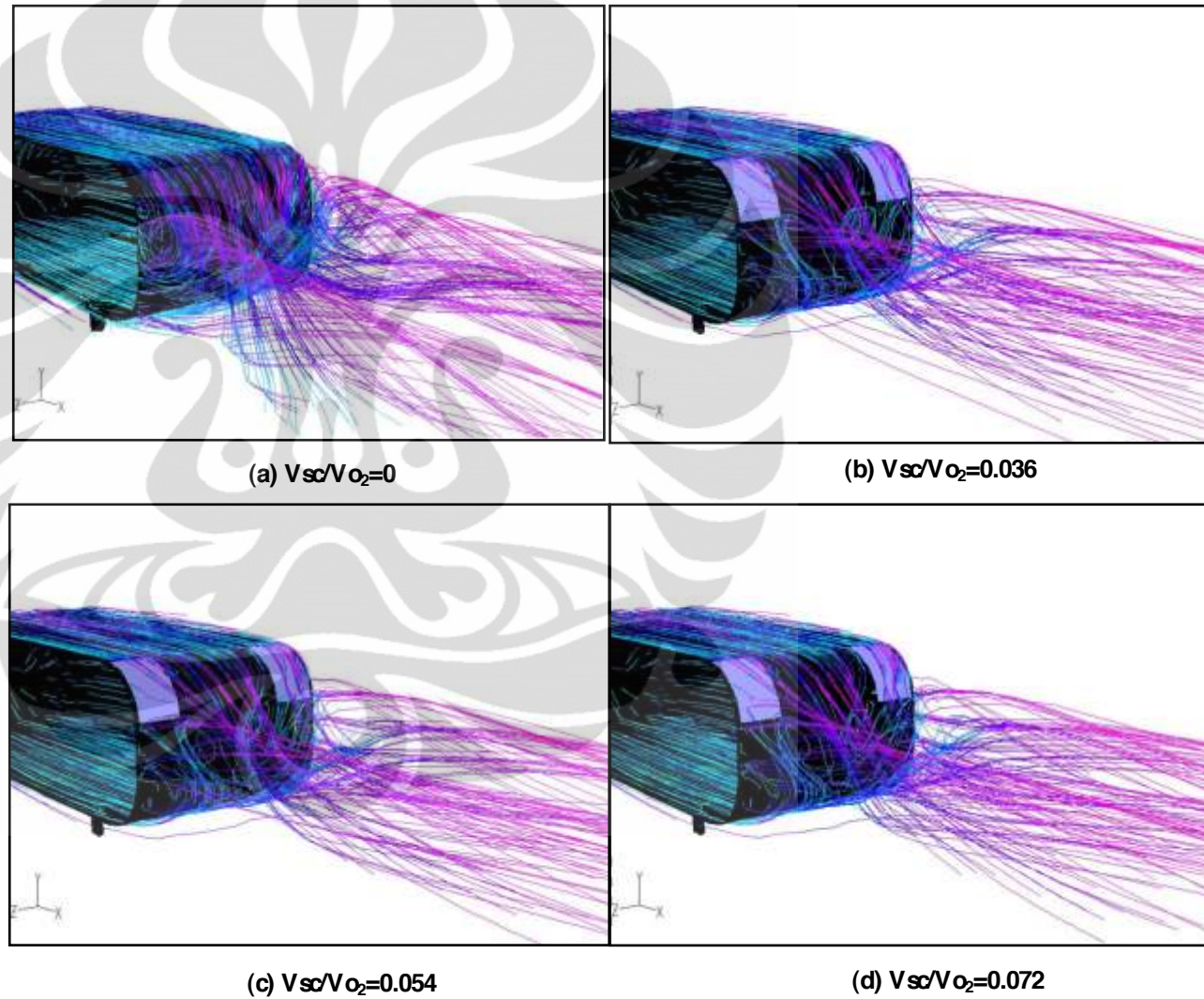
Kontrol aliran dilakukan dengan modus hisapan kontinu dengan memberikan kondisi batas kecepatan inlet negatif sebagai input pada CFD pada daerah eksitasi yang telah ditentukan. Dalam penelitian ini digunakan 3 variasi kecepatan hisapan untuk setiap kecepatan *upstream* ($V_{01}=11.1$ m/s ; $V_{02}=13.9$ m/s ; $V_{03}=16.7$ m/s), yaitu 0.5 m/s, 0.75 m/s, dan 1 m/s.

Pengaruh dari modus kontrol aliran hisapan dapat dilihat pada *pathline* aliran pada gambar 4.3,4.4, dan 4.5.

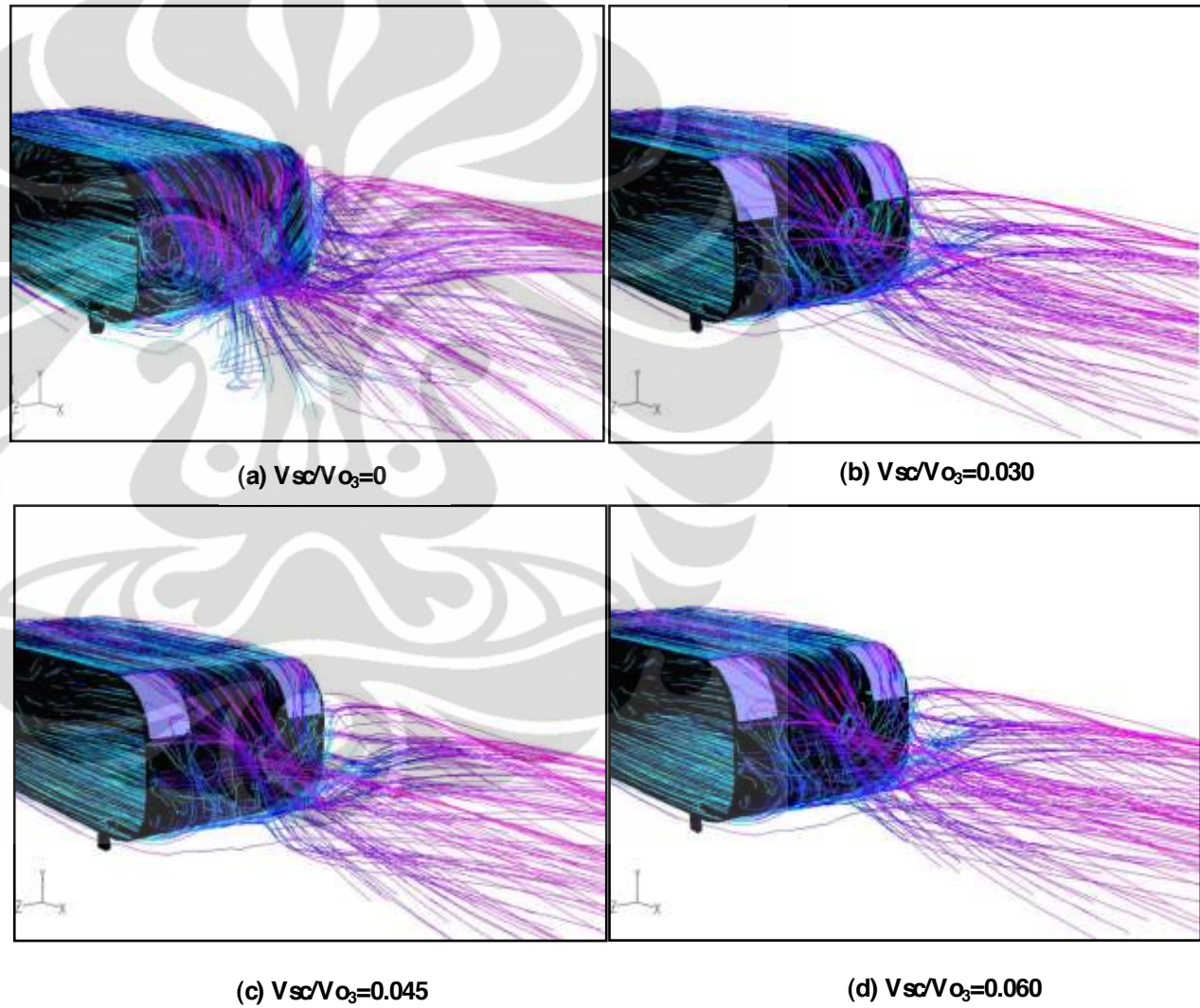
Gambar 4.3 Perbandingan *pathline* pada model uji tanpa dan dengan kontrol aliran pada $V_{o1}=11.1$ m/s



Gambar 4.4 Perbandingan *pathline* pada model uji tanpa dan dengan kontrol aliran pada $V_{o_2}=13.9$ m/s



Gambar 4.5 Perbandingan *pathline* pada model uji tanpa dan dengan kontrol aliran pada $V_{O_3}=16.7$ m/s



Pengaruh dari penempatan eksitasi aliran pada kedua sisi samping terlihat memberikan efek mengurangi daerah olakan dan *vortex* yang terbentuk. Dengan kecepatan hisapan yang semakin tinggi terlihat luasan daerah olakan semakin berkurang. Pola ini terlihat pada setiap kecepatan *upstream* yang diujikan.

4.1.2 Distribusi Tekanan

Nilai dari tekanan statik pada tiap grid dinyatakan dengan koefisien tekanan statik. Untuk menyatakan secara kuantitatif besaran nilai ini, distribusi tekanan dinyatakan dalam plot grafik yang didasarkan atas tabel distribusi tekanan (lampiran 2). Dalam kajian ini, pembahasan distribusi tekanan difokuskan pada sisi belakang model uji untuk melihat pengaruh dari penambahan modus kontrol aktif aliran.

Untuk menyatakan nilai kuantitatif ini ke dalam plot grafik serta memudahkan dalam menganalisa, sisi belakang model uji dibagi ke dalam 13 kolom (dinyatakan oleh z/w) dan 15 baris (dinyatakan oleh y/h) sesuai dengan posisi grid, dimana acuan perhitungan nomor baris dimulai dari bawah, dan acuan perhitungan nomor kolom dimulai dari tengah (acuan ini sesuai dengan pernyataan titik pusat koordinat pada gambar 3.4). Konfigurasi ini juga digunakan dalam analisa pola intensitas turbulensi untuk model uji tanpa kontrol aliran pada subbab berikutnya.

4.1.2.1 Tanpa Kontrol Aliran

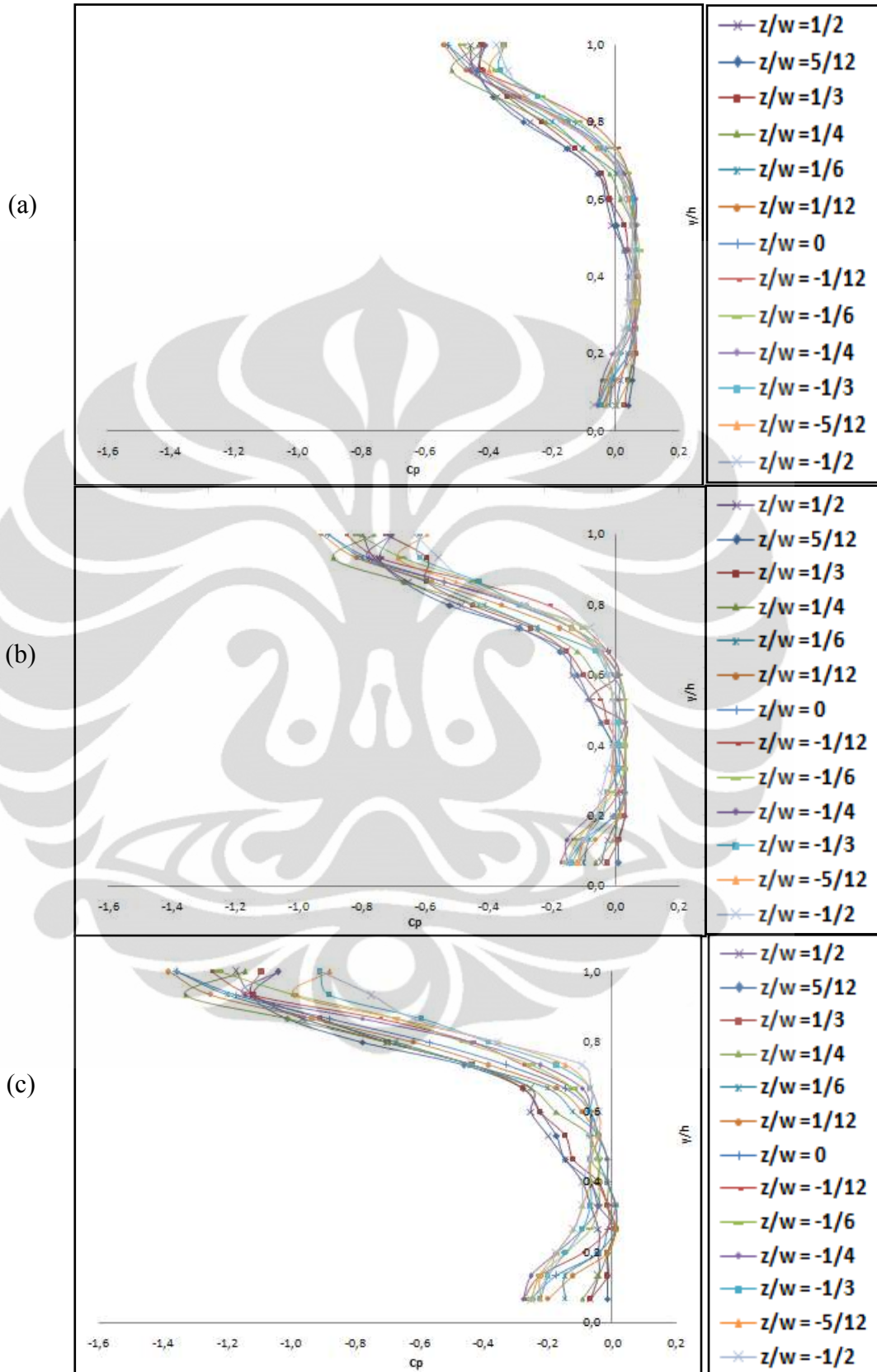
Dari gambar 4.6 yang ditampilkan berikut, nilai-nilai puncak koefisien tekanan untuk tiap kecepatan *upstream* dapat diringkas pada tabel dibawah.

Tabel 4.1 Nilai minimum dan maksimum koefisien tekanan statik pada sisi belakang model uji tanpa kontrol aliran

No	Vo(m/s)	Cp minimum	Posisi		Cp maksimum
			z/w	y/h	
1	11.1	-0,5384	1/12	1	0,0765
2	13.9	-0,9256	1/12	1	0,0294
3	16.7	-1,3819	1/12	1	0,013

Untuk kecepatan *upstream* yang meningkat, nilai dari C_p minimum semakin kecil. Nilai ini terletak pada lokasi yang sama, yaitu $z/w=1/12$, dan $y/h=1$ yang merupakan tepi atas dari sisi belakang model uji. Hal ini bersesuaian dengan kontur penuh dari besaran kecepatan pada gambar 4.2, daerah pada tepi atas dari sisi belakang model uji merupakan region dengan kecepatan aliran tinggi, sehingga memiliki nilai tekanan statik yang rendah.





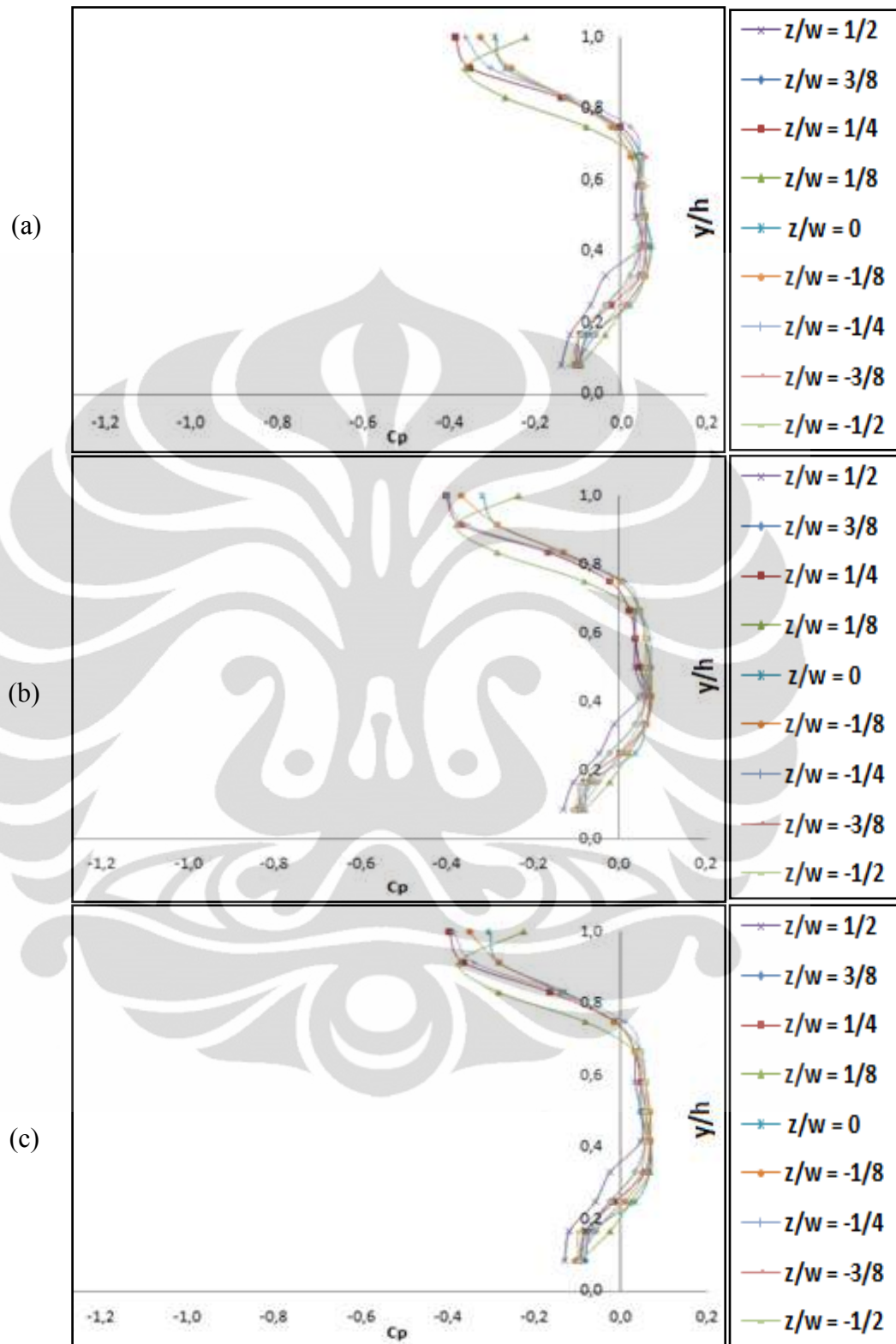
Gambar 4.6 Disitribusi tekanan dalam C_p pada sisi belakang model uji tanpa kontrol aliran

(a. $V_{o1}=11.1$ m/s ; b. $V_{o2}=13.9$ m/s ; c. $V_{o3}=16.7$ m/s)

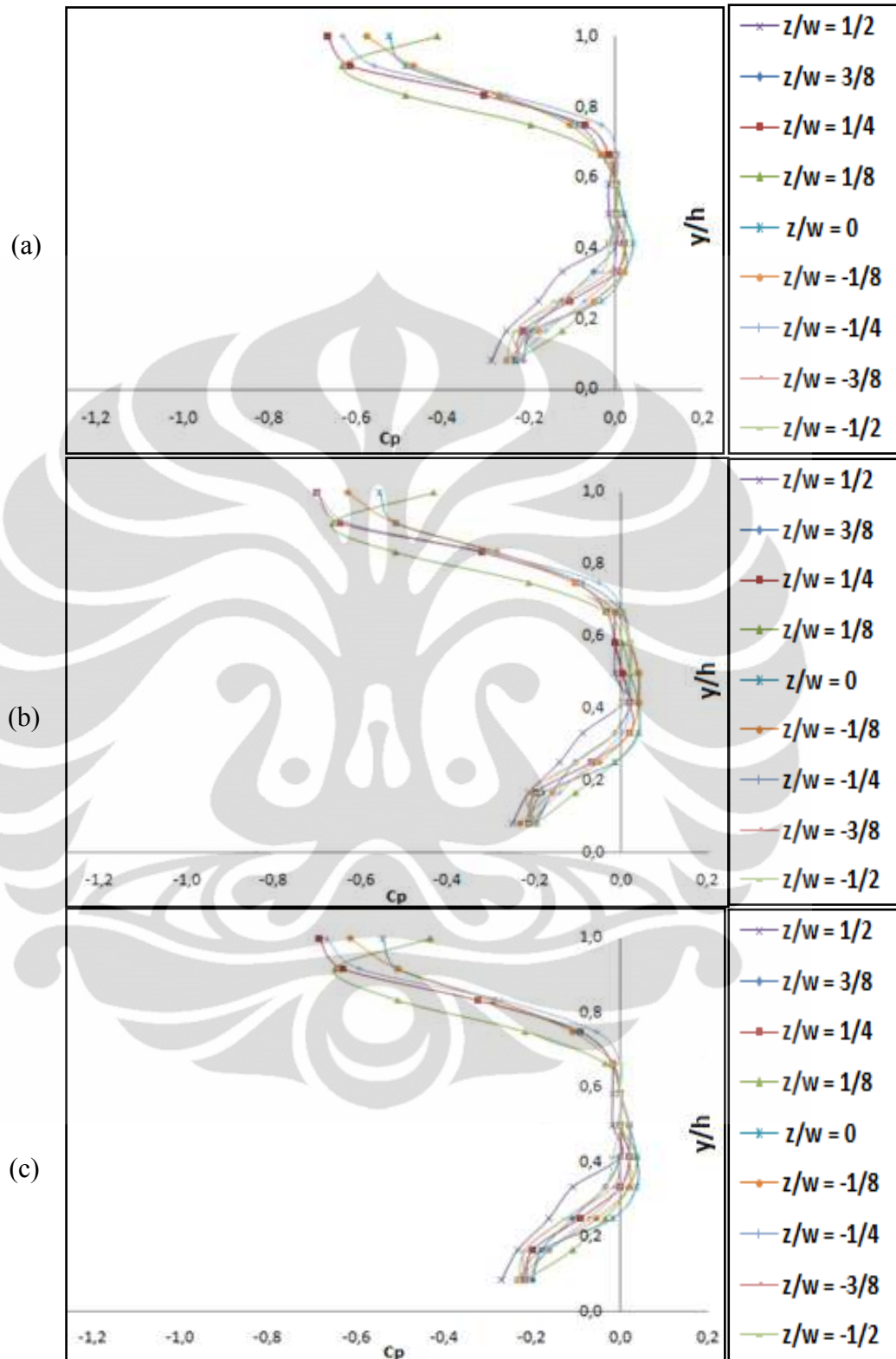
Selain nilai C_p minimum, hal yang sama ditunjukkan oleh nilai C_p maksimum untuk tiap kecepatan *upstream*. Untuk C_p maksimum, terjadi tren penurunan nilai sesuai dengan peningkatan kecepatan *upstream*. Nilai C_p maksimum ini berada pada daerah bawah sisi belakang model uji ($0.2 < y/h < 0.6$). Nilai C_p maksimum berkaitan dengan daerah olakan yang terbentuk pada *downstream*.

4.1.2.2 Pengaruh Kontrol Aliran

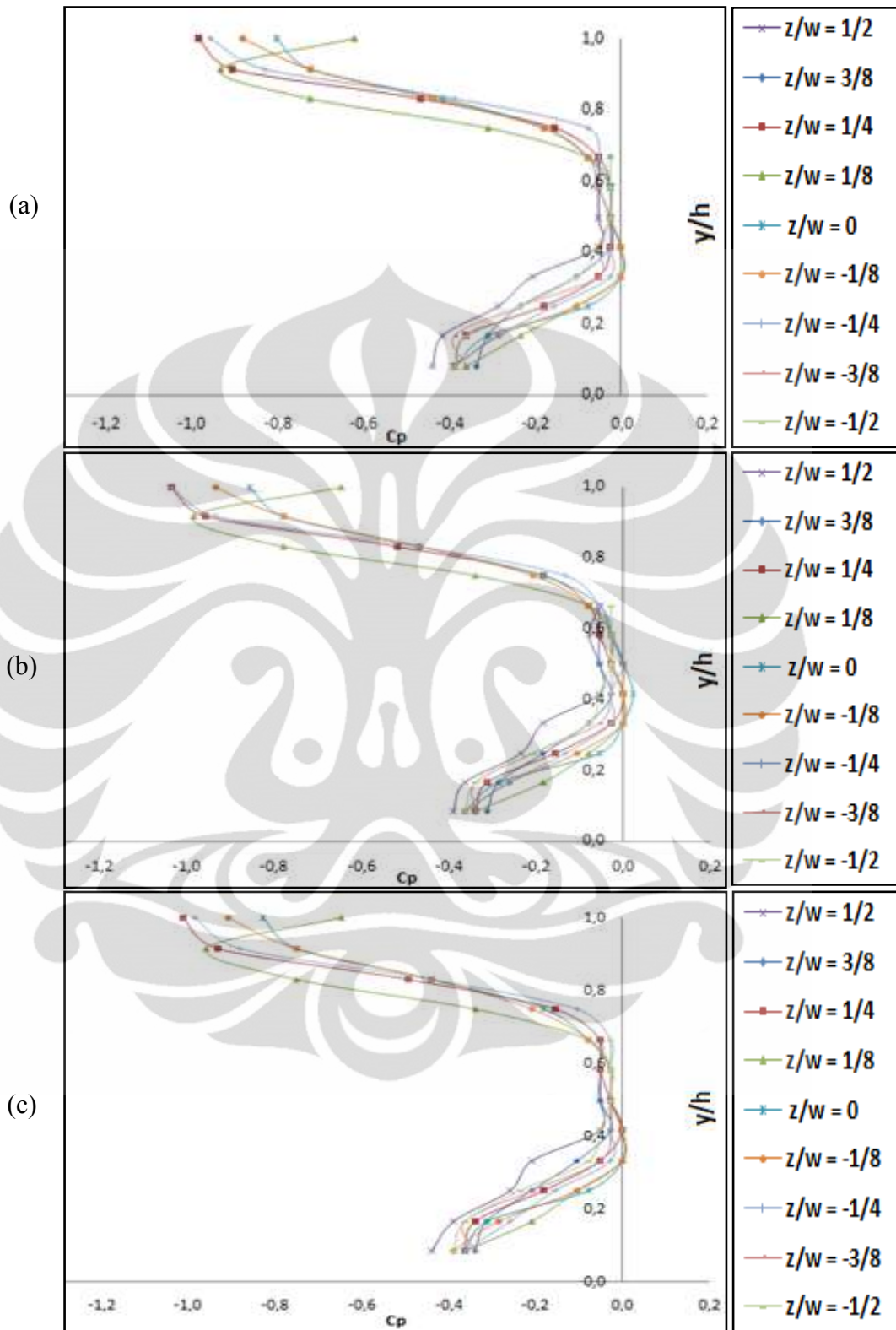
Karena memiliki perbedaan dengan pola grid dengan model uji tanpa kontrol aliran, untuk menggambarkan distribusi tekanan statik pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran, bidang tinjauan dibagi ke dalam 9 kolom dan 12 baris sesuai dengan posisi grid yang bersesuaian sehingga pada gambar 4.7, 4.8, dan 4.9 tampak bahwa garis grafik tidak sepadat pada gambar 4.6. Konfigurasi ini juga digunakan dalam analisa pola intensitas turbulensi untuk model uji dengan kontrol aliran pada subbab berikutnya.



Gambar 4.7 Distribusi tekanan dalam C_p pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o1} = 11.1$ m/s (a. $V_{sc}/V_{o1} = 0.045$; b. $V_{sc}/V_{o1} = 0.068$; c. $V_{sc}/V_{o1} = 0.09$)



Gambar 4.8 Distribusi tekanan dalam C_p pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{O_2}=13.9$ m/s (a. $V_{sc}/V_{O_2}=0.036$; b. $V_{sc}/V_{O_2}=0.054$; c. $V_{sc}/V_{O_2}=0.072$)



Gambar 4.9 Distribusi tekanan dalam C_p pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{O_3}=16.7$ m/s (a. $V_{sc}/V_{O_3}=0.030$; c. $V_{sc}/V_{O_3}=0.045$; d. $V_{sc}/V_{O_3}=0.060$)

Nilai-nilai puncak dari plot grafik distribusi tekanan pada gambar 4.7, 4.8, dan 4.9 dapat diringkas pada tabel 4.2 .

Tabel 4.2 Nilai minimum dan maksimum koefisien tekanan statik pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran

No	Kecepatan upstream, V_o (m/s)	Kecepatan Hisapan, V_{sc} (m/s)	Cp minimum	Posisi		Cp maksimum
				z/w	y/h	
1	11.1	0	-0,5384	1/12	1	0,0765
2		0.5	-0,3841	1/4	1	0,0697
3		0.75	-0,3992	-1/4;1/4	1	0,0731
4		1	-0,3957	1/4	1	0,0697
5	13.9	0	-0,9256	1/12	1	0,0294
6		0.5	-0,6654	1/4	1	0,0387
7		0.75	-0,7016	1/4;-1/4	1	0,0381
8		1	-0,6834	1/4	1	0,0384
9	16.7	0	-1,3819	1/12	1	0,0130
10		0.5	-0,9836	1/4	1	0,0000
11		0.75	-1,0350	-1/4;1/4	1	0,0253
12		1	-1,0097	1/4	1	-0,0004

Dari tabel 4.2 terlihat bahwa efek dari penambahan kontrol aliran adalah meningkatnya koefisien tekanan statik pada sisi belakang model uji. Hal ini ditunjukkan terutama oleh nilai koefisien tekanan statik minimum. Untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s peningkatan nilai koefisien tekanan statik terbesar terjadi pada eksitasi hisapan dengan kecepatan 0.5 m/s, yaitu sebesar 28.7%. Sedangkan untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s, nilai masing-masing adalah 28% dan 28.8% yang terjadi pada eksitasi dengan kecepatan hisapan 0.5 m/s.

4.2 Intensitas Turbulensi (IT)

Pada daerah *downstream* yang ditunjukkan oleh medan aliran dalam bahasan sebelumnya terlihat adanya suatu struktur olakan yang terjadi. Untuk menyatakan secara kuantitatif besaran dari struktur olakan ini digunakan parameter intensitas turbulensi yang merupakan gambaran turbulensi yang terjadi dalam aliran dengan mengambil parameter variasi data kecepatan yang terukur pada suatu titik tinjauan.

Intensitas turbulensi yang dikaji merupakan besaran yang terdapat pada sisi belakang model uji. Nilai intensitas turbulensi diperoleh sesuai dengan letak titik-titik pada grid yang bersesuaian.

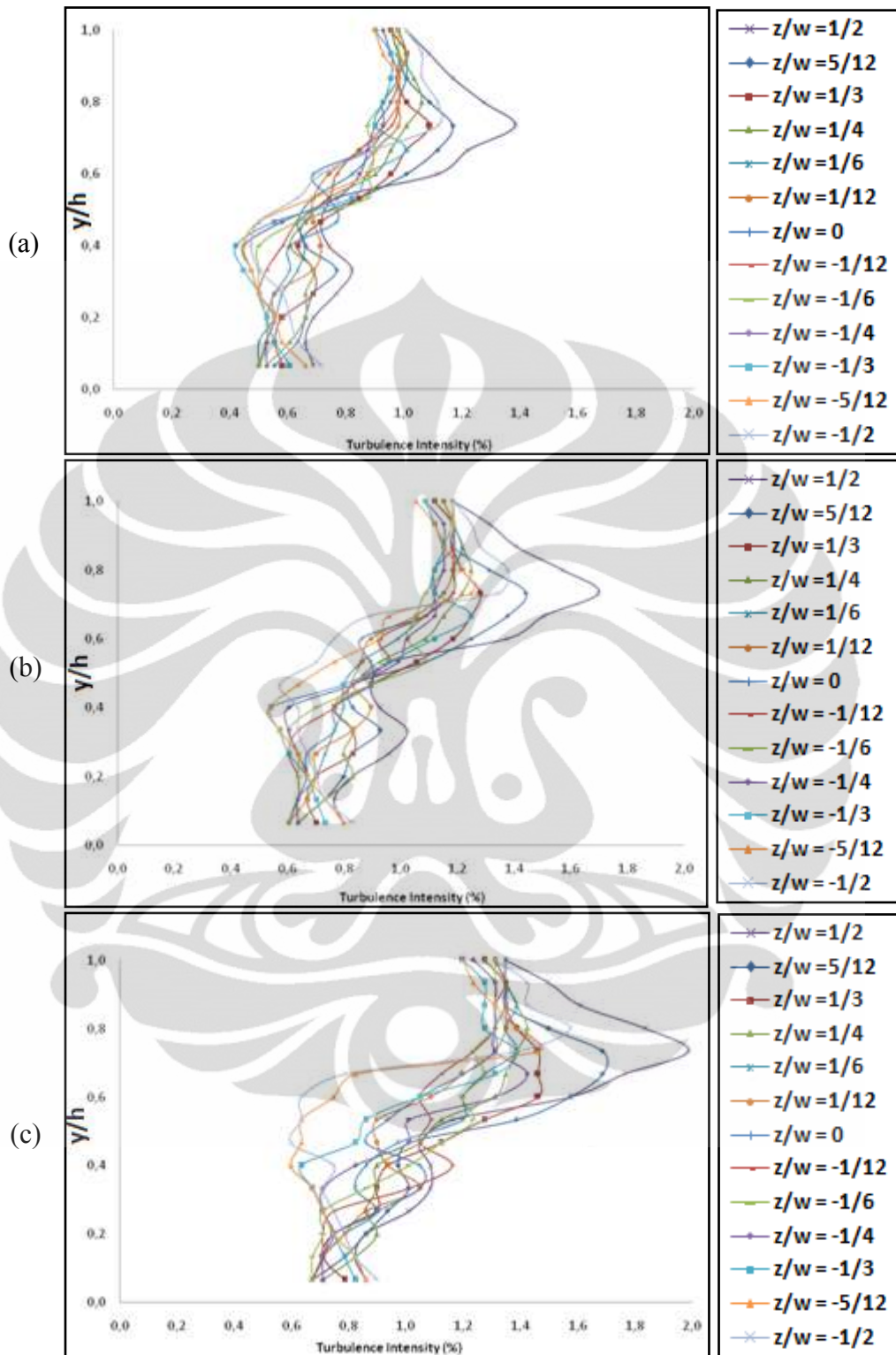
4.2.1 Tanpa Kontrol Aliran

Dari analisa intensitas turbulensi yang ditampilkan dalam plot pada gambar 4.10 berikut dapat diringkas nilai puncak intensitas turbulensi dalam tabel 4.3. Terlihat bahwa untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, nilai intensitas turbulensi tertinggi adalah 1.38% yang terletak pada titik $z/w = 1/2$ dan $y/h = 0.73$. Sedangkan untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s nilai intensitas tertinggi masing-masing adalah 1.7% dan 1.99% dan terletak pada titik yang sama seperti pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s.

Tabel 4.3 Nilai intensitas turbulensi maksimum untuk pada model uji tanpa kontrol aliran untuk tiap kecepatan *upstream* yang berbeda.

No	Vo (m/s)	IT (%) maksimum	Posisi	
			z/w	y/h
1	11.1	1,3830446	1/2	0.73
2	13.9	1,6992088	1/2	0.73
3	16.7	1,9871199	1/2	0.73

Nilai puncak dari intensitas turbulensi ini meningkat sesuai dengan meningkatnya kecepatan *upstream* pada model uji. Hal ini berhubungan dengan struktur pusaran yang terjadi seperti yang dapat dilihat dan dibandingkan pada gambar 4.1, dimana pusaran yang terjadi menguat sesuai dengan kenaikan kecepatan *upstream*.



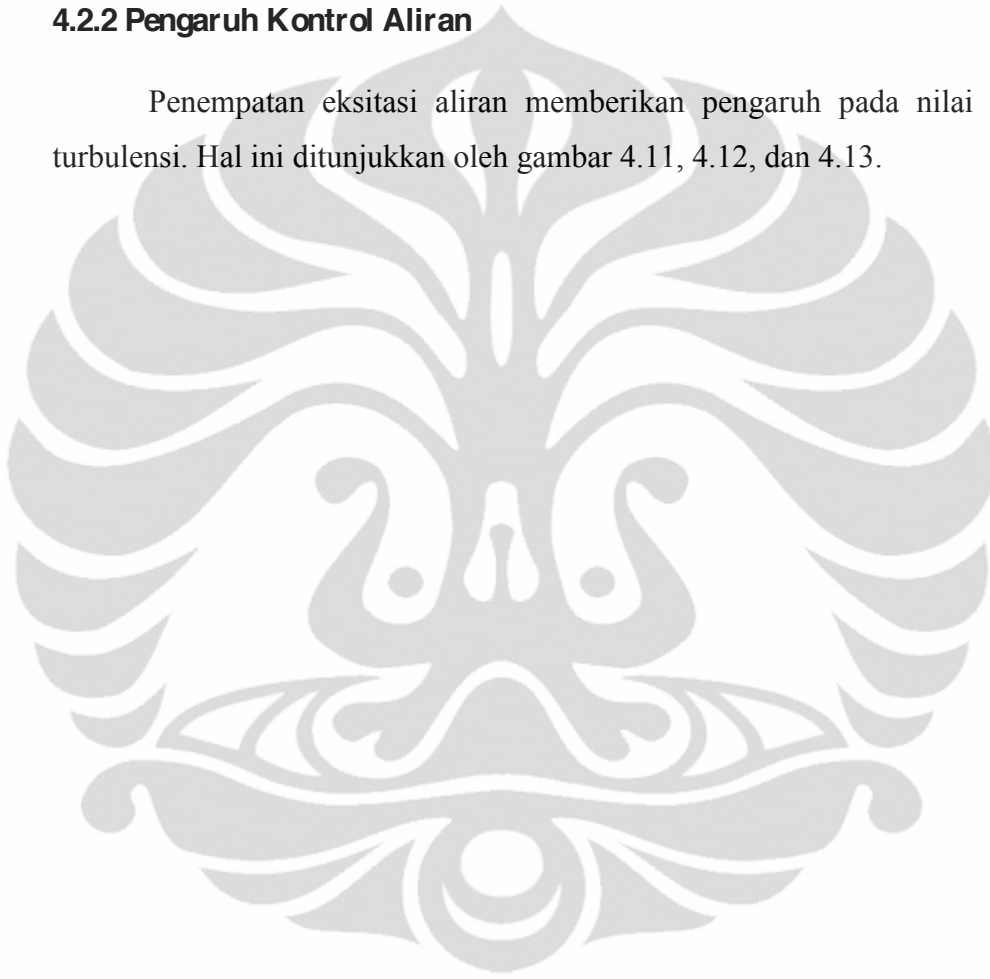
Gambar 4.10 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji tanpa kontrol aliran

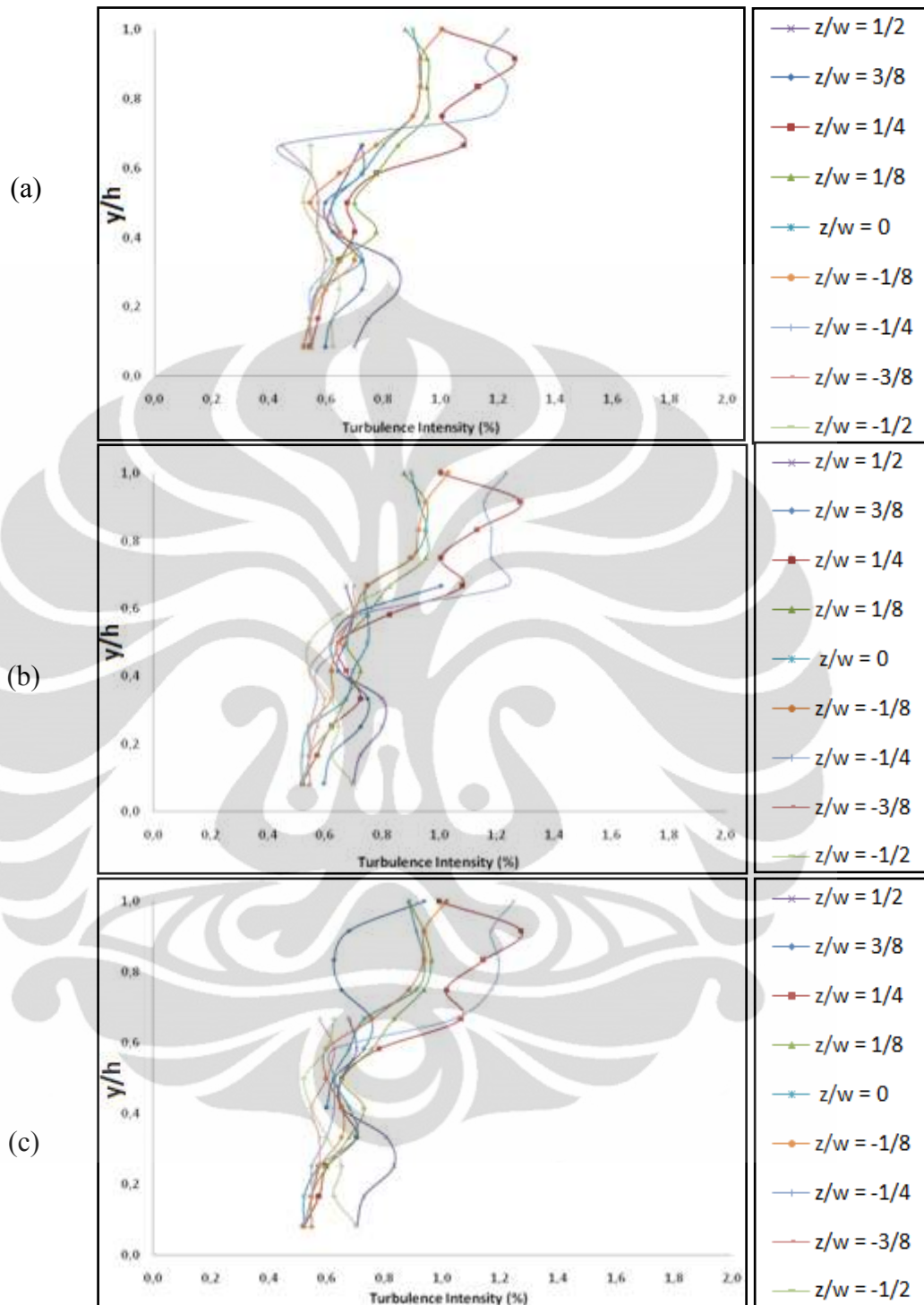
(a. $V_{01}=11.1$ m/s ; b. $V_{02}=13.9$ m/s ; c. $V_{03}=16.7$ m/s)

Letak titik dimana nilai intensitas turbulensi tertinggi untuk ketiga kecepatan *upstream* ini berkaitan dengan adanya struktur pusaran pada permukaan belakang model uji. Hal ini sesuai dengan pathline aliran yang ditunjukkan oleh gambar 4.3 – 4.5 bagian (a) dimana titik dengan nilai intensitas turbulensi tinggi berada di daerah pusat *vortex* longitudinal.

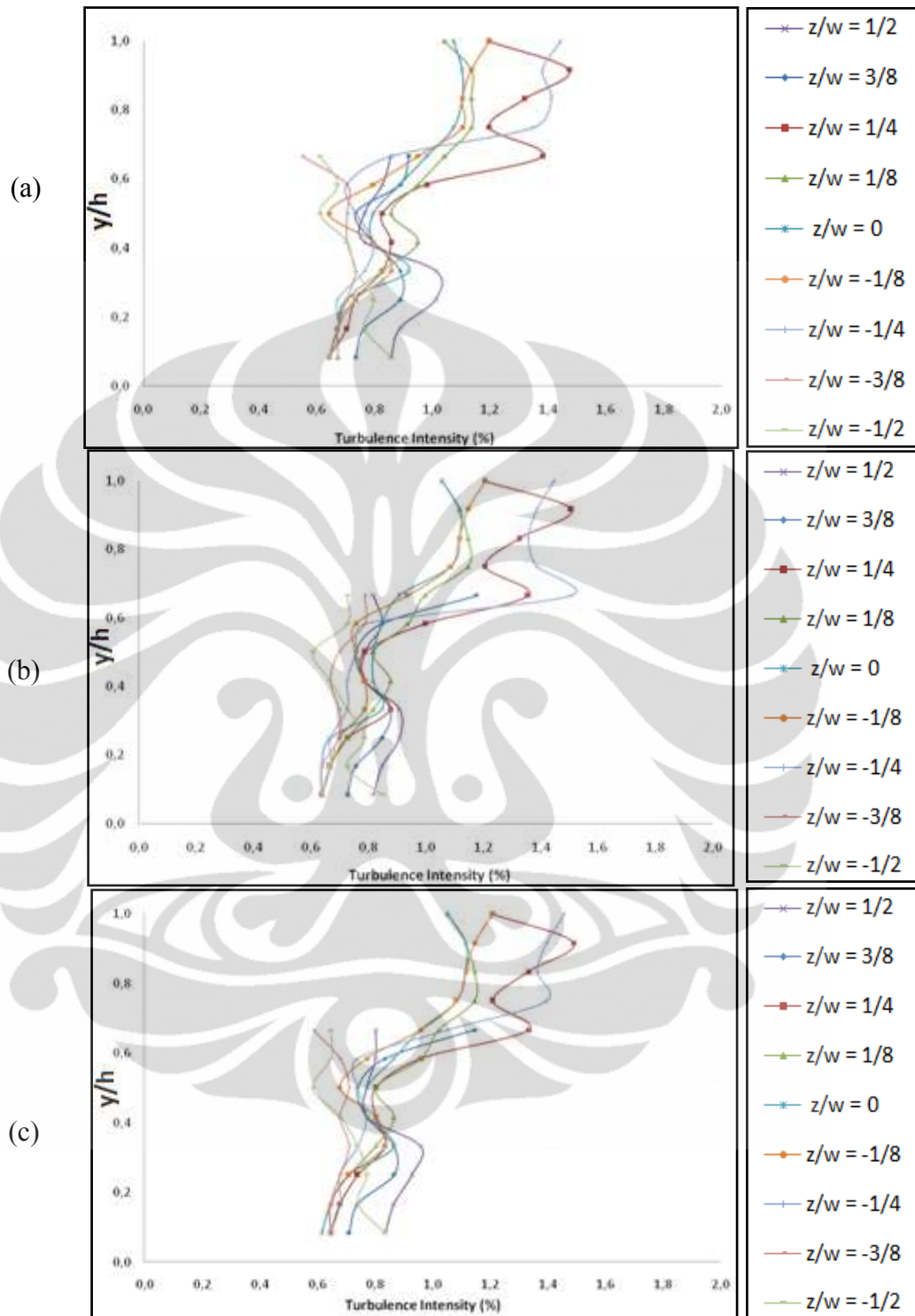
4.2.2 Pengaruh Kontrol Aliran

Penempatan eksitasi aliran memberikan pengaruh pada nilai intensitas turbulensi. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 4.11, 4.12, dan 4.13.

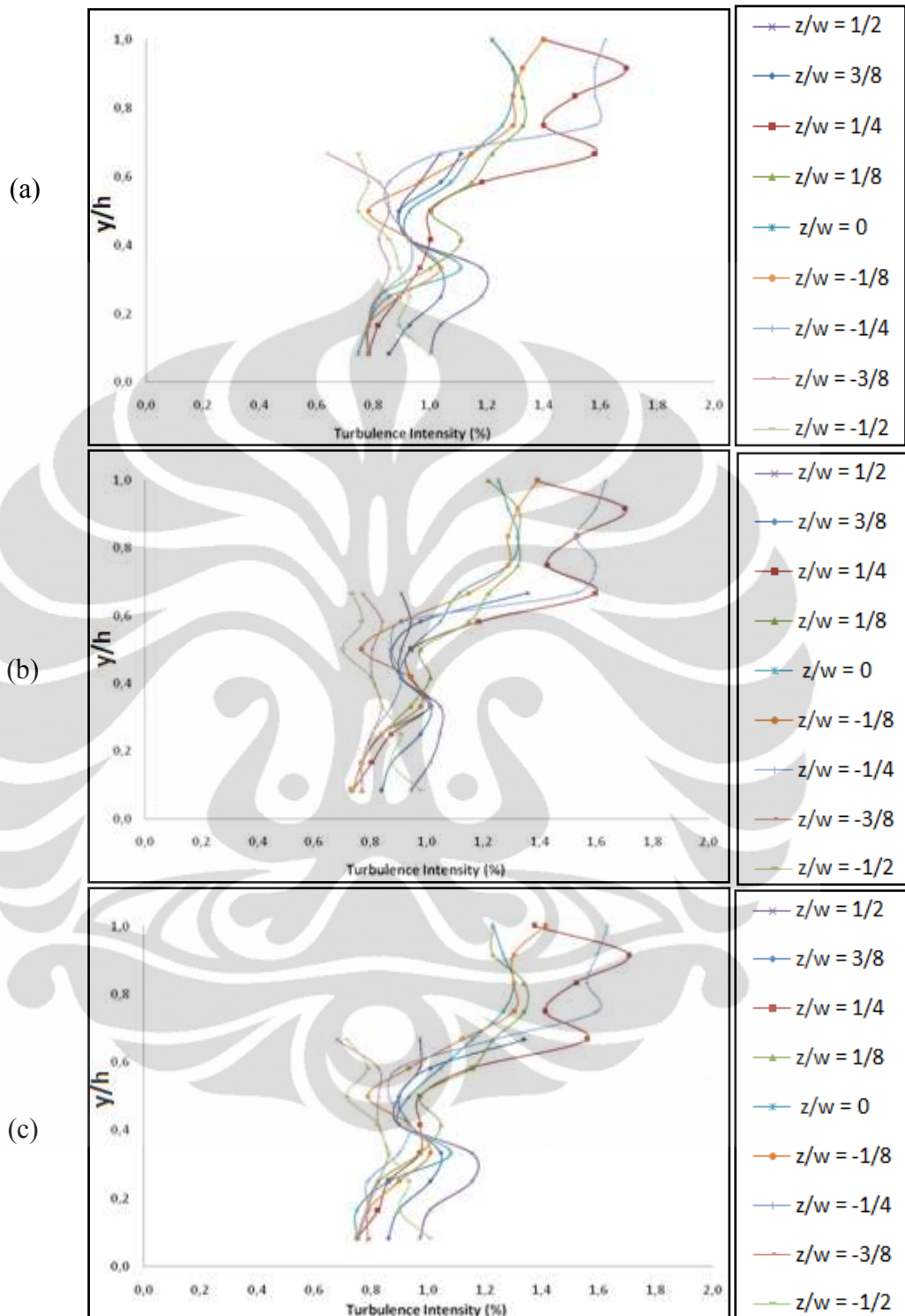




Gambar 4.11 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{o1} = 11.1$ m/s (a. $V_{sc}/V_{o1} = 0.045$; b. $V_{sc}/V_{o1} = 0.068$; c. $V_{sc}/V_{o1} = 0.09$)



Gambar 4.12 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{O_2}=13.9$ m/s (a. $V_{sc}/V_{O_2}=0.036$; b. $V_{sc}/V_{O_2}=0.054$; c. $V_{sc}/V_{O_2}=0.072$)



Gambar 4.13 Intensitas turbulensi dalam % pada sisi belakang model uji dengan kontrol aliran untuk $V_{O_3}=16.7$ m/s (a. $V_{sc}/V_{O_3}=0.030$; c. $V_{sc}/V_{O_3}=0.045$; d. $V_{sc}/V_{O_3}=0.060$)

Sebagai ringkasan dari plot grafik pada gambar 4.11, 4.12, 4.13 tersebut, nilai-nilai maksimum dari intensitas turbulensi diringkas pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai maksimum intensitas turbulensi pada model uji dengan kontrol aliran untuk tiap kecepatan *upstream* yang berbeda

No	Kecepatan upstream, V_o (m/s)	Kecepatan Hisapan, V_{sc} (m/s)	IT (%) Maksimum	Posisi	
				z/w	y/h
1	11.1	0	1,3830	1/2	0.73
2		0.5	1,2573	1/4	0.92
3		0.75	1,2829	1/4	0.92
4		1	1,2724	1/4	0.92
5	13.9	0	1,6992	1/2	0.73
6		0.5	1,4720	1/4	0.92
7		0.75	1,5058	1/4	0.92
8		1	1,4901	1/4	0.92
9	16.7	0	1,9871	1/2	0.73
10		0.5	1,6902	1/4	0.92
11		0.75	1,7021	1/4	0.92
12		1	1,7040	1/4	0.92

Untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, pengurangan intensitas turbulensi maksimum terjadi untuk kecepatan hisapan 0.5 m/s, yaitu sebesar 9%. Hal lain yang dapat diamati adalah terjadi perpindahan titik dimana nilai intensitas turbulensi tertinggi terjadi karena pengaruh kontrol aliran. Untuk setiap pengaruh kontrol aliran hisapan, nilai intensitas turbulensi tertinggi berpindah dari $z/w = 6/12$ dan $y/h = 11/15$ menuju $z/w = 3/12$ dan $y/h = 14/15$. Jika dilihat dari *pathline* pada gambar 4.3 hingga 4.5, ini berhubungan dengan berubahnya struktur olakan pada sisi belakang.

Untuk kecepatan upstream 13.9 m/s dan 16.7 m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi maksimum masing-masing adalah 13.4% dan 14.9% yang terjadi pada kecepatan hisapan 0.5 m/s.

4.3 Gaya *Drag* Aerodinamika

Untuk melihat pengaruh dari peningkatan kecepatan *upstream* dan penambahan kontrol aliran pada gaya *drag* aerodinamika digunakan parameter C_d , sesuai dengan rumusan (1).

Jika kerapatan udara $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ dianggap konstan pada temperatur ruangan $T = 15^\circ\text{C}$. Luas karakteristik A atau luas proyeksi bagian depan model = 0.003906534 m^2 , maka dapat dilakukan perhitungan nilai C_d . Sebagai contoh perhitungan diambil data total gaya *drag* (N) dari metode komputasi pada kecepatan *upstream* $U_o = 11.1 \text{ m/s}$ tanpa kontrol aktif aliran yaitu 0.542 N . Sehingga koefisien *drag* tersebut adalah :

$$C_D = \frac{2D}{\rho U_o^2 A}$$

$$C_D = \frac{2 \cdot 0.542}{1.225 (11.1^2) 0.00390654}$$

$$C_D = 1.838$$

Hasil perhitungan berikutnya dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan 4.6.

4.3.1 Metode CFD

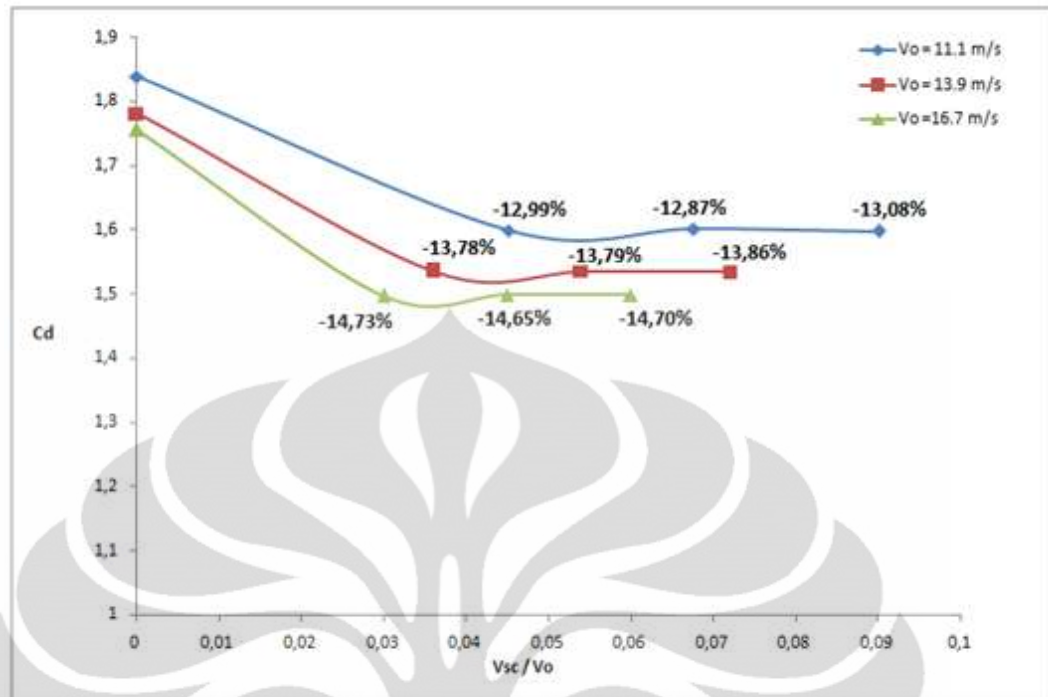
Data yang disajikan pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa terdapat pengaruh dari penambahan kontrol aliran pada nilai koefisien *drag* rata-rata. Selain itu, hal yang dapat diamati adalah terjadinya peningkatan gaya *drag* sesuai dengan peningkatan kecepatan *upstream* aliran. Untuk model uji tanpa kontrol aliran gaya *drag* terbesar terjadi pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s yaitu 1.1717 N atau $C_d = 1.756$. Hal ini sejalan dengan gambar *pathline* dan kontur kecepatan penuh. Terdapat tekanan yang lebih tinggi pada titik stagnasi di ujung depan dan tekanan yang lebih rendah di sisi belakang (C_p minimum adalah -1.3819) pada model uji dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s .

Tabel 4.5 Data gaya *drag* aerodinamika dengan metode komputasi

Data CFD						
No	Kecepatan upstream, V_o (m/s)	Kecepatan Hisapan, V_{sc} (m/s)	Perbandingan Kecepatan (V_{sc}/V_o)	Total Gaya Drag (N)	Cd	Pengurangan Gaya Drag %
1	11,1	0	0	0,5419	1,838	0
2		0,5	0,045	0,4715	1,599	12,999
3		0,75	0,068	0,4721	1,602	12,871
4		1	0,090	0,4710	1,598	13,076
5	13,9	0	0	0,8234	1,781	0
6		0,5	0,036	0,7100	1,536	13,781
7		0,75	0,054	0,7099	1,536	13,791
8		1	0,072	0,7093	1,534	13,860
9	16,7	0	0	1,1717	1,756	0
10		0,5	0,03	0,9991	1,497	14,731
11		0,75	0,045	1,0001	1,499	14,646
12		1	0,06	0,9994	1,498	14,700

Pada kecepatan upsteam 11.1 m/s, eksitasi diberikan dengan kenaikan 0.022 V_{sc}/V_o , dan pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan hisapan 1 m/s atau $V_{sc}/V_o=0.090$ yaitu 13.076%. Pada kecepatan upsteam 13.9 m/s, eksitasi diberikan dengan kenaikan 0.018 V_{sc}/V_o , dan pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan hisapan 1 m/s atau $V_{sc}/V_o=0.072$ yaitu 13.86%. Pada kecepatan upsteam 16.7 m/s, eksitasi diberikan dengan kenaikan 0.015 V_{sc}/V_o , dan pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan hisapan 0.5 m/s atau $V_{sc}/V_o=0.030$ yaitu 14.73%. Nilai-nilai ini tampak lebih jelas dalam plot grafik Cd terhadap V_{sc}/V_o pada gambar 4.14.

Dari gambar 4.14 pola umum penurunan *drag* yang ditunjukkan adalah penurunan prosentasi pengurangan *drag* dari kecepatan hisapan 0.5 m/s ke 0.75 m/s, dan kenaikan prosentase pengurangan *drag* dari kecepatan hisapan 0.75 m/s ke 1 m/s. Terdapat pengecualian pada pola ini yaitu pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s, namun perbedaan tersebut sangat kecil. Dengan kenaikan kecepatan hisapan kurang dari sama dengan 0.022 V_{sc}/V_o , peningkatan prosentase pengurangan *drag* kurang dari 0.3%, sehingga tidak memberikan dampak yang signifikan. Pola dari grafik Cd terhadap V_{sc}/V_o pada gambar 4.14 menunjukkan bahwa masih terdapat kemungkinan untuk meningkatkan prosentase pengurangan *drag* dengan menaikkan kecepatan hisapan untuk konfigurasi eksitasi aliran yang sama.

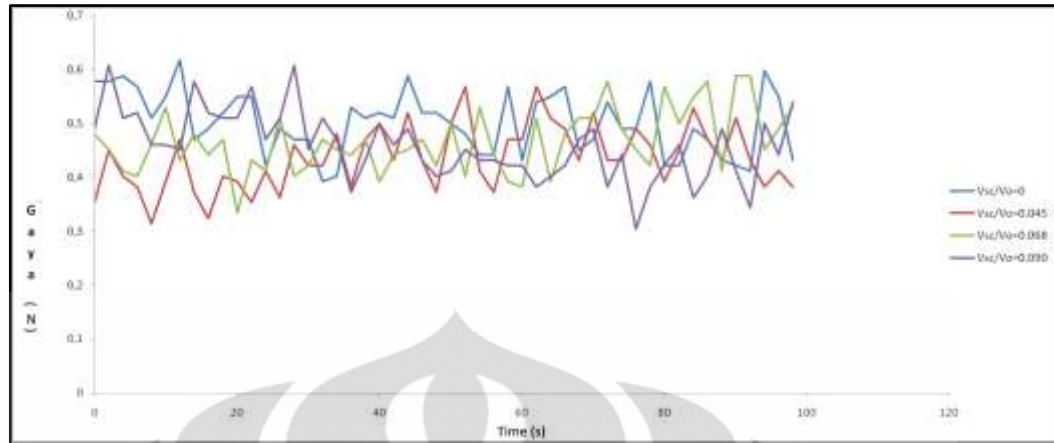
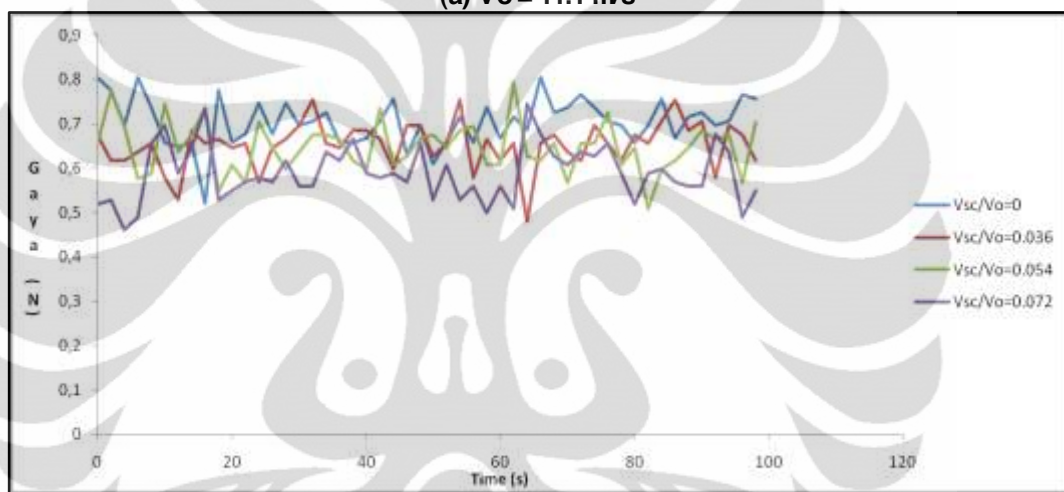
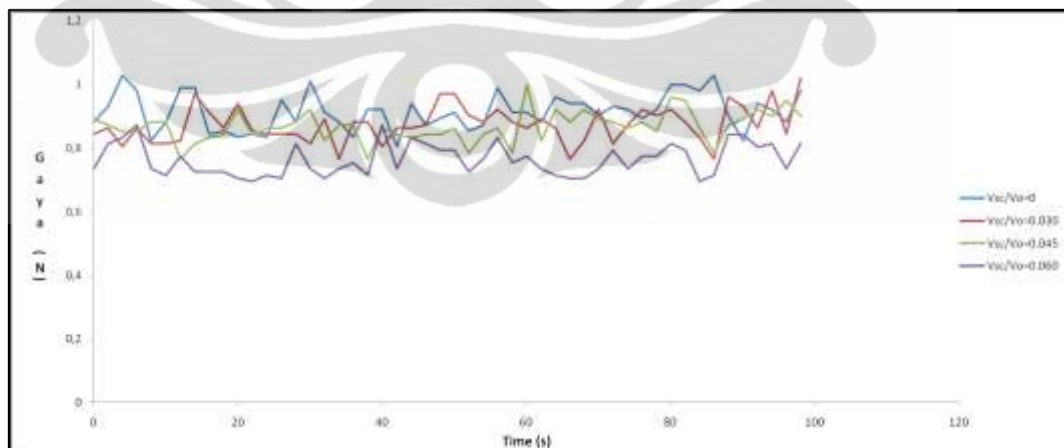


Gambar 4.14 Perbandingan koefisien *drag* terhadap kecepatan *suction* dengan metode CFD

4.3.2 Metode Eksperimen

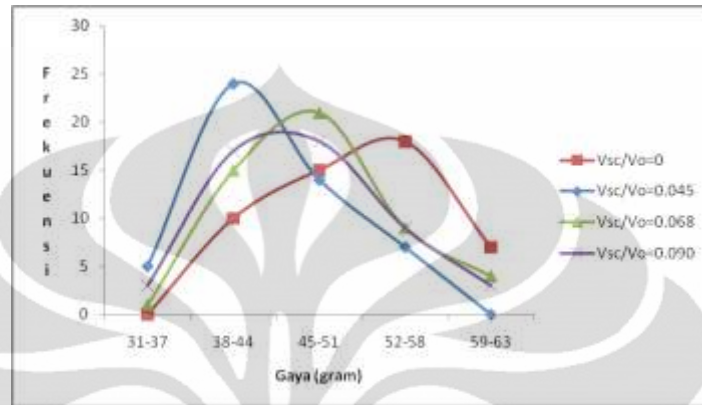
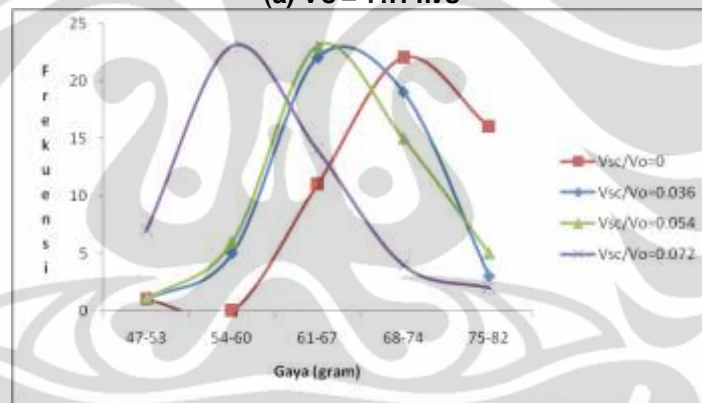
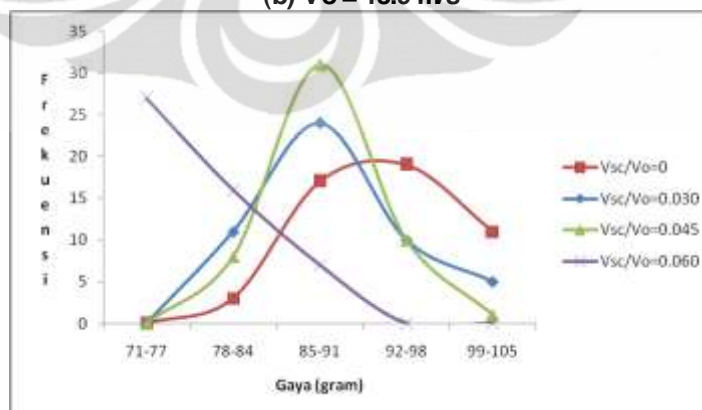
Untuk mendapatkan validasi penyelesaian komputasi numerik yang telah diperoleh maka diperlukan data eksperimen. Dalam konteks ini allowance error diberikan hingga 20% karena keterbatasan dalam peralatan penunjang eksperimen.

Data gaya *drag* yang diambil adalah sebanyak 50 buah untuk setiap variasi eksperimen, dengan interval waktu pengambilan data adalah 100 detik. Data yang diperoleh memiliki satuan gram yang dapat dikonversikan ke dalam Newton. Data yang diperoleh memiliki fluktuasi, seperti ditunjukkan oleh gambar 4.15.

(a) $V_o = 11.1 \text{ m/s}$ (b) $V_o = 13.9 \text{ m/s}$ (c) $V_o = 16.7 \text{ m/s}$

Gambar 4.15 Fluktuasi data *drag* eksperimen dengan variasi kecepatan *upstream* terhadap waktu

Jika data besaran gaya yang berfluktuasi tersebut dikelompokkan dalam suatu kelas interval dan disajikan dalam kurva distribusi, maka pengaruh dari penambahan kontrol aktif dapat terlihat, yaitu berpindahnya puncak kurva distribusi ke arah negatif pada sumbu x, seperti terlihat pada gambar 4.16 berikut.

(a) $V_o = 11.1 \text{ m/s}$ (b) $V_o = 13.9 \text{ m/s}$ (c) $V_o = 16.7 \text{ m/s}$

Gambar 4.16 Kurva distribusi gaya terhadap frekuensi untuk setiap kecepatan usptream dengan variasi kecepatan hisapan

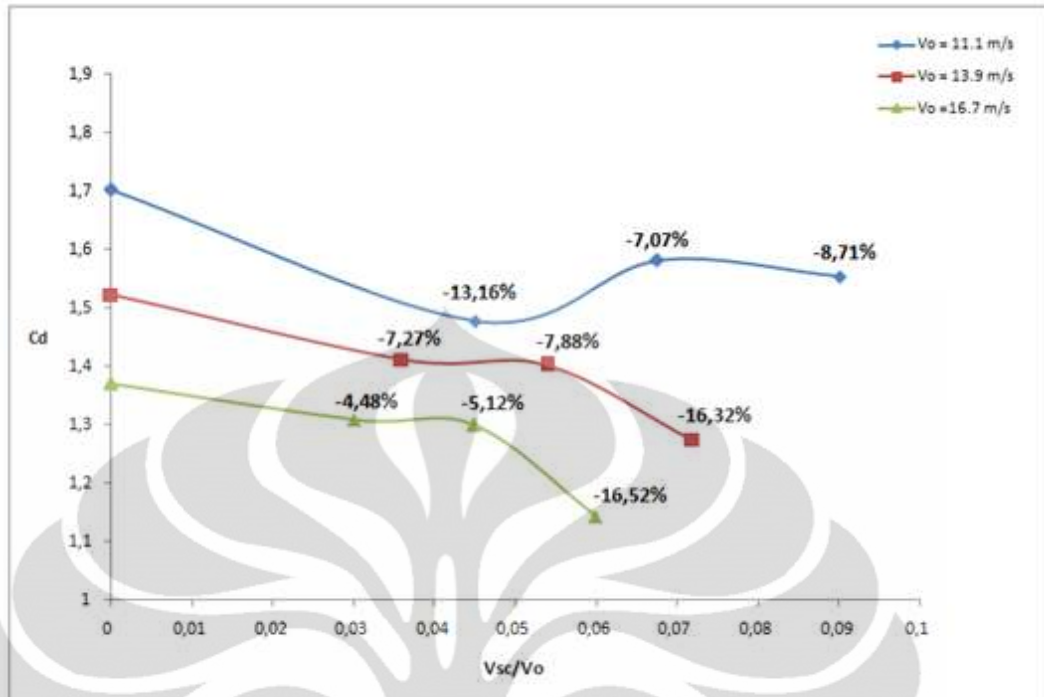
Untuk mengolah data tersebut, diambil nilai rata-rata untuk perhitungan gaya *drag*. Data yang diperoleh diringkas dalam tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data *drag* aerodinamika pada eksperimen

Data Eksperimen							
No	Kecepatan upstream, V_o (m/s)	Kecepatan Hisapan, V_{sc} (m/s)	Perbandingan Kecepatan (V_{sc}/V_o)	Total Gaya Drag Rata-Rata (N)	Standar Deviasi	Cd	Pengurangan Gaya Drag %
1	11,1	0	0	0,502	0,059	1,702	0
2		0,5	0,045	0,436	0,059	1,478	13,164
3		0,75	0,068	0,466	0,059	1,582	7,070
4		1	0,090	0,458	0,064	1,554	8,711
5	13,9	0	0	0,704	0,054	1,522	0
6		0,5	0,036	0,653	0,054	1,412	7,268
7		0,75	0,054	0,648	0,058	1,402	7,881
8		1	0,072	0,589	0,063	1,274	16,319
9	16,7	0	0	0,915	0,058	1,370	0
10		0,5	0,03	0,874	0,057	1,309	4,479
11		0,75	0,045	0,868	0,049	1,300	5,122
12		1	0,06	0,763	0,050	1,144	16,524

Jika dibandingkan dengan solusi yang dihasilkan dari komputasi numerik, nilai rata-rata error adalah 11.4 %, sehingga memberikan validasi yang cukup untuk solusi komputasi numerik.

Data tabel 4.6 memberikan tampilan plot grafik seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.17. Plot grafik data eksperimen menunjukkan pola yang sama dengan plot grafik data cfd pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s. Pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s pola yang ditunjukkan adalah terjadi penurunan prosentase pengurangan *drag* dari kecepatan hisapan 0.5 m/s ke 0.75 m/s, dan peningkatan prosentase pengurangan *drag* dari kecepatan hisapan 0.75 m/s ke 1 m/s. Sedangkan pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s pola yang ditunjukkan adalah terjadi penurunan prosentase pengurangan *drag* dari kecepatan hisapan 0.5 m/s ke 0.75 m/s, dan peningkatan prosentase pengurangan *drag* dari kecepatan hisapan 0.75 m/s ke 1 m/s.



Gambar 4.17 Perbandingan koefisien *drag* terhadap kecepatan *suction* dengan metode eksperimen

Prosentase pengurangan *drag* maksimum yang ditunjukkan oleh data eksperimen adalah 16.52% yaitu pada kecepatan *upstream* 60 km/jam atau 16.7 m/s, dengan kecepatan hisapan 1 m/s.

Jika dibandingkan dengan dengan hasil yang diperoleh dari CFD pola dari kurva C_d terhadap variasi kecepatan hisapan pada eksperimen menunjukkan penyimpangan, yaitu terjadinya kenaikan prosentase pengurangan *drag* secara signifikan dari kecepatan hisapan 0.75 m/s menuju 1 m/s, hal ini terutama tampak pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s, peningkatan prosentase pengurangan *drag* lebih dari 8.44 % sedangkan hasil dari metode CFD menunjukkan peningkatan prosentase pengurangan *drag* kurang dari 0.21 %.

Hal ini dikarenakan terdapat beberapa batasan dalam eksperimen yang telah dilakukan seperti ruangan pada seksi uji memiliki geometri dengan ukuran panjang, tinggi, dan lebar kurang dari yang dibutuhkan sehingga memungkinkan terjadinya pengaruh dari efek viskos aliran dekat dinding pada model uji, terdapat batang penunjang tambahan pada bagian bawah model uji yang akan mempengaruhi downstream dari aliran pada model uji, terdapat celah yang

memungkinkan terjadinya masuknya udara tambahan pada seksi uji, dan batasan lain yang memberikan pengaruh langsung atau tidak langsung selama pengambilan data eksperimen. Getaran yang dihasilkan oleh blower pada terowongan angin, dan kompressor juga turut mempengaruhi data gaya drag yang diperoleh karena alat ukur yang digunakan memiliki nilai sensitivitas yang tinggi. Batasan-batasan pada metode eksperimen ini terjadi karena pengkondisian keadaan lab yang kurang menunjang.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

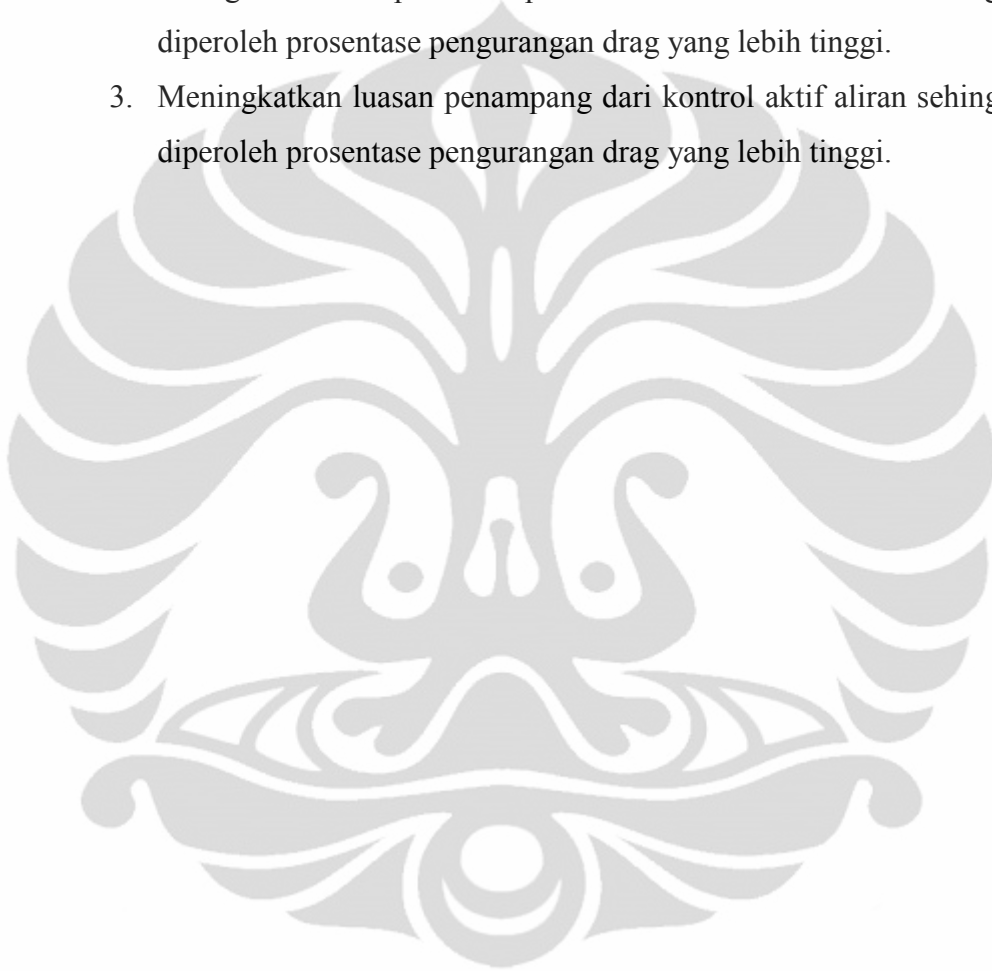
Dari kajian komputasi numerik dan eksperimental yang telah dilakukan dalam penelitian pengaruh kontrol aktif berupa hisapan terhadap drag aerodinamika dari *reversed Ahmed body* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Gaya drag aerodinamika yang ditunjukkan oleh model *reversed Ahmed Body* semakin besar jika kecepatan upstream meningkat. Untuk kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s solusi simulasi CFD menunjukkan gaya drag yang terbentuk masing-masing adalah 0.5419 N, 0.8234 N, dan 1.756 N.
2. Penambahan kontrol aktif aliran berupa hisapan kontinyu pada kedua tepi samping sisi belakang model *reversed Ahmed Body* memberikan pengaruh yang signifikan dalam pengurangan struktur pusaran daerah olakan dan drag.
3. Dengan kenaikan kecepatan hisapan 0.25 m/s untuk eksitasi aliran pada model *reversed Ahmed Body* pada kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s, 16.7 m/s prosentase pengurangan drag tertinggi diperoleh dari CFD adalah 14.7%, yaitu pada kecepatan upstream 16.7 m/s dengan kecepatan hisapan 0.5 m/s, sedangkan hasil eksperimen menunjukkan prosentase pengurangan drag tertinggi adalah 16.52% yaitu pada kecepatan upstream 16.7 m/s dengan kecepatan hisapan 1 m/s.
4. Dari 12 variasi data pengujian perbandingan kecepatan hisapan terhadap kecepatan *upstream* pada CFD, dengan kenaikan kecepatan hisapan kurang dari sama dengan $0.022 V_{sc}/V_o$, peningkatan prosentase pengurangan drag adalah kurang dari 0.3%.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan dalam penelitian ini adalah :

1. Meningkatkan akurasi dalam pengambilan data eksperimen sehingga dapat diperoleh konvergensi dengan solusi dari CFD.
2. Meningkatkan kecepatan hisapan untuk kontrol aktif aliran sehingga dapat diperoleh prosentase pengurangan drag yang lebih tinggi.
3. Meningkatkan luasan penampang dari kontrol aktif aliran sehingga dapat diperoleh prosentase pengurangan drag yang lebih tinggi.

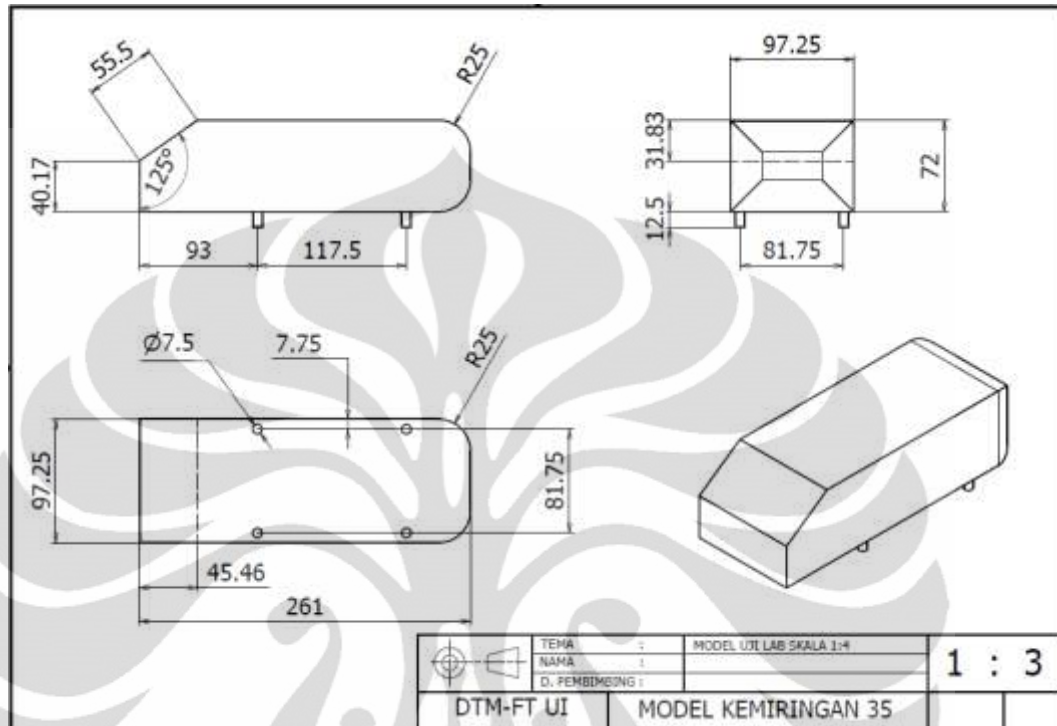


DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hucho WH. *Aerodynamic of road vehicle*. Annual Review of Fluid Mechanics 25 (1998) 485-537
- [2] Gad-El-Hak M. *Modern development in flow control*. Applied Mechanics Review 9 (1996) 365-379
- [3] Mathieu Roumeas, Patrick Gilleron, Azeddine Kourta. *Drag reduction by flow separation control on a car after body*. International Journal for Numerical Methods in Fluids 60 (2009) 1222-1240
- [4] Bourgois S, Tensi J. *Controle de l'ecoulement par autour d'un cylindre par techniques fluidique et acoustiques. 16eme Congres Francais de Mecanique*, Nice. 2003
- [5] Roumeas M, Gillieron P, Kourta A. *Reduction de trainee par controle des decollements autor d'une geometrie simplifiee: etude parametrique 2D. 17eme Congres Francais de Mecanique, 29 Aout au 02 September 2005, Troyes .2005*
- [6] Kourta A, Vitale E. *Analysis and control of cavity flow*. Physics of Fluids 20 (2005) 077-104
- [7] Duppen, Ward Van. *Thesis : Aerodynamic design of a low-drag vehicle using the interaction between Computational Fluid Dynamics and wind tunnel tests, Department of Electro-Mechanics, Leuven Engineering College. 2009*
- [8] Nakayama, Y and R.F. Boucher. *Introduction to Fluid Mechanics*. Butterworth Heinemann Inc, Oxford. 1998
- [9] Onorato M, Costeli AF, Garonne A. *Drag Measurement through wake analysis. SAE, SP-569. International Congress and Exposition, Detroit. 1984*
- [10] Bruneau C H. *Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body*. Computers & Fluids 39 (2010) 1875-1892.

- [11] Munson, B. (2002). *Mekanika Fluida* (Dr.Ir. Harinaldi & Ir. Budiarmo, M.Eng, Penerjemah). Jakarta:Erlangga.
- [12]Uruba V, Hladik O. On the Ahmed Body Wake. Colloquium FLUID DYNAMICS 2009 Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i.v Prague, October 21-23, 2009.
- [13] S. R., Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. Some salient features of nthe times-averaged ground vehicle wake. SAE Society of Automotive Eng., Inc 1 (1984) 1-31
- [14] Gilleron P., Chometon F.. Modelling of stationary three-dimensional separated air flows around an Ahmed reference model. ESAIM 7 (1999) 173-182
- [15] 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.
- [16] Jean-Luc Aider, Jean-Francois Beaudoin, and Jose Eduardo Wesfreid. Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generator. Journal of Experimental Fluids. 9 (2009) 365-379

Lampiran 1. Detail gambar model *reversed Ahmed body*



Lampiran 2. Tabel data koefisien tekanan statik hasil simulasi CFD

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=0)															
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/W = 1/2		z/W = 5/12		z/W = 1/3		z/W = 1/4		z = 1/6		z = 1/12		z /W= 0	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00	-219,29	-1,1713	-196,8999	-1,0397	-205,8557	-1,0924	-214,8115	-1,1450	-250,6347	-1,3556	-255,11	-1,3819	-250,63	-1,3556
2	0,93	-210,33	-1,1187	-210,3336	-1,1187	-210,3336	-1,1187	-246,1568	-1,3292	-223,7673	-1,1977	-232,72	-1,2503	-219,29	-1,1713
3	0,87	-183,47	-0,9608	-192,4220	-1,0134	-174,5104	-0,9081	-192,4220	-1,0134	-178,9883	-0,9345	-178,99	-0,9345	-170,03	-0,8818
4	0,80	-138,69	-0,6976	-152,1208	-0,7765	-138,6871	-0,6976	-138,6871	-0,6976	-134,2092	-0,6713	-125,25	-0,6186	-116,30	-0,5660
5	0,73	-93,91	-0,4344	-98,3860	-0,4607	-93,9081	-0,4344	-93,9081	-0,4344	-93,9081	-0,4344	-84,95	-0,3818	-76,00	-0,3291
6	0,67	-62,56	-0,2502	-67,0407	-0,2765	-67,0407	-0,2765	-62,5628	-0,2502	-53,6070	-0,1975	-49,13	-0,1712	-44,65	-0,1449
7	0,60	-62,56	-0,2502	-58,0849	-0,2238	-58,0849	-0,2238	-49,1291	-0,1712	-40,1733	-0,1186	-35,70	-0,0923	-31,22	-0,0659
8	0,53	-53,61	-0,1975	-49,1291	-0,1712	-44,6512	-0,1449	-31,2175	-0,0659	-26,7396	-0,0396	-26,74	-0,0396	-26,74	-0,0396
9	0,47	-44,65	-0,1449	-44,6512	-0,1449	-40,1733	-0,1186	-31,2175	-0,0659	-26,7396	-0,0396	-22,26	-0,0133	-22,26	-0,0133
10	0,40	-35,70	-0,0923	-31,2175	-0,0659	-26,7396	-0,0396	-22,2617	-0,0133	-22,2617	-0,0133	-22,26	-0,0133	-22,26	-0,0133
11	0,33	-31,22	-0,0659	-26,7396	-0,0396	-22,2617	-0,0133	-22,2617	-0,0133	-17,7838	0,0130	-17,78	0,0130	-17,78	0,0130
12	0,27	-26,74	-0,0396	-17,7838	0,0130	-17,7838	0,0130	-17,7838	0,0130	-17,7838	0,0130	-17,78	0,0130	-22,26	-0,0133
13	0,20	-26,74	-0,0396	-22,2617	-0,0133	-22,2617	-0,0133	-22,2617	-0,0133	-26,7396	-0,0396	-22,26	-0,0133	-26,74	-0,0396
14	0,13	-26,74	-0,0396	-22,2617	-0,0133	-22,2617	-0,0133	-26,7396	-0,0396	-44,6512	-0,1449	-40,17	-0,1186	-49,13	-0,1712
15	0,07	-31,22	-0,0659	-22,2617	-0,0133	-31,2175	-0,0659	-35,6954	-0,0923	-44,6512	-0,1449	-53,61	-0,1975	-62,56	-0,2502
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	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
1	1,00	-232,72	-1,2503	-228,25	-1,2240	-196,90	-1,0397	-174,51	-0,9081	-170,03	-0,8818	-174,51	-0,9081		
2	0,93	-210,33	-1,1187	-187,94	-0,9871	-214,81	-1,1450	-170,03	-0,8818	-187,94	-0,9871	-147,64	-0,7502		
3	0,87	-143,17	-0,7239	-134,21	-0,6713	-152,12	-0,7765	-120,78	-0,5923	-134,21	-0,6713	-125,25	-0,6186		
4	0,80	-93,91	-0,4344	-98,39	-0,4607	-93,91	-0,4344	-84,95	-0,3818	-80,47	-0,3554	-80,47	-0,3554		
5	0,73	-67,04	-0,2765	-62,56	-0,2502	-58,08	-0,2238	-49,13	-0,1712	-44,65	-0,1449	-35,70	-0,0923		
6	0,67	-40,17	-0,1186	-40,17	-0,1186	-35,70	-0,0923	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659		
7	0,60	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-26,74	-0,0396	-26,74	-0,0396		
8	0,53	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-26,74	-0,0396	-26,74	-0,0396	-31,22	-0,0659		
9	0,47	-26,74	-0,0396	-26,74	-0,0396	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659		
10	0,40	-26,74	-0,0396	-26,74	-0,0396	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-31,22	-0,0659	-35,70	-0,0923		
11	0,33	-22,26	-0,0133	-26,74	-0,0396	-26,74	-0,0396	-31,22	-0,0659	-35,70	-0,0923	-35,70	-0,0923		
12	0,27	-22,26	-0,0133	-31,22	-0,0659	-35,70	-0,0923	-35,70	-0,0923	-40,17	-0,1186	-40,17	-0,1186		
13	0,20	-35,70	-0,0923	-44,65	-0,1449	-49,13	-0,1712	-44,65	-0,1449	-49,13	-0,1712	-49,13	-0,1712		
14	0,13	-58,08	-0,2238	-58,08	-0,2238	-62,56	-0,2502	-53,61	-0,1975	-58,08	-0,2238	-53,61	-0,1975		
15	0,07	-67,04	-0,2765	-62,56	-0,2502	-67,04	-0,2765	-58,08	-0,2238	-58,08	-0,2238	-62,56	-0,2502		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0)															
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/W = 1/2		z/W = 5/12		z/W = 1/3		z/W = 1/4		z = 1/6		z = 1/12		z /W= 0	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00	-155,61	-0,7971	-139,9868	-0,7052	-143,1116	-0,7236	-149,3612	-0,7603	-174,3598	-0,9073	-177,48	-0,9256	-174,36	-0,9073
2	0,93	-149,36	-0,7603	-146,2364	-0,7420	-121,2378	-0,5950	-171,2350	-0,8889	-155,6109	-0,7971	-158,74	-0,8154	-152,49	-0,7787
3	0,87	-130,61	-0,6501	-133,7371	-0,6685	-121,2378	-0,5950	-133,7371	-0,6685	-121,2378	-0,5950	-118,11	-0,5767	-111,86	-0,5399
4	0,80	-102,49	-0,4848	-108,7385	-0,5216	-96,2392	-0,4481	-93,1144	-0,4297	-89,9896	-0,4114	-80,62	-0,3563	-68,12	-0,2828
5	0,73	-71,24	-0,3012	-71,2406	-0,3012	-64,9910	-0,2644	-61,8662	-0,2461	-61,8662	-0,2461	-49,37	-0,1726	-43,12	-0,1359
6	0,67	-46,24	-0,1542	-49,3669	-0,1726	-46,2421	-0,1542	-39,9924	-0,1175	-30,6179	-0,0624	-27,49	-0,0440	-24,37	-0,0257
7	0,60	-43,12	-0,1359	-39,9924	-0,1175	-36,8676	-0,0991	-30,6179	-0,0624	-21,2435	-0,0073	-18,12	0,0111	-18,12	0,0111
8	0,53	-33,74	-0,0808	-33,7428	-0,0808	-27,4931	-0,0440	-18,1187	0,0111	-14,9938	0,0294	-14,99	0,0294	-33,11	-0,0771
9	0,47	-27,49	-0,0440	-27,4931	-0,0440	-24,3683	-0,0257	-18,1187	0,0111	-14,9938	0,0294	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294
10	0,40	-21,24	-0,0073	-21,2435	-0,0073	-18,1187	0,0111	-14,9938	0,0294	-14,9938	0,0294	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294
11	0,33	-21,24	-0,0073	-18,1187	0,0111	-14,9938	0,0294	-14,9938	0,0294	-14,9938	0,0294	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294
12	0,27	-18,12	0,0111	-14,9938	0,0294	-14,9938	0,0294	-14,9938	0,0294	-14,9938	0,0294	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294
13	0,20	-18,12	0,0111	-14,9938	0,0294	-14,9938	0,0294	-18,1187	0,0111	-21,2435	-0,0073	-18,12	0,0111	-21,24	-0,0073
14	0,13	-24,37	-0,0257	-18,1187	0,0111	-18,1187	0,0111	-21,2435	-0,0073	-33,7428	-0,0808	-30,62	-0,0624	-36,87	-0,0991
15	0,07	-27,49	-0,0440	-18,1187	0,0111	-24,3683	-0,0257	-30,6179	-0,0624	-36,8676	-0,0991	-39,99	-0,1175	-46,24	-0,1542
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	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		
1	1,00	-164,99	-0,8522	-158,74	-0,8154	-139,99	-0,7052	-124,36	-0,6134	-121,24	-0,5950	-127,49	-0,6318		
2	0,93	-146,24	-0,7420	-133,74	-0,6685	-152,49	-0,7787	-124,36	-0,6134	-136,86	-0,6869	-114,99	-0,5583		
3	0,87	-96,24	-0,4481	-96,24	-0,4481	-111,86	-0,5399	-93,11	-0,4297	-105,61	-0,5032	-99,36	-0,4665		
4	0,80	-55,62	-0,2093	-68,12	-0,2828	-71,24	-0,3012	-71,24	-0,3012	-68,12	-0,2828	-68,12	-0,2828		
5	0,73	-36,87	-0,0991	-36,87	-0,0991	-43,12	-0,1359	-43,12	-0,1359	-43,12	-0,1359	-33,74	-0,0808		
6	0,67	-24,37	-0,0257	-27,49	-0,0440	-27,49	-0,0440	-30,62	-0,0624	-27,49	-0,0440	-27,49	-0,0440		
7	0,60	-18,12	0,0111	-18,12	0,0111	-18,12	0,0111	-24,37	-0,0257	-24,37	-0,0257	-24,37	-0,0257		
8	0,53	-33,11	-0,0771	-14,99	0,0294	-18,12	0,0111	-21,24	-0,0073	-21,24	-0,0073	-21,24	-0,0073		
9	0,47	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294	-18,12	0,0111	-21,24	-0,0073	-21,24	-0,0073		
10	0,40	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294	-18,12	0,0111	-18,12	0,0111	-21,24	-0,0073	-21,24	-0,0073		
11	0,33	-14,99	0,0294	-14,99	0,0294	-18,12	0,0111	-18,12	0,0111	-21,24	-0,0073	-24,37	-0,0257		
12	0,27	-18,12	0,0111	-21,24	-0,0073	-24,37	-0,0257	-24,37	-0,0257	-24,37	-0,0257	-27,49	-0,0440		
13	0,20	-27,49	-0,0440	-30,62	-0,0624	-33,74	-0,0808	-27,49	-0,0440	-30,62	-0,0624	-30,62	-0,0624		
14	0,13	-43,12	-0,1359	-39,99	-0,1175	-46,24	-0,1542	-36,87	-0,0991	-36,87	-0,0991	-36,87	-0,0991		
15	0,07	-49,37	-0,1726	-46,24	-0,1542	-46,24	-0,1542	-43,12	-0,1359	-39,99	-0,1175	-46,24	-0,1542		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0)															
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/W = 1/2		z/W = 5/12		z/W = 1/3		z/W = 1/4		z = 1/6		z = 1/12		z /W= 0	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00	-97,52	-0,4556	-89,4713	-0,4083	-91,4833	-0,4201	-93,4953	-0,4320	-109,5909	-0,5266	-111,60	-0,5384	-109,59	-0,5266
2	0,93	-95,51	-0,4438	-93,4953	-0,4320	-91,4833	-0,4201	-107,5789	-0,5147	-97,5192	-0,4556	-99,53	-0,4674	-93,50	-0,4320
3	0,87	-83,44	-0,3728	-85,4474	-0,3847	-77,3996	-0,3374	-83,4355	-0,3728	-75,3877	-0,3255	-73,38	-0,3137	-69,35	-0,2901
4	0,80	-65,33	-0,2664	-69,3518	-0,2901	-59,2920	-0,2309	-57,2801	-0,2191	-53,2562	-0,1955	-47,22	-0,1600	-41,18	-0,1245
5	0,73	-45,21	-0,1482	-45,2083	-0,1482	-41,1844	-0,1245	-37,1605	-0,1009	-37,1605	-0,1009	-29,11	-0,0536	-25,09	-0,0299
6	0,67	-29,11	-0,0536	-29,1127	-0,0536	-27,1007	-0,0417	-23,0768	-0,0181	-19,0529	0,0056	-15,03	0,0292	-13,02	0,0410
7	0,60	-25,09	-0,0299	-23,0768	-0,0181	-23,0768	-0,0181	-17,0410	0,0174	-13,0170	0,0410	-11,01	0,0529	-8,99	0,0647
8	0,53	-21,06	-0,0063	-19,0529	0,0056	-15,0290	0,0292	-11,0051	0,0529	-8,9931	0,0647	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647
9	0,47	-15,03	0,0292	-15,0290	0,0292	-13,0170	0,0410	-11,0051	0,0529	-8,9931	0,0647	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647
10	0,40	-13,02	0,0410	-11,0051	0,0529	-8,9931	0,0647	-8,9931	0,0647	-6,9812	0,0765	-6,98	0,0765	-8,99	0,0647
11	0,33	-13,02	0,0410	-8,9931	0,0647	-8,9931	0,0647	-6,9812	0,0765	-6,9812	0,0765	-6,98	0,0765	-8,99	0,0647
12	0,27	-11,01	0,0529	-8,9931	0,0647	-8,9931	0,0647	-8,9931	0,0647	-8,9931	0,0647	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647
13	0,20	-13,02	0,0410	-8,9931	0,0647	-8,9931	0,0647	-11,0051	0,0529	-13,0170	0,0410	-11,01	0,0529	-13,02	0,0410
14	0,13	-17,04	0,0174	-11,0051	0,0529	-13,0170	0,0410	-13,0170	0,0410	-21,0649	-0,0063	-19,05	0,0056	-23,08	-0,0181
15	0,07	-19,05	0,0056	-13,0170	0,0410	-15,0290	0,0292	-19,0529	0,0056	-23,0768	-0,0181	-27,10	-0,0417	-29,11	-0,0536
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	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		
1	1,00	-103,56	-0,4911	-101,54	-0,4793	-89,47	-0,4083	-79,41	-0,3492	-79,41	-0,3492	-83,44	-0,3728		
2	0,93	-91,48	-0,4201	-83,44	-0,3728	-97,52	-0,4556	-81,42	-0,3610	-87,46	-0,3965	-77,40	-0,3374		
3	0,87	-59,29	-0,2309	-59,29	-0,2309	-71,36	-0,3019	-61,30	-0,2428	-69,35	-0,2901	-67,34	-0,2782		
4	0,80	-33,14	-0,0772	-39,17	-0,1127	-45,21	-0,1482	-45,21	-0,1482	-47,22	-0,1600	-49,23	-0,1718		
5	0,73	-19,05	0,0056	-21,06	-0,0063	-25,09	-0,0299	-27,10	-0,0417	-29,11	-0,0536	-25,09	-0,0299		
6	0,67	-13,02	0,0410	-13,02	0,0410	-15,03	0,0292	-17,04	0,0174	-17,04	0,0174	-17,04	0,0174		
7	0,60	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529	-8,99	0,0647	-11,01	0,0529	-13,02	0,0410	-15,03	0,0292		
8	0,53	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529		
9	0,47	-8,99	0,0647	-6,98	0,0765	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529		
10	0,40	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529		
11	0,33	-8,99	0,0647	-8,99	0,0647	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529	-11,01	0,0529	-13,02	0,0410		
12	0,27	-11,01	0,0529	-13,02	0,0410	-13,02	0,0410	-13,02	0,0410	-15,03	0,0292	-15,03	0,0292		
13	0,20	-17,04	0,0174	-19,05	0,0056	-21,06	-0,0063	-17,04	0,0174	-19,05	0,0056	-19,05	0,0056		
14	0,13	-25,09	-0,0299	-25,09	-0,0299	-27,10	-0,0417	-21,06	-0,0063	-23,08	-0,0181	-23,08	-0,0181		
15	0,07	-29,11	-0,0536	-29,11	-0,0536	-29,11	-0,0536	-27,10	-0,0417	-25,09	-0,0299	-31,12	-0,0654		

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=0.060)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-191,7812	-1,0097	-130,1424	-0,6474	-160,9618	-0,8285
2	0,92					-178,5728	-0,9320	-182,9756	-0,9579	-147,7534	-0,7509
3	0,83					-103,7257	-0,4921	-147,7534	-0,7509	-94,9202	-0,4403
4	0,75	daerah eksitasi				-46,4897	-0,1557	-77,3091	-0,3368	-50,8925	-0,1816
5	0,67	-28,88	-0,0522	-28,8786	-0,0522	-28,8786	-0,0522	-33,2814	-0,0781	-33,2814	-0,0781
6	0,58	-28,88	-0,0522	-28,8786	-0,0522	-28,8786	-0,0522	-24,4758	-0,0263	-24,4758	-0,0263
7	0,50	-28,88	-0,0522	-28,8786	-0,0522	-24,4758	-0,0263	-24,4758	-0,0263	-24,4758	-0,0263
8	0,42	-28,88	-0,0522	-24,4758	-0,0263	-20,0731	-0,0004	-20,0731	-0,0004	-20,0731	-0,0004
9	0,33	-55,30	-0,2074	-37,6842	-0,1039	-28,8786	-0,0522	-20,0731	-0,0004	-20,0731	-0,0004
10	0,25	-64,10	-0,2592	-55,2952	-0,2074	-50,8925	-0,1816	-37,6842	-0,1039	-33,2814	-0,0781
11	0,17	-86,11	-0,3886	-72,9063	-0,3110	-77,3091	-0,3368	-55,2952	-0,2074	-72,9063	-0,3110
12	0,08	-94,92	-0,4403	-77,3091	-0,3368	-81,7119	-0,3627	-81,7119	-0,3627	-81,7119	-0,3627
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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
1	1,00	-174,17	-0,9061	-187,38	-0,9838						
2	0,92	-147,75	-0,7509	-169,77	-0,8803						
3	0,83	-94,92	-0,4403	-94,92	-0,4403						
4	0,75	-55,30	-0,2074	-37,68	-0,1039	daerah eksitasi					
5	0,67	-33,28	-0,0781	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263		
6	0,58	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263		
7	0,50	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263		
8	0,42	-20,07	-0,0004	-24,48	-0,0263	-24,48	-0,0263	-28,88	-0,0522		
9	0,33	-20,07	-0,0004	-24,48	-0,0263	-28,88	-0,0522	-33,28	-0,0781		
10	0,25	-37,68	-0,1039	-46,49	-0,1557	-55,30	-0,2074	-59,70	-0,2333		
11	0,17	-68,50	-0,2851	-64,10	-0,2592	-81,71	-0,3627	-81,71	-0,3627		
12	0,08	-86,11	-0,3886	-81,71	-0,3627	-77,31	-0,3368	-86,11	-0,3886		

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=0.045)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-196,0902	-1,0350	-130,0907	-0,6471	-165,2905	-0,8540
2	0,92					-182,8903	-0,9574	-187,2903	-0,9833	-152,0906	-0,7764
3	0,83					-108,0909	-0,5178	-152,0906	-0,7764	-99,2910	-0,4660
4	0,75	daerah eksitasi				-50,8914	-0,1816	-77,2911	-0,3367	-50,8914	-0,1816
5	0,67	-28,89	-0,0523	-28,8915	-0,0523	-33,2915	-0,0781	-33,2915	-0,0781	-28,8915	-0,0523
6	0,58	-33,29	-0,0781	-28,8915	-0,0523	-28,8915	-0,0523	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264
7	0,50	-28,89	-0,0523	-28,8915	-0,0523	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264	-20,0916	-0,0005
8	0,42	-28,89	-0,0523	-24,4916	-0,0264	-20,0916	-0,0005	-20,0916	-0,0005	-15,6916	-0,0253
9	0,33	-50,89	-0,1816	-33,2915	-0,0781	-24,4916	-0,0264	-20,0916	-0,0005	-20,0916	-0,0005
10	0,25	-59,69	-0,2333	-50,8914	-0,1816	-46,4914	-0,1557	-33,2915	-0,0781	-28,8915	-0,0523
11	0,17	-81,69	-0,3626	-68,4912	-0,2850	-72,8912	-0,3109	-50,8914	-0,1816	-68,4912	-0,2850
12	0,08	-86,09	-0,3885	-72,8912	-0,3109	-77,2911	-0,3367	-77,2911	-0,3367	-81,6911	-0,3626
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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
1	1,00	-178,49	-0,9315	-196,09	-1,0350						
2	0,92	-152,09	-0,7764	-178,49	-0,9315						
3	0,83	-99,29	-0,4660	-99,29	-0,4660						
4	0,75	-55,29	-0,2074	-42,09	-0,1298	daerah eksitasi					
5	0,67	-33,29	-0,0781	-28,8915	-0,0523	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264		
6	0,58	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264		
7	0,50	-20,0916	-0,0005	-20,0916	-0,0005	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264		
8	0,42	-20,0916	-0,0005	-24,4916	-0,0264	-24,4916	-0,0264	-28,8915	-0,0523		
9	0,33	-20,09	-0,0005	-24,49	-0,0264	-28,89	-0,0523	-33,29	-0,0781		
10	0,25	-37,69	-0,1040	-42,09	-0,1298	-55,29	-0,2074	-55,29	-0,2074		
11	0,17	-64,09	-0,2591	-64,09	-0,2591	-77,2911	-0,3367	-77,2911	-0,3367		
12	0,08	-81,6911	-0,3626	-81,6911	-0,3626	-77,2911	-0,3367	-81,69	-0,3626		

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=0.030)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-187,3503	-0,9836	-125,6958	-0,6212	-156,5231	-0,8024
2	0,92					-174,1386	-0,9060	-178,5425	-0,9318	-143,3114	-0,7248
3	0,83					-99,2724	-0,4659	-143,3114	-0,7248	-90,4646	-0,4142
4	0,75	daerah eksitasi				-46,4256	-0,1553	-72,8490	-0,3106	-50,8295	-0,1812
5	0,67	-28,81	-0,0518	-24,4061	-0,0259	-28,8100	-0,0518	-33,2139	-0,0777	-33,2139	-0,0777
6	0,58	-28,81	-0,0518	-24,4061	-0,0259	-24,4061	-0,0259	-24,4061	-0,0259	-24,4061	-0,0259
7	0,50	-28,81	-0,0518	-24,4061	-0,0259	-24,4061	-0,0259	-24,4061	-0,0259	-24,4061	-0,0259
8	0,42	-28,81	-0,0518	-24,4061	-0,0259	-24,4061	-0,0259	-20,0022	0,0000	-20,0022	0,0000
9	0,33	-55,23	-0,2071	-37,6178	-0,1035	-28,8100	-0,0518	-20,0022	0,0000	-20,0022	0,0000
10	0,25	-68,45	-0,2847	-59,6373	-0,2330	-50,8295	-0,1812	-37,6178	-0,1035	-33,2139	-0,0777
11	0,17	-90,46	-0,4142	-72,8490	-0,3106	-81,6568	-0,3624	-59,6373	-0,2330	-72,8490	-0,3106
12	0,08	-94,87	-0,4400	-77,2529	-0,3365	-86,0607	-0,3883	-81,6568	-0,3624	-86,0607	-0,3883
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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		
1	1,00	-169,73	-0,8801	-182,95	-0,9577						
2	0,92	-143,31	-0,7248	-160,93	-0,8283						
3	0,83	-94,87	-0,4400	-86,06	-0,3883						
4	0,75	-50,83	-0,1812	-33,21	-0,0777	daerah eksitasi					
5	0,67	-33,21	-0,0777	-28,81	-0,0518	-24,41	-0,0259	-24,41	-0,0259		
6	0,58	-28,81	-0,0518	-28,81	-0,0518	-24,41	-0,0259	-24,41	-0,0259		
7	0,50	-24,41	-0,0259	-24,41	-0,0259	-24,41	-0,0259	-24,41	-0,0259		
8	0,42	-20,00	0,0000	-24,41	-0,0259	-28,81	-0,0518	-28,81	-0,0518		
9	0,33	-20,00	0,0000	-24,41	-0,0259	-28,81	-0,0518	-37,62	-0,1035		
10	0,25	-37,62	-0,1035	-46,43	-0,1553	-59,64	-0,2330	-59,64	-0,2330		
11	0,17	-68,45	-0,2847	-68,45	-0,2847	-86,06	-0,3883	-81,66	-0,3624		
12	0,08	-86,06	-0,3883	-86,06	-0,3883	-81,66	-0,3624	-86,06	-0,3883		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0.072)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-136,2718	-0,6834	-93,2916	-0,4308	-111,7117	-0,5390
2	0,92					-127,0617	-0,6293	-130,1317	-0,6473	-105,5716	-0,5030
3	0,83					-74,8715	-0,3225	-105,5716	-0,5030	-68,7315	-0,2864
4	0,75	daerah eksitasi				-34,9613	-0,0879	-56,4514	-0,2142	-34,9613	-0,0879
5	0,67	-22,68	-0,0158	-22,6813	-0,0158	-22,6813	-0,0158	-25,7513	-0,0338	-22,6813	-0,0158
6	0,58	-22,68	-0,0158	-19,6113	0,0023	-19,6113	0,0023	-19,6113	0,0023	-19,6113	0,0023
7	0,50	-22,68	-0,0158	-19,6113	0,0023	-19,6113	0,0023	-19,6113	0,0023	-16,5413	0,0203
8	0,42	-19,61	0,0023	-19,6113	0,0023	-16,5413	0,0203	-13,4713	0,0384	-13,4713	0,0384
9	0,33	-38,03	-0,1060	-25,7513	-0,0338	-19,6113	0,0023	-16,5413	0,0203	-13,4713	0,0384
10	0,25	-47,24	-0,1601	-38,0314	-0,1060	-34,9613	-0,0879	-25,7513	-0,0338	-22,6813	-0,0158
11	0,17	-59,52	-0,2323	-50,3114	-0,1782	-53,3814	-0,1962	-38,0314	-0,1060	-50,3114	-0,1782
12	0,08	-65,66	-0,2684	-53,3814	-0,1962	-56,4514	-0,2142	-56,4514	-0,2142	-59,5214	-0,2323
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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		
1	1,00	-123,99	-0,6112	-133,20	-0,6653						
2	0,92	-105,57	-0,5030	-120,92	-0,5932						
3	0,83	-68,73	-0,2864	-65,66	-0,2684						
4	0,75	-38,03	-0,1060	-28,82	-0,0518	daerah eksitasi					
5	0,67	-22,68	-0,0158	-19,61	0,0023	-19,61	0,0023	-19,61	0,0023		
6	0,58	-19,61	0,0023	-19,61	0,0023	-19,61	0,0023	-19,61	0,0023		
7	0,50	-16,54	0,0203	-16,54	0,0203	-19,61	0,0023	-19,61	0,0023		
8	0,42	-16,54	0,0203	-16,54	0,0203	-19,61	0,0023	-22,68	-0,0158		
9	0,33	-16,54	0,0203	-19,61	0,0023	-22,68	-0,0158	-25,75	-0,0338		
10	0,25	-28,82	-0,0518	-31,89	-0,0699	-41,10	-0,1240	-41,10	-0,1240		
11	0,17	-47,24	-0,1601	-47,24	-0,1601	-56,45	-0,2142	-56,45	-0,2142		
12	0,08	-59,52	-0,2323	-56,45	-0,2142	-56,45	-0,2142	-59,52	-0,2323		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0.054)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-139,3659	-0,7016	-93,3234	-0,4310	-114,8099	-0,5572
2	0,92					-130,1574	-0,6475	-133,2269	-0,6655	-108,6709	-0,5212
3	0,83					-74,9064	-0,3227	-108,6709	-0,5212	-68,7674	-0,2866
4	0,75	daerah eksitasi				-38,0725	-0,1062	-56,4895	-0,2145	-35,0030	-0,0882
5	0,67	-22,72	-0,0160	-22,7250	-0,0160	-25,7945	-0,0341	-25,7945	-0,0341	-19,66	0,0020
6	0,58	-22,72	-0,0160	-22,7250	-0,0160	-22,7250	-0,0160	-19,66	0,0020	-16,5860	0,0201
7	0,50	-22,72	-0,0160	-19,66	0,0020	-19,66	0,0020	-16,5860	0,0201	-13,5165	0,0381
8	0,42	-19,66	0,0020	-16,5860	0,0201	-16,5860	0,0201	-13,5165	0,0381	-13,5165	0,0381
9	0,33	-35,00	-0,0882	-22,7250	-0,0160	-16,5860	0,0201	-13,5165	0,0381	-13,5165	0,0381
10	0,25	-44,21	-0,1423	-38,0725	-0,1062	-31,9335	-0,0701	-22,7250	-0,0160	-22,7250	-0,0160
11	0,17	-56,49	-0,2145	-47,2810	-0,1603	-53,4200	-0,1964	-38,0725	-0,1062	-50,3505	-0,1784
12	0,08	-62,63	-0,2506	-53,4200	-0,1964	-56,4895	-0,2145	-53,4200	-0,1964	-56,4895	-0,2145
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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		
1	1,00	-127,09	-0,6294	-139,37	-0,7016						
2	0,92	-108,67	-0,5212	-127,09	-0,6294						
3	0,83	-68,77	-0,2866	-71,84	-0,3047						
4	0,75	-38,07	-0,1062	-28,86	-0,0521	daerah eksitasi					
5	0,67	-22,72	-0,0160	-19,66	0,0020	-19,66	0,0020	-19,66	0,0020		
6	0,58	-16,5860	0,0201	-16,5860	0,0201	-16,5860	0,0201	-16,5860	0,0201		
7	0,50	-13,5165	0,0381	-16,5860	0,0201	-16,5860	0,0201	-16,5860	0,0201		
8	0,42	-13,5165	0,0381	-16,5860	0,0201	-19,66	0,0020	-19,66	0,0020		
9	0,33	-16,59	0,0201	-19,66	0,0020	-22,72	-0,0160	-22,72	-0,0160		
10	0,25	-28,86	-0,0521	-31,93	-0,0701	-38,07	-0,1062	-38,07	-0,1062		
11	0,17	-47,28	-0,1603	-44,21	-0,1423	-56,49	-0,2145	-53,42	-0,1964		
12	0,08	-59,56	-0,2325	-56,49	-0,2145	-53,42	-0,1964	-56,49	-0,2145		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0.036)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-133,2123	-0,6654	-90,2057	-0,4126	-108,6371	-0,5210
2	0,92					-123,9966	-0,6112	-127,0685	-0,6293	-102,4933	-0,4849
3	0,83					-71,7744	-0,3043	-102,4933	-0,4849	-65,6306	-0,2682
4	0,75	daerah eksitasi				-31,8397	-0,0696	-53,3430	-0,1960	-34,9116	-0,0876
5	0,67	-19,55	0,0026	-19,5522	0,0026	-22,6241	-0,0154	-25,6960	-0,0335	-25,6960	-0,0335
6	0,58	-22,62	-0,0154	-19,5522	0,0026	-19,5522	0,0026	-19,5522	0,0026	-19,5522	0,0026
7	0,50	-22,62	-0,0154	-19,5522	0,0026	-19,5522	0,0026	-16,4803	0,0207	-16,4803	0,0207
8	0,42	-22,62	-0,0154	-19,5522	0,0026	-16,4803	0,0207	-16,4803	0,0207	-13,4084	0,0387
9	0,33	-41,06	-0,1238	-28,7679	-0,0515	-19,5522	0,0026	-16,4803	0,0207	-16,4803	0,0207
10	0,25	-50,27	-0,1779	-41,0554	-0,1238	-37,9835	-0,1057	-28,7679	-0,0515	-25,6960	-0,0335
11	0,17	-62,56	-0,2501	-53,3430	-0,1960	-56,4149	-0,2140	-41,0554	-0,1238	-53,3430	-0,1960
12	0,08	-68,70	-0,2863	-56,4149	-0,2140	-59,4868	-0,2321	-59,4868	-0,2321	-59,4868	-0,2321
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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		
1	1,00	-117,85	-0,5751	-127,07	-0,6293						
2	0,92	-99,42	-0,4668	-114,78	-0,5571						
3	0,83	-65,63	-0,2682	-62,56	-0,2501						
4	0,75	-37,98	-0,1057	-25,70	-0,0335	daerah eksitasi					
5	0,67	-25,70	-0,0335	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026		
6	0,58	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026		
7	0,50	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026	-19,55	0,0026		
8	0,42	-16,48	0,0207	-16,48	0,0207	-19,55	0,0026	-22,62	-0,0154		
9	0,33	-16,48	0,0207	-19,55	0,0026	-22,62	-0,0154	-25,70	-0,0335		
10	0,25	-28,77	-0,0515	-31,84	-0,0696	-41,06	-0,1238	-44,13	-0,1418		
11	0,17	-50,27	-0,1779	-47,20	-0,1599	-59,49	-0,2321	-59,49	-0,2321		
12	0,08	-62,56	-0,2501	-59,49	-0,2321	-56,41	-0,2140	-62,56	-0,2501		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0.090)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-87,3242	-0,3957	-57,6324	-0,2212	-71,4885	-0,3026
2	0,92					-81,3858	-0,3608	-83,3653	-0,3724	-67,5296	-0,2794
3	0,83					-47,7351	-0,1630	-67,5296	-0,2794	-41,7967	-0,1281
4	0,75	daerah eksitasi				-22,0022	-0,0118	-33,8789	-0,0816	-22,0022	-0,0118
5	0,67	-14,08	0,0348	-14,0843	0,0348	-14,0843	0,0348	-14,0843	0,0348	-12,1049	0,0464
6	0,58	-14,08	0,0348	-12,1049	0,0464	-12,1049	0,0464	-10,1254	0,0580	-10,1254	0,0580
7	0,50	-12,10	0,0464	-12,1049	0,0464	-10,1254	0,0580	-10,1254	0,0580	-8,1460	0,0697
8	0,42	-12,10	0,0464	-10,1254	0,0580	-8,1460	0,0697	-8,1460	0,0697	-8,1460	0,0697
9	0,33	-23,98	-0,0234	-14,0843	0,0348	-10,1254	0,0580	-8,1460	0,0697	-8,1460	0,0697
10	0,25	-29,92	-0,0583	-23,9816	-0,0234	-22,0022	-0,0118	-16,0638	0,0231	-14,0843	0,0348
11	0,17	-39,82	-0,1165	-31,8994	-0,0699	-33,8789	-0,0816	-23,9816	-0,0234	-31,8994	-0,0699
12	0,08	-41,80	-0,1281	-33,8789	-0,0816	-35,8584	-0,0932	-35,8584	-0,0932	-35,8584	-0,0932
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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		
1	1,00	-79,41	-0,3492	-85,34	-0,3841						
2	0,92	-67,53	-0,2794	-77,43	-0,3375						
3	0,83	-43,78	-0,1397	-43,78	-0,1397						
4	0,75	-22,00	-0,0118	-18,04	0,0115	daerah eksitasi					
5	0,67	-14,08	0,0348	-12,10	0,0464	-12,10	0,0464	-12,10	0,0464		
6	0,58	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580		
7	0,50	-8,15	0,0697	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580		
8	0,42	-8,15	0,0697	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580		
9	0,33	-10,13	0,0580	-12,10	0,0464	-14,08	0,0348	-14,08	0,0348		
10	0,25	-18,04	0,0115	-20,02	-0,0001	-23,98	-0,0234	-23,98	-0,0234		
11	0,17	-29,92	-0,0583	-29,92	-0,0583	-35,86	-0,0932	-35,86	-0,0932		
12	0,08	-37,84	-0,1048	-35,86	-0,0932	-35,86	-0,0932	-35,86	-0,0932		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0.068)											
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	
		P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-87,9193	-0,3992	-59,7934	-0,2339	-73,8563	-0,3165
2	0,92					-81,8923	-0,3638	-83,9013	-0,3756	-67,8293	-0,2811
3	0,83					-47,7394	-0,1630	-67,8293	-0,2811	-41,7124	-0,1276
4	0,75	daerah eksitasi				-23,6315	-0,0213	-33,6765	-0,0804	-19,6135	0,0023
5	0,67	-13,59	0,0377	-13,5866	0,0377	-15,5956	0,0259	-13,5866	0,0377	-11,5776	0,0495
6	0,58	-13,59	0,0377	-13,5866	0,0377	-13,5866	0,0377	-9,5686	0,0613	-9,5686	0,0613
7	0,50	-13,59	0,0377	-11,58	0,0495	-11,58	0,0495	-9,5686	0,0613	-7,5596	0,0731
8	0,42	-11,58	0,0495	-9,5686	0,0613	-7,5596	0,0731	-7,5596	0,0731	-7,5596	0,0731
9	0,33	-21,62	-0,0095	-13,5866	0,0377	-9,5686	0,0613	-9,5686	0,0613	-9,5686	0,0613
10	0,25	-27,65	-0,0450	-23,6315	-0,0213	-19,6135	0,0023	-15,5956	0,0259	-13,5866	0,0377
11	0,17	-37,69	-0,1040	-31,6675	-0,0686	-33,6765	-0,0804	-23,6315	-0,0213	-31,6675	-0,0686
12	0,08	-41,71	-0,1276	-33,6765	-0,0804	-35,6855	-0,0922	-33,6765	-0,0804	-35,6855	-0,0922
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z = -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		
1	1,00	-81,89	-0,3638	-87,92	-0,3992						
2	0,92	-67,83	-0,2811	-79,88	-0,3520						
3	0,83	-41,71	-0,1276	-45,73	-0,1512						
4	0,75	-19,61	0,0023	-17,60	0,0141	daerah eksitasi					
5	0,67	-11,58	0,0495	-11,58	0,0495	-11,58	0,0495	-11,58	0,0495		
6	0,58	-9,5686	0,0613	-7,5596	0,0731	-9,5686	0,0613	-9,57	0,0613		
7	0,50	-7,5596	0,0731	-7,5596	0,0731	-9,5686	0,0613	-9,57	0,0613		
8	0,42	-7,5596	0,0731	-9,5686	0,0613	-9,5686	0,0613	-11,58	0,0495		
9	0,33	-9,57	0,0613	-11,58	0,0495	-13,59	0,0377	-13,59	0,0377		
10	0,25	-17,60	0,0141	-19,61	0,0023	-23,63	-0,0213	-23,63	-0,0213		
11	0,17	-29,66	-0,0568	-27,65	-0,0450	-35,69	-0,0922	-33,68	-0,0804		
12	0,08	-37,69	-0,1040	-35,69	-0,0922	-33,68	-0,0804	-37,69	-0,1040		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0.045)											
No	Lokasi Pressure	z/W = 1/2		z/W = 3/8		z/W = 1/4		z/W = 1/8		z/W = 0	
	Tap (y/H)	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp
1	1,00					-85,3430	-0,3841	-57,6324	-0,2212	-69,5084	-0,2910
2	0,92					-79,4050	-0,3492	-81,3843	-0,3608	-65,5497	-0,2677
3	0,83					-43,7771	-0,1398	-65,5497	-0,2677	-41,7978	-0,1281
4	0,75	daerah eksitasi				-20,0252	-0,0001	-33,8805	-0,0816	-22,0046	-0,0118
5	0,67	-12,11	0,0464	-12,1079	0,0464	-12,1079	0,0464	-14,0873	0,0348	-14,0873	0,0348
6	0,58	-14,09	0,0348	-12,1079	0,0464	-12,1079	0,0464	-12,1079	0,0464	-12,1079	0,0464
7	0,50	-14,09	0,0348	-12,1079	0,0464	-10,1286	0,0580	-10,1286	0,0580	-10,1286	0,0580
8	0,42	-12,11	0,0464	-12,1079	0,0464	-10,1286	0,0580	-8,1493	0,0697	-8,1493	0,0697
9	0,33	-25,96	-0,0350	-16,0666	0,0231	-12,1079	0,0464	-10,1286	0,0580	-10,1286	0,0580
10	0,25	-31,90	-0,0699	-25,9632	-0,0350	-23,9839	-0,0234	-18,0459	0,0115	-16,0666	0,0231
11	0,17	-39,82	-0,1165	-33,8805	-0,0816	-35,8598	-0,0932	-25,9632	-0,0350	-31,9012	-0,0699
12	0,08	-43,78	-0,1398	-35,8598	-0,0932	-37,8392	-0,1049	-35,8598	-0,0932	-37,8392	-0,1049
No	Lokasi Pressure	z = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
	Tap (y/H)	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp	P (pa)	Cp		
1	1,00	-75,45	-0,3259	-81,38	-0,3608						
2	0,92	-63,57	-0,2561	-71,49	-0,3026						
3	0,83	-41,80	-0,1281	-39,82	-0,1165						
4	0,75	-23,98	-0,0234	-16,07	0,0231	daerah eksitasi					
5	0,67	-16,07	0,0231	-12,11	0,0464	-10,13	0,0580	-12,11	0,0464		
6	0,58	-12,11	0,0464	-12,11	0,0464	-12,11	0,0464	-10,13	0,0580		
7	0,50	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580	-12,11	0,0464		
8	0,42	-10,13	0,0580	-10,13	0,0580	-12,11	0,0464	-14,09	0,0348		
9	0,33	-10,13	0,0580	-12,11	0,0464	-14,09	0,0348	-16,07	0,0231		
10	0,25	-18,05	0,0115	-20,03	-0,0001	-25,96	-0,0350	-25,96	-0,0350		
11	0,17	-29,92	-0,0583	-29,92	-0,0583	-35,86	-0,0932	-35,86	-0,0932		
12	0,08	-37,84	-0,1049	-37,84	-0,1049	-35,86	-0,0932	-39,82	-0,1165		

Lampiran 3. Tabel data intensitas turbulensi (%) hasil simulasi CFD

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=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	
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00	1,35	134,87	1,2736	127,3566	1,2736	127,3566	1,2736	127,3566	1,3487	134,8677	1,31	131,11	1,35	134,87
2	0,93	1,50	149,89	1,3487	134,8677	1,3487	134,8677	1,3487	134,8677	1,3487	134,8677	1,35	134,87	1,35	134,87
3	0,87	1,61	161,16	1,3487	134,8677	1,3487	134,8677	1,3862	138,6232	1,3862	138,6232	1,35	134,87	1,35	134,87
4	0,80	1,84	183,69	1,4989	149,8899	1,3862	138,6232	1,4238	142,3788	1,3487	134,8677	1,35	134,87	1,31	131,11
5	0,73	1,99	198,71	1,6867	168,6676	1,4613	146,1343	1,3862	138,6232	1,3862	138,6232	1,31	131,11	1,31	131,11
6	0,67	1,76	176,18	1,6867	168,6676	1,4613	146,1343	1,3487	134,8677	1,2736	127,3566	1,20	119,85	1,20	119,85
7	0,60	1,57	157,40	1,5740	157,4009	1,4613	146,1343	1,3111	131,1121	1,1985	119,8455	1,09	108,58	1,05	104,82
8	0,53	1,16	116,09	1,3862	138,6232	1,2736	127,3566	1,1233	112,3344	1,1985	119,8455	0,90	89,80	0,94	93,56
9	0,47	1,05	104,82	1,0107	101,0677	1,1233	112,3344	1,0482	104,8233	0,9731	97,3122	0,90	89,80	0,86	86,05
10	0,40	1,09	108,58	0,9731	97,3122	0,9356	93,5566	0,8980	89,8011	0,8605	86,0455	0,94	93,56	1,05	104,82
11	0,33	1,09	108,58	1,0107	101,0677	0,8980	89,8011	0,8980	89,8011	0,8229	82,2900	1,05	104,82	1,05	104,82
12	0,27	1,01	101,07	0,9356	93,5566	0,8980	89,8011	0,8605	86,0455	0,8980	89,8011	0,86	86,05	0,90	89,80
13	0,20	0,86	86,05	0,8605	86,0455	0,7478	74,7789	0,8980	89,8011	0,7853	78,5344	0,79	78,53	0,75	74,78
14	0,13	0,82	82,29	0,7853	78,5344	0,7102	71,0233	0,8229	82,2900	0,7102	71,0233	0,71	71,02	0,71	71,02
15	0,07	0,86	86,05	0,6727	67,2678	0,7853	78,5344	0,7102	71,0233	0,6727	67,2678	0,67	67,27	0,67	67,27
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/W = -1/12		z/W = -1/6		z/W = -1/4		z/W = -1/3		z/W = -5/12		z/W = -1/2			
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,31	131,11	1,31	131,11	1,24	123,60	1,20	119,85	1,20	119,85	1,31	131,11		
2	0,93	1,35	134,87	1,31	131,11	1,31	131,11	1,27	127,36	1,24	123,60	1,42	142,38		
3	0,87	1,31	131,11	1,31	131,11	1,31	131,11	1,27	127,36	1,31	131,11	1,42	142,38		
4	0,80	1,31	131,11	1,31	131,11	1,31	131,11	1,27	127,36	1,39	138,62	1,57	157,40		
5	0,73	1,24	123,60	1,24	123,60	1,31	131,11	1,39	138,62	1,46	146,13	1,39	138,62		
6	0,67	1,12	112,33	1,27	127,36	1,42	142,38	1,31	131,11	0,82	82,29	0,79	78,53		
7	0,60	1,05	104,82	1,20	119,85	1,31	131,11	1,05	104,82	0,75	74,78	0,64	63,51		
8	0,53	1,09	108,58	1,24	123,60	1,01	101,07	0,86	86,05	0,64	63,51	0,64	63,51		
9	0,47	1,05	104,82	1,12	112,33	1,01	101,07	0,82	82,29	0,64	63,51	0,60	59,76		
10	0,40	1,16	116,09	1,01	101,07	0,82	82,29	0,64	63,51	0,60	59,76	0,75	74,78		
11	0,33	1,01	101,07	0,86	86,05	0,71	71,02	0,67	67,27	0,67	67,27	0,71	71,02		
12	0,27	0,75	74,78	0,71	71,02	0,71	71,02	0,71	71,02	0,71	71,02	0,75	74,78		
13	0,20	0,71	71,02	0,71	71,02	0,75	74,78	0,75	74,78	0,75	74,78	0,79	78,53		
14	0,13	0,71	71,02	0,67	67,27	0,71	71,02	0,79	78,53	0,82	82,29	0,82	82,29		
15	0,07	0,67	67,27	0,67	67,27	0,71	71,02	0,82	82,29	0,86	86,05	0,90	89,80		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0)															
No	Lokasi Pressure	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	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00	1,18	118,44	1,1201	112,0098	1,1201	112,0098	1,1201	112,0098	1,1844	118,4444	1,15	115,23	1,18	118,44
2	0,93	1,31	131,31	1,1844	118,4444	1,1844	118,4444	1,1844	118,4444	1,1844	118,4444	1,18	118,44	1,18	118,44
3	0,87	1,41	140,97	1,1844	118,4444	1,1844	118,4444	1,2166	121,6617	1,2166	121,6617	1,18	118,44	1,18	118,44
4	0,80	1,57	157,05	1,3131	131,3135	1,2166	121,6617	1,2488	124,8789	1,1844	118,4444	1,18	118,44	1,12	112,01
5	0,73	1,70	169,92	1,4418	144,1826	1,2810	128,0962	1,2166	121,6617	1,1844	118,4444	1,15	115,23	1,12	112,01
6	0,67	1,51	150,62	1,3775	137,7481	1,2488	124,8789	1,1523	115,2271	1,0879	108,7925	1,06	105,58	1,09	108,79
7	0,60	1,38	137,75	1,2488	124,8789	1,1844	118,4444	1,0879	108,7925	0,9914	99,1407	0,89	89,49	0,86	86,27
8	0,53	0,96	95,92	1,0879	108,7925	1,0558	105,5753	0,9271	92,7061	0,8627	86,2716	0,86	86,27	0,89	89,49
9	0,47	0,89	89,49	0,8305	83,0543	0,8949	89,4888	0,8305	83,0543	0,7984	79,8370	0,83	83,05	0,89	89,49
10	0,40	0,93	92,71	0,8305	83,0543	0,7662	76,6197	0,7662	76,6197	0,7984	79,8370	0,89	89,49	0,77	76,62
11	0,33	1,02	102,36	0,9271	92,7061	0,8305	83,0543	0,8305	83,0543	0,7662	76,6197	0,83	83,05	0,77	76,62
12	0,27	0,96	95,92	0,8305	83,0543	0,8305	83,0543	0,7984	79,8370	0,7340	73,4024	0,70	70,19	0,67	66,97
13	0,20	0,83	83,05	0,7984	79,8370	0,7019	70,1852	0,8305	83,0543	0,7019	70,1852	0,70	70,19	0,67	66,97
14	0,13	0,77	76,62	0,7340	73,4024	0,6697	66,9679	0,7340	73,4024	0,6375	63,7506	0,67	66,97	0,64	63,75
15	0,07	0,80	79,84	0,6375	63,7506	0,7019	70,1852	0,6375	63,7506	0,6053	60,5333	0,61	60,53	0,61	60,53
No	Lokasi Pressure	z/W = -1/12		z/W = -1/6		z/W = -1/4		z/W = -1/3		z/W = -5/12		z/W = -1/2			
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,18	118,44	1,18	118,44	1,09	108,79	1,09	108,79	1,06	105,58	1,18	118,44		
2	0,93	1,18	118,44	1,18	118,44	1,15	115,23	1,12	112,01	1,12	112,01	1,25	124,88		
3	0,87	1,18	118,44	1,15	115,23	1,15	115,23	1,15	115,23	1,15	115,23	1,28	128,10		
4	0,80	1,18	118,44	1,15	115,23	1,15	115,23	1,12	112,01	1,22	121,66	1,38	137,75		
5	0,73	1,18	118,44	1,09	108,79	1,12	112,01	1,12	112,01	1,25	124,88	1,35	134,53		
6	0,67	1,09	108,79	1,06	105,58	1,12	112,01	1,25	124,88	0,96	95,92	0,89	89,49		
7	0,60	0,93	92,71	1,02	102,36	1,02	102,36	1,12	112,01	0,93	92,71	0,77	76,62		
8	0,53	0,96	95,92	1,09	108,79	0,99	99,14	0,96	95,92	0,77	76,62	0,70	70,19		
9	0,47	0,83	83,05	0,89	89,49	0,83	83,05	0,80	79,84	0,64	63,75	0,57	57,32		
10	0,40	0,77	76,62	0,70	70,19	0,61	60,53	0,54	54,10	0,54	54,10	0,64	63,75		
11	0,33	0,64	63,75	0,61	60,53	0,61	60,53	0,57	57,32	0,57	57,32	0,64	63,75		
12	0,27	0,61	60,53	0,64	63,75	0,64	63,75	0,61	60,53	0,64	63,75	0,67	66,97		
13	0,20	0,64	63,75	0,64	63,75	0,67	66,97	0,67	66,97	0,67	66,97	0,70	70,19		
14	0,13	0,64	63,75	0,64	63,75	0,64	63,75	0,70	70,19	0,73	73,40	0,73	73,40		
15	0,07	0,61	60,53	0,61	60,53	0,64	63,75	0,73	73,40	0,80	79,84	0,83	83,05		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0)															
No	Lokasi Pressure	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	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00	1,01	100,89	0,9554	95,5449	0,9554	95,5449	0,9554	95,5449	0,9822	98,2174	0,98	98,22	0,98	98,22
2	0,93	1,09	108,91	0,9822	98,2174	1,0089	100,8899	0,9822	98,2174	1,0089	100,8899	1,01	100,89	0,98	98,22
3	0,87	1,17	116,92	1,0089	100,8899	0,9822	98,2174	1,0356	103,5624	1,0089	100,8899	0,98	98,22	0,98	98,22
4	0,80	1,28	127,61	1,0891	108,9073	1,0089	100,8899	1,0623	106,2348	0,9822	98,2174	0,98	98,22	0,93	92,87
5	0,73	1,38	138,30	1,1692	116,9247	1,0891	108,9073	1,0089	100,8899	0,9822	98,2174	0,93	92,87	0,93	92,87
6	0,67	1,22	122,27	1,1158	111,5798	1,0089	100,8899	0,9554	95,5449	0,9020	90,2000	0,85	84,86	0,88	87,53
7	0,60	1,12	111,58	1,0089	100,8899	0,9554	95,5449	0,9020	90,2000	0,8218	82,1826	0,74	74,17	0,69	68,82
8	0,53	0,77	76,84	0,8486	84,8550	0,8486	84,8550	0,7417	74,1652	0,6882	68,8202	0,69	68,82	0,74	74,17
9	0,47	0,71	71,49	0,6615	66,1478	0,7149	71,4927	0,6615	66,1478	0,6348	63,4753	0,69	68,82	0,77	76,84
10	0,40	0,74	74,17	0,6615	66,1478	0,6348	63,4753	0,6080	60,8028	0,6615	66,1478	0,71	71,49	0,61	60,80
11	0,33	0,82	82,18	0,7684	76,8376	0,6882	68,8202	0,6882	68,8202	0,6348	63,4753	0,69	68,82	0,61	60,80
12	0,27	0,77	76,84	0,6882	68,8202	0,6882	68,8202	0,6615	66,1478	0,5813	58,1303	0,55	55,46	0,55	55,46
13	0,20	0,69	68,82	0,6615	66,1478	0,5813	58,1303	0,6615	66,1478	0,5546	55,4579	0,55	55,46	0,53	52,79
14	0,13	0,66	66,15	0,6348	63,4753	0,5546	55,4579	0,6080	60,8028	0,5011	50,1129	0,53	52,79	0,53	52,79
15	0,07	0,69	68,82	0,5546	55,4579	0,5813	58,1303	0,5279	52,7854	0,5011	50,1129	0,50	50,11	0,50	50,11
No	Lokasi Pressure	z/W = -1/12		z/W = -1/6		z/W = -1/4		z/W = -1/3		z/W = -5/12		z/W = -1/2			
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	0,98	98,22	0,98	98,22	0,93	92,87	0,90	90,20	0,90	90,20	1,01	100,89		
2	0,93	0,98	98,22	0,98	98,22	0,96	95,54	0,96	95,54	0,93	92,87	1,06	106,23		
3	0,87	0,98	98,22	0,98	98,22	0,98	98,22	0,96	95,54	0,98	98,22	1,06	106,23		
4	0,80	0,98	98,22	0,93	92,87	0,96	95,54	0,93	92,87	0,98	98,22	1,12	111,58		
5	0,73	0,96	95,54	0,88	87,53	0,90	90,20	0,90	90,20	0,98	98,22	1,12	111,58		
6	0,67	0,85	84,86	0,90	90,20	0,88	87,53	1,01	100,89	0,90	90,20	0,90	90,20		
7	0,60	0,77	76,84	0,88	87,53	0,85	84,86	0,88	87,53	0,88	87,53	0,71	71,49		
8	0,53	0,74	74,17	0,88	87,53	0,77	76,84	0,82	82,18	0,69	68,82	0,63	63,48		
9	0,47	0,63	63,48	0,63	63,48	0,58	58,13	0,55	55,46	0,50	50,11	0,50	50,11		
10	0,40	0,58	58,13	0,50	50,11	0,45	44,77	0,42	42,10	0,45	44,77	0,47	47,44		
11	0,33	0,53	52,79	0,50	50,11	0,47	47,44	0,45	44,77	0,47	47,44	0,50	50,11		
12	0,27	0,50	50,11	0,50	50,11	0,50	50,11	0,50	50,11	0,50	50,11	0,58	58,13		
13	0,20	0,53	52,79	0,53	52,79	0,55	55,46	0,53	52,79	0,55	55,46	0,61	60,80		
14	0,13	0,53	52,79	0,53	52,79	0,53	52,79	0,55	55,46	0,58	58,13	0,63	63,48		
15	0,07	0,50	50,11	0,50	50,11	0,53	52,79	0,61	60,80	0,66	66,15	0,71	71,49		

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=0.060)											
No	Lokasi Pressure	z/W = 1/2		z/W = 3/8		z/W = 1/4		z/W = 1/8		z/W = 0	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,3741	137,4084	1,2275	122,7462	1,2275	122,7462
2	0,92					1,7040	170,3983	1,2275	122,7462	1,2641	126,4118
3	0,83					1,5207	152,0706	1,3374	133,7429	1,3008	130,0773
4	0,75	daerah eksitasi				1,4107	141,0740	1,3374	133,7429	1,2641	126,4118
5	0,67	0,97	97,09	1,3374	133,7429	1,5574	155,7362	1,2275	122,7462	1,1542	115,4152
6	0,58	0,97	97,09	1,0075	100,7530	1,1542	115,4152	1,1542	115,4152	1,0442	104,4185
7	0,50	0,90	89,76	0,8976	89,7563	0,9709	97,0874	0,9709	97,0874	0,9342	93,4219
8	0,42	0,90	89,76	0,9342	93,4219	0,9709	97,0874	1,0442	104,4185	0,8976	89,7563
9	0,33	1,15	115,42	1,0442	104,4185	0,9709	97,0874	0,9709	97,0874	1,0808	108,0841
10	0,25	1,15	115,42	1,0075	100,7530	0,8609	86,0908	0,8243	82,4252	0,8609	86,0908
11	0,17	1,01	100,75	0,8976	89,7563	0,8243	82,4252	0,7876	78,7597	0,7509	75,0941
12	0,08	0,97	97,09	0,8609	86,0908	0,7509	75,0941	0,7876	78,7597	0,7509	75,0941
No	Lokasi Pressure	z/W = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,41	141,07	1,63	163,07						
2	0,92	1,30	130,08	1,59	159,40						
3	0,83	1,30	130,08	1,56	155,74						
4	0,75	1,30	130,08	1,59	159,40	daerah eksitasi					
5	0,67	1,12	111,75	1,23	122,75	0,68	67,76	0,71	71,43		
6	0,58	0,93	93,42	0,90	89,76	0,82	82,43	0,79	78,76		
7	0,50	0,79	78,76	0,86	86,09	0,82	82,43	0,71	71,43		
8	0,42	0,93	93,42	0,93	93,42	0,82	82,43	0,82	82,43		
9	0,33	1,01	100,75	0,90	89,76	0,86	86,09	0,86	86,09		
10	0,25	0,90	89,76	0,79	78,76	0,82	82,43	0,93	93,42		
11	0,17	0,79	78,76	0,79	78,76	0,79	78,76	0,90	89,76		
12	0,08	0,75	75,09	0,75	75,09	0,79	78,76	1,01	100,75		

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=0.045)											
No	Lokasi Pressure	z/W = 1/2		z/W = 3/8		z/W = 1/4		z/W = 1/8		z/W = 0	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,3914	139,1423	1,2188	121,8845	1,2534	125,3360
2	0,92					1,7021	170,2064	1,3224	132,2392	1,2879	128,7876
3	0,83					1,5295	152,9486	1,3224	132,2392	1,3224	132,2392
4	0,75	daerah eksitasi				1,4259	142,5939	1,3224	132,2392	1,2879	128,7876
5	0,67	0,91	90,82	1,3569	135,6907	1,5985	159,8517	1,2188	121,8845	1,1153	111,5298
6	0,58	0,94	94,27	0,9772	97,7235	1,1843	118,4329	1,1498	114,9813	1,0463	104,6266
7	0,50	0,91	90,82	0,8737	87,3688	0,9427	94,2719	0,9772	97,7235	0,9427	94,2719
8	0,42	0,91	90,82	0,9082	90,8203	0,9427	94,2719	1,0118	101,1750	0,9082	90,8203
9	0,33	1,05	104,63	1,0118	101,1750	1,0118	101,1750	0,9427	94,2719	1,0118	101,1750
10	0,25	1,05	104,63	0,9772	97,7235	0,8737	87,3688	0,8392	83,9172	0,8392	83,9172
11	0,17	1,01	101,18	0,8737	87,3688	0,8047	80,4656	0,7701	77,0140	0,7701	77,0140
12	0,08	0,94	94,27	0,8392	83,9172	0,7356	73,5625	0,7701	77,0140	0,7356	73,5625
No	Lokasi Pressure	z/W = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,39	139,14	1,63	163,30						
2	0,92	1,32	132,2392	1,60	159,85						
3	0,83	1,29	128,7876	1,53	152,9486						
4	0,75	1,29	128,7876	1,60	159,85	daerah eksitasi					
5	0,67	1,15	114,98	1,53	152,95	0,77	77,01	0,74	73,56		
6	0,58	0,91	90,82	0,91	90,82	0,84	83,92	0,77	77,01		
7	0,50	0,77	77,01	0,87	87,37	0,80	80,47	0,70	70,11		
8	0,42	0,94	94,27	0,91	90,82	0,80	80,47	0,80	80,47		
9	0,33	0,98	97,72	0,87	87,37	0,84	83,92	0,84	83,92		
10	0,25	0,84	83,9172	0,80	80,47	0,80	80,47	0,91	90,82		
11	0,17	0,77	77,0140	0,77	77,01	0,77	77,01	0,87	87,37		
12	0,08	0,74	73,5625	0,77	77,01	0,77	77,01	0,98	97,72		

Vo = 16.7 m/s (Vsc/Vo=0.030)											
No	Lokasi Pressure	z/W = 1/2		z/W = 3/8		z/W = 1/4		z/W = 1/8		z/W = 0	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,3998	139,9797	1,2183	121,8297	1,2183	121,8297
2	0,92					1,6902	169,0196	1,2909	129,0897	1,2909	129,0897
3	0,83					1,5087	150,8696	1,3272	132,7197	1,2909	129,0897
4	0,75					1,3998	139,9797	1,3272	132,7197	1,2546	125,4597
5	0,67	1,04	103,68	1,1094	110,9398	1,5813	158,1296	1,2183	121,8297	1,1457	114,5698
6	0,58	0,96	96,42	1,0368	103,6798	1,1820	118,1997	1,1457	114,5698	1,0731	107,3098
7	0,50	0,89	89,16	0,8916	89,1598	1,0005	100,0498	1,0005	100,0498	0,9279	92,7898
8	0,42	0,93	92,79	0,9279	92,7898	1,0005	100,0498	1,1094	110,9398	0,9279	92,7898
9	0,33	1,18	118,20	1,0368	103,6798	0,9642	96,4198	1,0005	100,0498	1,1094	110,9398
10	0,25	1,18	118,20	1,0368	103,6798	0,8916	89,1598	0,8190	81,8998	0,8553	85,5298
11	0,17	1,04	103,68	0,9279	92,7898	0,8190	81,8998	0,7827	78,2699	0,7827	78,2699
12	0,08	1,00	100,05	0,8553	85,5298	0,7827	78,2699	0,7827	78,2699	0,7464	74,6399
daerah eksitasi											
5	0,67	1,15	114,57	1,04	103,68	0,64	63,75	0,75	74,64		
6	0,58	0,96	96,42	0,86	85,53	0,82	81,90	0,78	78,27		
7	0,50	0,78	78,27	0,86	85,53	0,86	85,53	0,75	74,64		
8	0,42	0,93	92,79	0,93	92,79	0,82	81,90	0,86	85,53		
9	0,33	1,04	103,68	0,93	92,79	0,86	85,53	0,89	89,16		
10	0,25	0,89	89,16	0,82	81,90	0,82	81,90	0,93	92,79		
11	0,17	0,78	78,27	0,78	78,27	0,78	78,27	0,89	89,16		
12	0,08	0,78	78,27	0,78	78,27	0,78	78,27	1,00	100,05		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0.072)											
No	Lokasi Pressure	z/W = 1/2		z/W = 3/8		z/W = 1/4		z/W = 1/8		z/W = 0	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,2093	120,9253	1,0532	105,3215	1,0532	105,3215
2	0,92					1,4901	149,0122	1,1156	111,5630	1,1156	111,5630
3	0,83					1,3341	133,4083	1,1468	114,6838	1,1156	111,5630
4	0,75					1,2093	120,9253	1,1468	114,6838	1,0844	108,4422
5	0,67	0,80	80,36	1,1468	114,6838	1,3341	133,4083	1,0220	102,2007	0,9596	95,9592
6	0,58	0,80	80,36	0,8348	83,4761	0,9596	95,9592	0,9596	95,9592	0,8660	86,5969
7	0,50	0,77	77,23	0,7411	74,1139	0,8036	80,3554	0,8036	80,3554	0,7723	77,2346
8	0,42	0,77	77,23	0,7723	77,2346	0,8036	80,3554	0,8660	86,5969	0,7723	77,2346
9	0,33	0,96	95,96	0,8660	86,5969	0,8348	83,4761	0,8036	80,3554	0,8660	86,5969
10	0,25	0,93	92,84	0,8660	86,5969	0,7411	74,1139	0,7099	70,9931	0,7099	70,9931
11	0,17	0,87	86,60	0,7411	74,1139	0,6787	67,8723	0,6475	64,7516	0,6475	64,7516
12	0,08	0,83	83,48	0,7099	70,9931	0,6475	64,7516	0,6475	64,7516	0,6163	61,6308
daerah eksitasi											
5	0,67	0,96	95,96	1,05	105,32	0,59	58,51	0,65	64,75		
6	0,58	0,77	77,23	0,74	74,11	0,68	67,87	0,65	64,75		
7	0,50	0,68	67,87	0,74	74,11	0,71	70,99	0,59	58,51		
8	0,42	0,80	80,36	0,77	77,23	0,68	67,87	0,68	67,87		
9	0,33	0,83	83,48	0,74	74,11	0,71	70,99	0,74	74,11		
10	0,25	0,71	70,99	0,68	67,87	0,68	67,87	0,77	77,23		
11	0,17	0,65	64,75	0,68	67,87	0,65	64,75	0,74	74,11		
12	0,08	0,65	64,75	0,65	64,75	0,65	64,75	0,83	83,48		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0.054)											
No	Lokasi Pressure	z/W = 1/2		z/W = 3/8		z/W = 1/4		z/W = 1/8		z/W = 0	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,2060	120,6023	1,0561	105,6144	1,0561	105,6144
2	0,92					1,5058	150,5780	1,1161	111,6096	1,1161	111,6096
3	0,83					1,3259	132,5926	1,1461	114,6072	1,1161	111,6096
4	0,75					1,2060	120,6023	1,1461	114,6072	1,0861	108,6120
5	0,67	0,82	81,63	1,1760	117,6047	1,3559	135,5902	0,9962	99,6193	0,9063	90,6265
6	0,58	0,85	84,63	0,8463	84,6314	0,9962	99,6193	0,9362	93,6241	0,8463	84,6314
7	0,50	0,79	78,64	0,7564	75,6387	0,7864	78,6363	0,8163	81,6338	0,8163	81,6338
8	0,42	0,79	78,64	0,7864	78,6363	0,7864	78,6363	0,8763	87,6290	0,8163	81,6338
9	0,33	0,91	90,63	0,8763	87,6290	0,8763	87,6290	0,8163	81,6338	0,8463	84,6314
10	0,25	0,91	90,63	0,8463	84,63	0,7264	72,6411	0,7264	72,6411	0,6665	66,6460
11	0,17	0,85	84,63	0,7564	75,6387	0,6665	66,6460	0,6665	66,6460	0,6365	63,6484
12	0,08	0,82	81,63	0,7264	72,6411	0,6365	63,6484	0,6365	63,6484	0,6365	63,6484
		daerah eksitasi									
No	Lokasi Pressure	z/W = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,21	120,60	1,45	144,58						
2	0,92	1,15	114,61	1,39	138,59						
3	0,83	1,12	111,61	1,36	135,59						
4	0,75	1,09	108,61	1,39	138,59						
5	0,67	0,94	93,62	1,51	150,58	0,79	78,64	0,73	72,64		
6	0,58	0,76	75,64	0,79	78,64	0,79	78,64	0,73	72,64		
7	0,50	0,76	75,64	0,76	75,64	0,70	69,64	0,61	60,65		
8	0,42	0,79	78,64	0,73	72,64	0,67	66,65	0,67	66,65		
9	0,33	0,79	78,64	0,73	72,64	0,70	69,64	0,73	72,64		
10	0,25	0,70	69,64	0,67	66,6460	0,70	69,64	0,79	78,64		
11	0,17	0,67	66,6460	0,67	66,6460	0,64	63,6484	0,73	72,64		
12	0,08	0,64	63,6484	0,64	63,6484	0,64	63,6484	0,85	84,63		

Vo = 13.9 m/s (Vsc/Vo=0.036)											
No	Lokasi Pressure	z/W = 1/2		z/W = 3/8		z/W = 1/4		z/W = 1/8		z/W = 0	
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,1951	119,5140	1,0413	104,1343	1,0721	107,2103
2	0,92					1,4720	147,1973	1,1336	113,3621	1,1029	110,2862
3	0,83					1,3182	131,8177	1,1336	113,3621	1,1029	110,2862
4	0,75					1,1951	119,5140	1,1336	113,3621	1,0721	107,2103
5	0,67	0,86	85,68	0,9183	91,8306	1,3797	137,9695	1,0413	104,1343	0,9798	97,9825
6	0,58	0,83	82,60	0,8875	88,7547	0,9798	97,9825	0,9491	94,9065	0,8875	88,7547
7	0,50	0,76	76,45	0,7338	73,3750	0,8260	82,6028	0,8568	85,6788	0,7953	79,5269
8	0,42	0,76	76,45	0,7953	79,5269	0,8568	85,6788	0,9491	94,9065	0,7953	79,5269
9	0,33	1,01	101,06	0,8875	88,7547	0,8260	82,6028	0,8260	82,6028	0,9183	91,8306
10	0,25	1,01	101,06	0,8875	88,7547	0,7338	73,3750	0,7030	70,2991	0,7030	70,2991
11	0,17	0,89	88,75	0,7645	76,4510	0,7030	70,2991	0,6722	67,2232	0,6722	67,2232
12	0,08	0,86	85,68	0,7338	73,3750	0,6415	64,1473	0,6722	67,2232	0,6415	64,1473
		daerah eksitasi									
No	Lokasi Pressure	z/W = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
	Tap (y/H)	IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,20	119,51	1,44	144,12						
2	0,92	1,13	113,36	1,38	137,97						
3	0,83	1,10	110,29	1,41	141,05						
4	0,75	1,10	110,29	1,35	134,89						
5	0,67	0,95	94,91	0,86	85,68	0,55	54,92	0,61	61,07		
6	0,58	0,80	79,53	0,70	70,30	0,70	70,30	0,67	67,22		
7	0,50	0,64	64,15	0,73	73,38	0,70	70,30	0,61	61,07		
8	0,42	0,80	79,53	0,80	79,53	0,70	70,30	0,70	70,30		
9	0,33	0,86	85,68	0,76	76,45	0,73	73,38	0,73	73,38		
10	0,25	0,73	73,38	0,67	67,22	0,70	70,30	0,80	79,53		
11	0,17	0,67	67,22	0,67	67,22	0,67	67,22	0,76	76,45		
12	0,08	0,64	64,15	0,64	64,15	0,67	67,22	0,86	85,68		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0.090)											
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	
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					0,9881	98,8098	0,8847	88,4730	0,8847	88,4730
2	0,92					1,2724	127,2359	0,9364	93,6414	0,9106	91,0572
3	0,83					1,1431	114,3149	0,9623	96,2256	0,9364	93,6414
4	0,75	daerah eksitasi				1,0139	101,3940	0,9364	93,6414	0,9106	91,0572
5	0,67	0,68	67,80	0,9364	93,6414	1,0656	106,5623	0,8330	83,3047	0,7297	72,9679
6	0,58	0,70	70,38	0,6780	67,7995	0,7814	78,1363	0,7555	75,5521	0,6780	67,7995
7	0,50	0,65	65,22	0,6263	62,6312	0,6522	65,2153	0,6522	65,2153	0,6263	62,6312
8	0,42	0,65	65,22	0,6522	65,2153	0,6522	65,2153	0,7297	72,9679	0,6780	67,7995
9	0,33	0,81	80,72	0,7555	75,5521	0,7038	70,3837	0,6780	67,7995	0,7038	70,3837
10	0,25	0,83	83,30	0,7297	72,9679	0,6005	60,0470	0,6005	60,0470	0,5746	57,4628
11	0,17	0,73	72,97	0,6263	62,6312	0,5746	57,4628	0,5488	54,8786	0,5229	52,2944
12	0,08	0,70	70,38	0,6005	60,0470	0,5229	52,2944	0,5488	54,8786	0,5229	52,2944
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/W = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,01	101,39	1,25	124,65						
2	0,92	0,94	93,64	1,17	116,90						
3	0,83	0,94	93,64	1,19	119,48						
4	0,75	0,88	88,47	1,17	116,90	daerah eksitasi					
5	0,67	0,76	75,55	1,04	103,98	0,57	57,46	0,63	62,63		
6	0,58	0,60	60,05	0,63	62,63	0,63	62,63	0,60	60,05		
7	0,50	0,60	60,05	0,63	62,63	0,60	60,05	0,52	52,29		
8	0,42	0,65	65,22	0,63	62,63	0,55	54,88	0,55	54,88		
9	0,33	0,65	65,22	0,60	60,05	0,57	57,46	0,60	60,05		
10	0,25	0,57	57,46	0,55	54,88	0,57	57,46	0,65	65,22		
11	0,17	0,55	54,88	0,55	54,88	0,55	54,88	0,63	62,63		
12	0,08	0,52	52,29	0,52	52,29	0,55	54,88	0,70	70,38		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0.068)											
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	
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,0030	100,2995	0,8758	87,5762	0,9012	90,1209
2	0,92					1,2829	128,2907	0,9521	95,2102	0,9267	92,6655
3	0,83					1,1302	113,0228	0,9521	95,2102	0,9521	95,2102
4	0,75	daerah eksitasi				1,0030	100,2995	0,9521	95,2102	0,9012	90,1209
5	0,67	0,67	67,22	1,0030	100,2995	1,0793	107,9334	0,8249	82,4869	0,7485	74,8529
6	0,58	0,70	69,76	0,6976	69,7636	0,8249	82,4869	0,7485	74,8529	0,7485	74,8529
7	0,50	0,67	67,22	0,6213	62,1297	0,6467	64,6743	0,6722	67,2190	0,7485	74,8529
8	0,42	0,65	64,67	0,6467	64,6743	0,6722	67,22	0,7231	72,3083	0,6976	69,7636
9	0,33	0,80	79,94	0,7485	74,8529	0,7231	72,3083	0,6722	67,2190	0,6722	67,2190
10	0,25	0,80	79,94	0,7231	72,31	0,6213	62,1297	0,6213	62,1297	0,5450	54,4957
11	0,17	0,72	72,31	0,6213	62,1297	0,5704	57,0403	0,5450	54,4957	0,5195	51,9510
12	0,08	0,70	69,76	0,5958	59,5850	0,5195	51,9510	0,5450	54,4957	0,5195	51,9510
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/W = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,03	102,84	1,23	123,20						
2	0,92	0,95	95,2102	1,16	115,57						
3	0,83	0,93	92,6655	1,18	118,11						
4	0,75	0,90	90,1209	1,18	118,11	daerah eksitasi					
5	0,67	0,75	74,85	1,23	123,20	0,70	69,76	0,82	82,49		
6	0,58	0,70	69,76	0,72	72,31	0,70	69,76	0,65	64,67		
7	0,50	0,65	64,67	0,67	67,22	0,62	62,13	0,54	54,50		
8	0,42	0,62	62,1297	0,57	57,04	0,54	54,50	0,54	54,50		
9	0,33	0,62	62,13	0,57	57,04	0,60	59,58	0,62	62,13		
10	0,25	0,54	54,4957	0,54	54,4957	0,57	57,04	0,65	64,67		
11	0,17	0,54	54,4957	0,54	54,4957	0,54	54,50	0,62	62,13		
12	0,08	0,52	51,9510	0,52	51,9510	0,54	54,50	0,70	69,76		

Vo = 11.1 m/s (Vsc/Vo=0.045)											
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	
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)	
1	1,00					1,0029	100,2896	0,8757	87,5681	0,9011	90,1124
2	0,92					1,2573	125,7325	0,9520	95,2010	0,9266	92,6567
3	0,83					1,1301	113,0110	0,9520	95,2010	0,9266	92,6567
4	0,75	daerah eksitasi				1,0029	100,2896	0,9520	95,2010	0,9011	90,1124
5	0,67	0,72	72,30	0,7230	72,3023	1,0792	107,9225	0,8502	85,0238	0,7994	79,9352
6	0,58	0,67	67,21	0,7230	72,3023	0,7739	77,3909	0,7739	77,3909	0,7230	72,3023
7	0,50	0,62	62,13	0,5958	59,5808	0,6721	67,2137	0,6976	69,7580	0,6213	62,1251
8	0,42	0,62	62,13	0,6213	62,1251	0,6976	69,7580	0,7739	77,3909	0,6467	64,6694
9	0,33	0,82	82,48	0,7230	72,3023	0,6467	64,6694	0,6467	64,6694	0,7230	72,3023
10	0,25	0,85	85,02	0,7230	72,3023	0,5958	59,5808	0,5704	57,0365	0,5704	57,0365
11	0,17	0,75	74,85	0,6213	62,1251	0,5704	57,0365	0,5449	54,4922	0,5449	54,4922
12	0,08	0,70	69,76	0,5958	59,5808	0,5449	54,4922	0,5449	54,4922	0,5195	51,9480
No	Lokasi Pressure Tap (y/H)	z/W = -1/8		z/W = -1/4		z/W = -3/8		z/W = -1/2			
		IT (%)		IT (%)		IT (%)		IT (%)			
1	1,00	1,00	100,29	1,23	123,19						
2	0,92	0,93	92,66	1,16	115,56						
3	0,83	0,93	92,66	1,23	123,19						
4	0,75	0,90	90,11	1,16	115,56	daerah eksitasi					
5	0,67	0,77	77,39	0,44	44,32	0,44	44,32	0,54	54,49		
6	0,58	0,65	64,67	0,54	54,49	0,54	54,49	0,54	54,49		
7	0,50	0,54	54,49	0,57	57,04	0,57	57,04	0,52	51,95		
8	0,42	0,65	64,67	0,57	57,04	0,57	57,04	0,57	57,04		
9	0,33	0,70	69,76	0,62	62,13	0,60	59,58	0,62	62,13		
10	0,25	0,60	59,58	0,54	54,49	0,57	57,04	0,65	64,67		
11	0,17	0,54	54,49	0,54	54,49	0,54	54,49	0,62	62,13		
12	0,08	0,52	51,95	0,54	54,49	0,54	54,49	0,62	62,13		

Lampiran 4. Data Gaya *Drag* Eksperimen (gr)

Tanpa Eksitasi (gr)				Dengan Eksitasi kec. hisapan 0.5 m/s (gr)			
No	40	50	60	No	40	50	60
1	59	82	90	1	36	69	86
2	59	79	95	2	46	63	88
3	60	71	105	3	41	63	82
4	58	82	100	4	39	65	88
5	52	75	84	5	32	67	83
6	56	67	90	6	40	59	83
7	63	66	101	7	48	54	84
8	48	67	101	8	38	70	99
9	50	53	86	9	33	67	93
10	53	79	87	10	41	68	88
11	56	67	85	11	40	66	96
12	56	69	86	12	36	67	87
13	43	76	85	13	42	58	86
14	50	69	97	14	37	66	86
15	48	76	90	15	47	68	86
16	48	71	103	16	43	71	83
17	40	72	93	17	43	77	91
18	41	74	90	18	49	67	78
19	54	67	85	19	39	66	90
20	52	67	94	20	48	70	90
21	53	68	94	21	51	70	82
22	52	72	82	22	44	68	88
23	60	77	96	23	53	61	88
24	53	64	89	24	44	71	89
25	53	71	91	25	38	71	99
26	51	62	93	26	51	64	99
27	49	67	87	27	58	67	92
28	45	73	89	28	42	77	90
29	45	67	101	29	38	59	94
30	58	75	93	30	48	68	90
31	44	68	93	31	48	63	88
32	55	73	90	32	58	67	91
33	56	70	98	33	52	49	88
34	58	82	96	34	50	67	78
35	46	74	96	35	44	69	84
36	48	75	92	36	53	65	94
37	55	78	95	37	44	63	83
38	50	75	94	38	44	71	89
39	50	72	91	39	50	67	94
40	59	71	94	40	47	63	92
41	43	67	102	41	40	69	94
42	43	71	102	42	46	67	90
43	50	77	100	43	54	72	85
44	48	68	105	44	48	77	78
45	44	73	92	45	44	70	98
46	43	74	84	46	52	72	95
47	42	71	96	47	44	59	88
48	61	72	94	48	39	71	100
49	56	78	90	49	42	69	86
50	44	77	100	50	39	63	104

Dengan Eksitasi kec. hisapan 0.75 m/s (gr)				Dengan Eksitasi kec. hisapan 1 m/s (gr)			
No	40	50	60	No	40	50	60
1	49	67	91	1	50	53	75
2	46	79	89	2	62	54	83
3	42	71	87	3	52	47	85
4	41	59	87	4	53	50	89
5	47	60	90	5	47	67	75
6	54	76	90	6	47	71	73
7	44	65	78	7	46	60	79
8	49	69	83	8	59	66	74
9	45	75	85	9	53	75	74
10	48	56	86	10	52	54	74
11	34	62	94	11	52	56	72
12	44	58	86	12	58	58	71
13	42	72	88	13	48	59	73
14	52	66	88	14	52	58	72
15	41	61	90	15	62	63	83
16	43	65	94	16	46	57	75
17	48	69	84	17	52	57	72
18	46	69	89	18	48	65	75
19	45	68	89	19	38	63	77
20	48	63	78	20	44	68	73
21	40	61	88	21	51	60	89
22	45	75	86	22	47	59	75
23	46	62	85	23	50	60	85
24	48	64	86	24	44	58	83
25	43	68	86	25	41	67	81
26	51	69	88	26	42	54	81
27	41	66	80	27	46	62	74
28	54	70	86	28	44	54	78
29	45	71	88	29	44	57	85
30	40	62	80	30	43	51	77
31	39	62	102	31	43	57	79
32	52	81	84	32	39	52	75
33	40	64	94	33	41	76	73
34	49	63	90	34	43	69	72
35	52	67	94	35	48	64	72
36	52	58	91	36	50	62	75
37	59	67	90	37	39	65	81
38	50	67	88	38	45	64	75
39	46	74	90	39	31	67	79
40	43	62	87	40	39	60	79
41	58	66	98	41	43	53	83
42	51	52	97	42	47	60	81
43	56	61	88	43	37	61	71
44	59	63	80	44	41	58	73
45	42	66	89	45	50	57	86
46	60	70	91	46	42	57	86
47	60	68	94	47	35	69	82
48	46	69	92	48	51	65	83
49	50	58	97	49	45	50	75
50	54	72	92	50	55	56	83