



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PIV PENGARUH KONTROL AKTIF ALIRAN
SYNTHETIC JET PADA MEDAN ALIRAN LUAR DI SEKITAR MODEL
*BLUFF BODY***

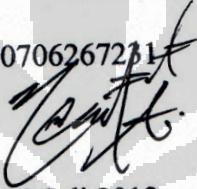
SKRIPSI

**NANDA SETIADJI
0706267231**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2012**

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 : Nanda Setiadji
NPM : 0706267231
Tanda Tangan : 
Tanggal : 20 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Nanda Setiadji
NPM : 0706267231
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Studi PIV Pengaruh Kontrol Aktif Aliran *Synthetic Jet* Pada Medan Aliran Luar Di Sekitar Model Bluff 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 : Prof. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng



Penguji 1 : Ir. Warjito M.Sc Ph.D



Penguji 2 : Dr.Ir. Engkos A. Kosasih M.T.



Penguji 3 : Dr. Ir. Imansyah Ibnu Hakim, M.Eng



Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)
Tanggal : 20 Juli 2012

KATA PENGANTAR

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

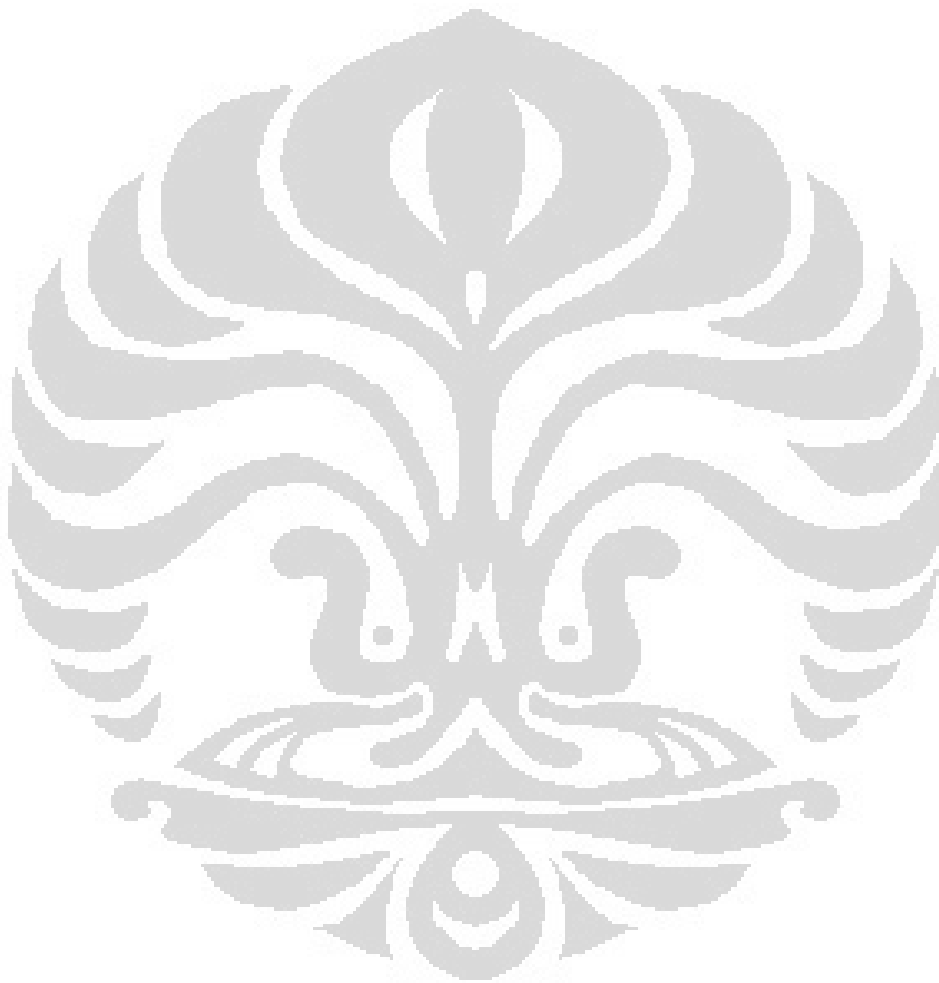
1. Prof. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng, selaku Dosen Pembimbing dari Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan waktu, tenaga, dan pikiran serta membimbing penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Orang tua penulis, yang selalu memberikan doa dan semangat serta menjadi alasan utama penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Rustan Tarakka, ST.MT. dan Sabar Simanungkalit, ST. yang tergabung dalam penelitian ini dan banyak membantu serta membimbing penulis dalam melakukan penelitian.
4. Teman-teman Kost Sumber Rezeki, M. Novel Hidayat, Daniel Alfonso, dan Indra Setiawan yang telah memberikan iklim yang kondusif bagi penulis baik untuk menyelesaikan skripsi ini maupun untuk mengisi waktu luang.
5. Teman-teman lab mekanika fluida, Bapak Udiyono, yang telah banyak memberikan bantuan dan saran serta motivasi dalam mengerjakan skripsi.
6. Seluruh teman-teman Teknik Mesin 2007, Teknik Mesin 2008 dan semua pihak yang telah berkontribusi membantu dan mendukung penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik maupun saran yang membangun sangat penulis harapkan agar bisa menjadi yang lebih baik kedepannya. Akhir kata semoga apa yang sudah diberikan dan

dihasilkan dari skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, Juni 2012

Penulis



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

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

Nama : Nanda Setiadji
NPM : 0706267231
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 :

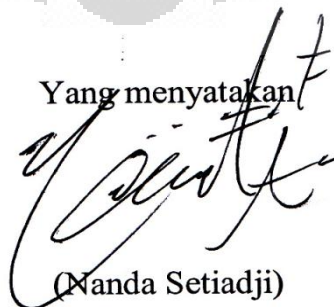
**STUDI PIV PENGARUH KONTROL AKTIF ALIRAN
SYNTHETIC JET PADA MEDAN ALIRAN LUAR DI SEKITAR MODEL
*BLUFF BODY***

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 : 20 Juli 2012

Yang menyatakan



(Nanda Setiadji)

ABSTRAK

Nama : Nanda Setiadji
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Studi PIV Pengaruh Kontrol Aktif Aliran *Synthetic Jet* pada Medan Aliran Luar di Sekitar Model *Bluff Body*

Penggunaan kontrol aktif aliran merupakan salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengurangi drag aerodinamika pada kendaraan. Efek yang dihasilkan adalah penundaan daerah separasi aliran dan olakan yang terjadi pada kendaraan, khususnya pada bagian belakang. Pada penelitian ini, kontrol aktif aliran berupa *synthetic jet* digunakan pada model *reversed Ahmed body* yang dianggap paling mendekati model van keluarga yang banyak digunakan di Indonesia. Penelitian dilakukan dengan pendekatan eksperimental menggunakan PIV. Pengukuran menggunakan PIV difokuskan pada bagian belakang bidang vertikal dari *reversed Ahmed body*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penambahan kontrol aliran *synthetic jet*, terlihat dua resirkulasi yang lebih terlihat *simetris* dibandingkan dengan tanpa kontrol aliran yang berbentuk *asimetris* dan didominasi oleh resirkulasi dari bagian bawah *reversed Ahmed body*. Pengaruh penambahan *synthetic jet* yang dapat terlihat adalah pengurangan besar daerah olakan (*wake*) dan penggeseran resirkulasi ke arah model *reversed Ahmed body*.

Kata kunci : PIV, kontrol aktif aliran, *synthetic jet*, *reversed Ahmed body*, separasi aliran, olakan.

ABSTRACT

Name : Nanda Setiadji
Program Studi : Mechanical Engineering
Title : PIV Studies of *Synthetic Jet* Effect as Active Flow Control on Flow Field around *Bluff Model*.

The use of active flow control is one of the useful way to reduce aerodynamics drag in vehicle. It provides the possibility to delay the position of flow separation and wake around the vehicle. In this study, *synthetic jet* as active control flow used in reversed Ahmed body, which was considered as the closest model of family van that is widely used in Indonesia. Methods in this study was experimental method use PIV, the measurement using PIV were carried out in vertical plane at rear of *reversed Ahmed body*. Result shows that *synthetic jet* as active flow control makes the influence of flow field, two wake region which used asimetric and dominated by wake region from below reversed Ahmed body become looked like symetric. The effect from adding synthetic jet actuator also reduce wake region and moving wake region closer to reversed Ahmed body.

Keywords :

PIV, Active flow control, synthetic jet ,reversed Ahmed body, flow separation, wake.

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	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
2. LANDASAN TEORI	5
2.1 Aliran fluida	5
2.2 Medan kecepatan aliran	6
2.3 Garis arus	7
2.4 Vortisitas	8
2.5 Lapisan batas, separasi aliran dan Intensitas Turbulensi	9
2.5.1 Lapisan batas	9
2.5.2 Separasi aliran	10
2.5.3 Intensitas Turbulensi	11
2.6 Terowongan Angin	11
2.7 PIV (Particle Image Velocimetry)	13
2.7.1 Metode PIV	13
2.7.2 Pergerakan partikel pada fluida bergerak dan aplikasinya pada PIV	14
2.7.3 Pengolahan Gambar	14
2.8 Model <i>bluff body</i> kendaraan	16
2.9 Modus kontrol aliran	17
2.10 <i>Synthetic jet</i>	18
3. METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1 Diagram Alir Penelitian	20
3.2 Fasilitas dan Peralatan Lab Pengujian	23
3.2.1 Terowongan angin (<i>wind tunnel</i>)	23
3.2.2 Sistem PIV	25

3.2.2.1 <i>Double- cavity Nd:YAG laser</i>	25
3.2.2.2 Kamera <i>cross-correlation</i>	26
3.2.2.3 <i>Personal computer</i>	27
3.2.3 Peralatan	27
3.2.3.1 <i>Hot wire</i>	27
3.2.3.2 <i>Synthetic jet actuator</i>	29
3.3 Prosedur pengujian	30
3.3.1 persiapan model uji.....	30
3.3.2 Kalibrasi.....	30
3.3.3 Pengambilan gambar PIV	31
3.3.4 Pengolahan gambar PIV	31
3.3.4.1 Pemilihan metode korelasi	31
3.3.4.2 Diagram alir pengolahan gambar	33
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 <i>Streamlines</i>	39
4.1.1 <i>Streamlines</i> tanpa kontrol aliran	39
4.1.1 <i>Streamlines</i> dengan kontrol aliran <i>synthetic jet</i>	43
4.2 Vortisitas	48
4.2.1 Vortisitas tanpa kontrol aliran.....	48
4.2.2 Vortisitas dengan kontrol aliran <i>synthetic jet</i>	50
4.3 Intensitas turbulensi	53
4.3.1 Intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran	53
4.3.2 Intensitas turbulensi dengan kontrol aliran <i>synthetic jet</i>	55
4.4 Profil kecepatan	57
4.4.1 Profil kecepatan tanpa kontrol aliran	57
4.4.2 Profil kecepatan dengan kontrol aliran <i>synthetic jet</i>	59
5. PENUTUP	62
5.1 Kesimpulan.....	62
5.2 Saran	63
DAFTAR REFERENSI	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Aliran laminar dan turbulen.....	6
Gambar 2.2	Tempat kedudukan partikel yang dinyatakan dengan vektor posisi	7
Gambar 2.3	Aliran melalui pelat miring	8
Gambar 2.4	Lapisan batas di sepanjang pelat rata	9
Gambar 2.5	Separasi aliran yang terjadi pada silinder	10
Gambar 2.6	Bagian-bagian terowongan angin.....	12
Gambar 2.7	Ilustrasi PIV pada <i>wind tunnel</i>	14
Gambar 2.8	Analisis <i>auto-correlation</i>	17
Gambar 2.9	Fungsi <i>cross-correlation</i>	18
Gambar 2.10	Skema model <i>Ahmed body</i>	20
Gambar 2.11	Konsep dasar kontrol aliran aktif <i>synthetic jet</i>	20
Gambar 2.12	Sketsa dari <i>synthetic jet</i>	20
Gambar 3.1	Perbandingan <i>Ahmed body</i> dengan model eksperimen	23
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian.....	24
Gambar 3.3	Model dengan penambahan modus kontrol aktif <i>synthetic jet</i>	25
Gambar 3.4	Terowongan angin dan sistem PIV	25
Gambar 3.5	Terowongan angin <i>sub-sonic</i> yang digunakan pada penelitian	26
Gambar 3.6	Motor DC dan unit kontrol penggerak <i>blower axial</i>	27
Gambar 3.7	Pengukuran kecepatan dalam seksi uji dengan <i>hot wire</i>	28
Gambar 3.8	<i>Double cavity Nd:YAG laser</i>	29
Gambar 3.9	<i>Progressiv- scan interline CCD chip</i>	30
Gambar 3.10	<i>Personal computer</i>	30
Gambar 3.11	Skema elektrikal CTA	31
Gambar 3.12	<i>Hot Wire</i>	31
Gambar 3.13	Geometri <i>synthetic jet X-Flow 30</i>	30
Gambar 3.14	Penempatan model uji di terowongan angi.....	33
Gambar 3.15	Kalibrasi.....	34
Gambar 3.16	Hasil vektor <i>cross-correlation vs adaptive-correlation</i>	35
Gambar 3.17	Diagram alir pengolahan data gambar PIV	35
Gambar 3.18	<i>Vector Statistic</i>	36

Gambar 3.19	<i>Streamlines window option</i>	36
Gambar 3.20	<i>Vorticity window option</i>	36
Gambar 3.21	<i>Profile plot</i>	36
Gambar 4.1	Streamlines rata-rata tanpa kontrol aliran di belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $Z=0$	39
Gambar 4.2	Streamlines rata-rata dengan kontrol aliran <i>synthetic jet</i> di belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $Z=0$	39
Gambar 4.3	Streamlines dengan <i>synthetic jet</i> $u_{sj}=2.0\text{m/s}$ di belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $Z=0.5$	39
Gambar 4.4	Vortisitas tanpa kontrol aliran di belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $Z=0$	49
Gambar 4.5	Vortisitas dengan kontrol aliran <i>synthetic jet</i> di belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $Z=0$	51
Gambar 4.6	Intensitas Turbulensi pada $z=0$ tanpa kontrol aliran	54
Gambar 4.7	Intensitas Turbulensi pada $z=0.5$ dengan <i>synthetic jet</i>	55
Gambar 4.8	Profil Kecepatan tanpa kontrol aktif aliran	58
Gambar 4.9	Profil Kecepatan dengan kontrol aktif aliran <i>synthetic jet</i>	59

DAFTAR TABEL

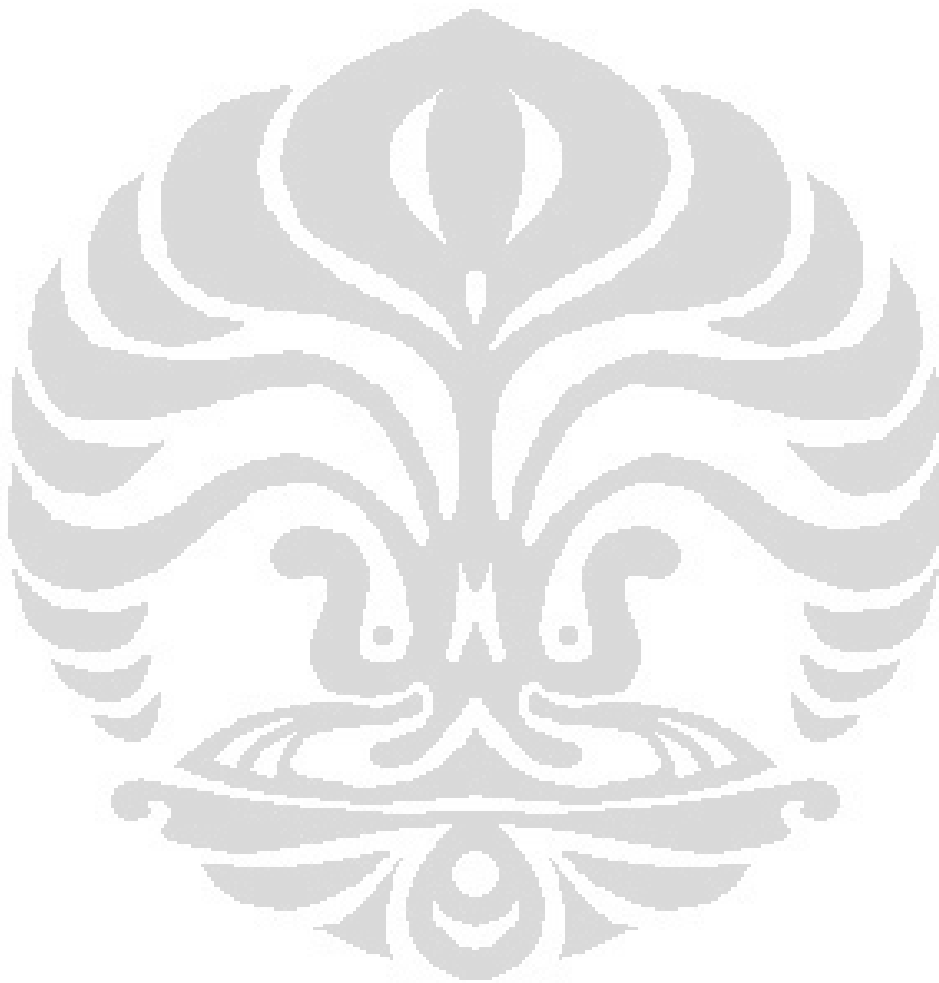
Tabel 4.1	Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $z = 0$	38
Tabel 4.2	Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	38
Tabel 4.3	Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$	39
Tabel 4.4	panjang vortisitas positif tanpa kontrol aliran di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0$	48
Tabel 4.5	panjang vortisitas positif dengan <i>synthetic jet</i> di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0$	48
Tabel 4.6	Pengurangan vortisitas positif akibat penambahan kontrol aktif <i>synthetic jet</i>	50
Tabel 4.7	panjang vortisitas positif dengan <i>synthetic jet</i> pada bidang $z = 0$	50
Tabel 4.8	Pengurangan vortisitas negatif akibat penambahan kontrol aktif <i>synthetic jet</i>	51

DAFTAR NOTASI

D	= Diameter pipa (m)
ρ	= Massa jenis fluida (kg/m^3)
μ	= Viskositas dinamik (Ns/m^2)
V	= kecepatan rata-rata dari fluida mengalir (m/s)
Re	= Bilangan Reynolds
U_o	= Kecepatan <i>upstream</i> (m/s)
U_{sj}	= Kecepatan <i>synthetic jet</i> (m/s)
P_o	= Tekanan <i>streamline</i> atau garis arus (Pa)
U_0	= Kecepatan <i>Upstream</i>
u	= Komponen kecepatan arah horizontal (m/s)
v	= Komponen kecepatan arah vertikal (m/s)
Gb.	= Gambar

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Model <i>Reversed Ahmed body</i>	66
------------	--	----



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global merupakan salah satu permasalahan utama dalam beberapa tahun belakangan ini. Pemerintah berkomitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 26% pada 2020 dari jumlah emisi yang saat ini sebesar 2,1 gigaton. Hal tersebut tertuang dalam Peraturan Presiden No.61/2011 tentang Rencana Aksi Nasional Gas Rumah Kaca. Adanya efek rumah kaca ini akan memberikan pengaruh yang sangat buruk terhadap lingkungan dan iklim global. Seperti yang telah diketahui, aktivitas manusia memberikan dampak yang cukup besar terhadap emisi gas dengan efek rumah kaca ini. Hal ini dibuktikan oleh *Rencana Aksi Gas Rumah Kaca, Maret 2012*, yang menyatakan dalam laporannya bahwa aktivitas manusia berada di urutan pertama penyebab efek rumah kaca dan peningkatan temperature pada abad ke 20.

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

Oleh karena permasalahan tersebut, telah menjadi suatu keharusan bagi industri otomotif untuk memproduksi kendaraan yang ramah lingkungan dan efisien dalam penggunaan bahan bakar. Penggunaan bahan bakar pada kendaraan berhubungan dengan gaya drag aerodinamika, dimana tergantung pada separasi aliran yang terjadi sepanjang bentuk kendaraan. Secara umum, untuk mengurangi

gaya drag, terdapat tiga metode yang dapat dilakukan yaitu memodifikasi aliran secara lokal, memindahkan atau menunda posisi separasi atau, dan mengurangi berkembangnya zona resirkulasi dibagian belakang dari struktur pusaran yang terseparasi (*separated swirling structures*). Metode-metode tersebut dapat dilakukan terutama dengan mengontrol aliran di dekat dinding dengan atau tanpa pemberian energi tambahan berupa sistem kontrol aktif dan pasif.

Dalam penelitian ini, penulis mengkaji visualisasi penerapan kontrol aktif aliran dengan modus *synthetic jet* melalui pendekatan eksperimen menggunakan teknik PIV (*particle image velocimetry*) terhadap model kendaraan keluarga yang disederhanakan (*simplified family car reverse Ahmed body*).

1.2 Perumusan Masalah

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

Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan kontrol aktif berupa *synthetic jet* terhadap medan aliran, intensitas turbulensi, dan koefisien drag pada *reversed Ahmed Body* dengan melakukan variasi pada kecepatan *upstream*. Pada kecepatan udara keluar-masuk *nozzle dari synthetic jet* actuator yang telah ditentukan sebelumnya.

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui dan menganalisis medan kecepatan aliran pada model *reversed Ahmed body*.
2. Mengetahui dan menganalisis *vortisitas* pada bagian belakang *reversed Ahmed body*.
3. Mengetahui dan menganalisis profil kecepatan pada bagian belakang *reversed Ahmed body*.
4. Mengetahui dan menganalisis intensitas turbulensi pada bagian belakang *reversed Ahmed body*.

- Mengetahui pengaruh penambahan kontrol aktif aliran berupa *synthetic jet* terhadap pola, medan kecepatan aliran, vortisitas, dan intensitas turbulensi pada model *reversed Ahmed body*.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini diambil batasan masalah berdasarkan kondisi sebagai berikut :

- Udara dianggap sebagai fluida tak mampu mampat dan mengalir secara seragam.
- Reversed Ahmed body* memiliki dimensi seperempat kali dari *Ahmed body* versi original. Sehingga memiliki geometri dengan dimensi panjang ($l=0,261$ m), lebar ($w=0,09725$ m), dan tinggi ($h=0,072$ m).
- Kemiringan sudut pada bagian depan *reversed Ahmed body* adalah 35° terhadap sumbu horizontal.
- Kecepatan *upstream*, U_0 , adalah 11.1, 13.9, 16,7 m/s.
- Kecepatan aliran kontrol aktif *synthetic jet* adalah pada nozzle dengan rata-rata kecepatan aliran 2 m/s.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang dibuat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

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 Aliran Fluida

Aliran fluida dapat dikategorikan menjadi tiga yaitu laminar, transisi, dan turbulen.

a. Aliran Laminar

Aliran fluida disebut laminar ketika fluida yang bergerak dalam tiap lapisan mengalir dengan lancar. Viskositas yang terjadi di dalam aliran menyebabkan efek peredaman gerakan antar lapisan.

b. Aliran Transisi

Aliran transisi merupakan aliran antara fase laminar dan turbulen. Aliran ini ditandai dengan adanya fase laminar dan turbulen yang terjadi secara bergantian.

c. Aliran Turbulen

Aliran turbulen ditandai dengan terjadinya gerakan acak partikel pada tiap lapisan sehingga terjadi pertukaran momentum antar lapisan dengan intensitas tinggi. Aliran turbulen diperlihatkan seperti pada Gb. 2.1



Gambar 2.1 Aliran Laminar dan Turbulen

(Sumber: http://boojum.as.arizona.edu/~jill/NS102_2006/Lectures/Lecture12/turbulent.html)

Untuk dapat membedakan antara jenis aliran laminar, transisi, dan turbulen maka dapat ditentukan dengan bilangan Reynolds (sesuai dengan nama penemunya). Bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara efek inersia dan viskos dalam aliran. Bilangan Reynolds dinyatakan dengan:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

di mana,

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

V = kecepatan rata-rata dari fluida yang mengalir (m/s)

D = diameter pipa (m)

μ = viskositas dinamik fluida (kg/m.s)

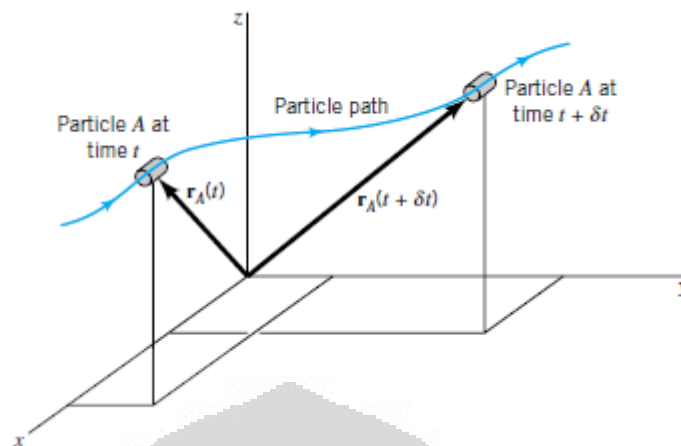
Dalam aplikasi untuk bidang teknik secara umum untuk aliran di dalam pipa bundar telah ditentukan bahwa jika besar bilangan Reynolds kurang dari 2100 maka aliran laminar dan jika lebih dari 4000 maka aliran turbulen. Nilai di antara keduanya merupakan aliran transisi.

2.2 Medan Kecepatan Aliran

Salah satu variabel fluida yang paling penting adalah *medan kecepatannya*.

$$\mathbf{V} = u(x, y, z, t)\hat{i} + v(x, y, z, t)\hat{j} + w(x, y, z, t)\hat{k} \quad (2.2)$$

Dimana u , v , dan w adalah komponen-komponen vektor kecepatan dalam arah x , y , dan z . Menurut definisi, kecepatan sebuah partikel adalah laju perubahan per satuan waktu dari vektor posisi partikel tersebut. Seperti diilustrasikan pada Gb. 2.2, posisi partikel A relatif terhadap sistem koordinat diberikan oleh vektor posisi, \mathbf{r}_A , yang merupakan fungsi dari waktu (jika partikel bergerak). Turunan terhadap waktu dari posisi ini memberikan kecepatan dari partikel tersebut $d\mathbf{r}_A / dt = \mathbf{V}_A$, dengan menuliskan kecepatan untuk seluruh partikel, kita dapat memperoleh gambaran medan dari vektor kecepatan $\mathbf{V} = \mathbf{V}(x, y, z, t)$.



Gambar 2.2 Tempat kedudukan partikel yang dinyatakan dengan vektor posisi
(sumber: munson 2002)

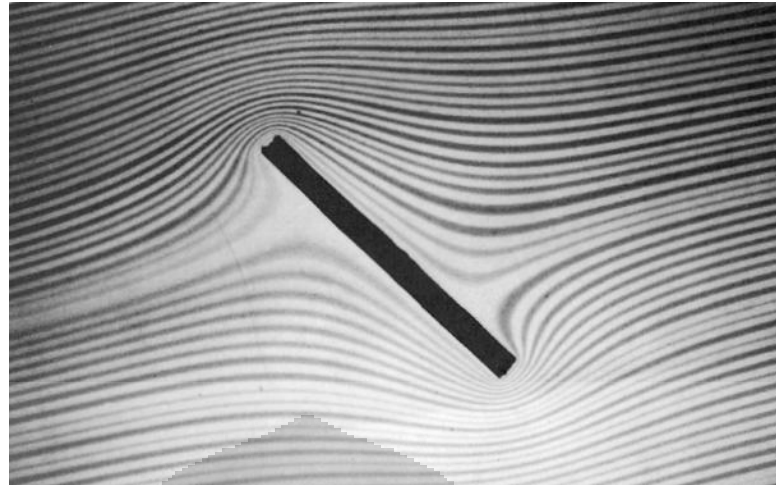
2.3 Garis Arus

Garis arus (*streamlines*) adalah sebuah garis yang menyinggung (tangen terhadap) medan kecepatan. Jika aliran tunak, tidak ada yang berubah terhadap waktu disebuah titik (termasuk juga arah kecepatan), sehingga garis-garis arusnya adalah garis-garis tetap didalam ruang. Untuk aliran tak tunak, garis-arus dapat berubah bentuknya menurut waktu. Garis arus diperoleh secara analitik dengan mengintegalkan persamaan garis yang menyinggung medan kecepatan. untuk aliran dua dimensi kemiringan dari garis-arus, dy/dx , harus sama dengan tangen dari sudut yang dibuat oleh vektor kecepatan dengan sumbu-x atau

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u} \quad (2.3)$$

Jika medan kecepatan diketahui sebagai fungsi dari x dan y (dan t jika alirannya tak-tunak), maka persamaan ini dapat diintegalkan untuk mendapatkan persamaan dari garis-arus.

Untuk menghasilkan garis-arus secara eksperimental dilaboratorium, seperti pada Gb. 2.3 penggunaan asap atau bahan penjejak lainnya yang diinjeksikan kedalam aliran dapat memberikan informasi yang berguna berkaitan dengan garis-arus pada aliran tak tunak.



Gambar 2.3 Aliran melalui pelat miring
(sumber: munson, 2002)

2.4 Vortisitas

Vortisitas ζ , didefinisikan sebagai sebuah vektor yang memiliki besar dua kali vektor rotasi; artinya,

$$\begin{aligned}\zeta &= 2\omega = \nabla \times V \\ &= \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \hat{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \hat{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \hat{k} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Penggunaan vortisitas untuk menggambarkan karakteristik perputaran sebuah fluida. Secara lebih umum jika $\nabla \times V = 0$, maka rotasi (dan vortisitas adalah nol, dan medan aliran yang memiliki kondisi ini disebut sebagai *tak-berotasi* (*irrotational*)).

2.5 Lapisan Batas, Separasi Aliran, dan Intensitas Turbulensi

2.5.1 Lapisan Batas

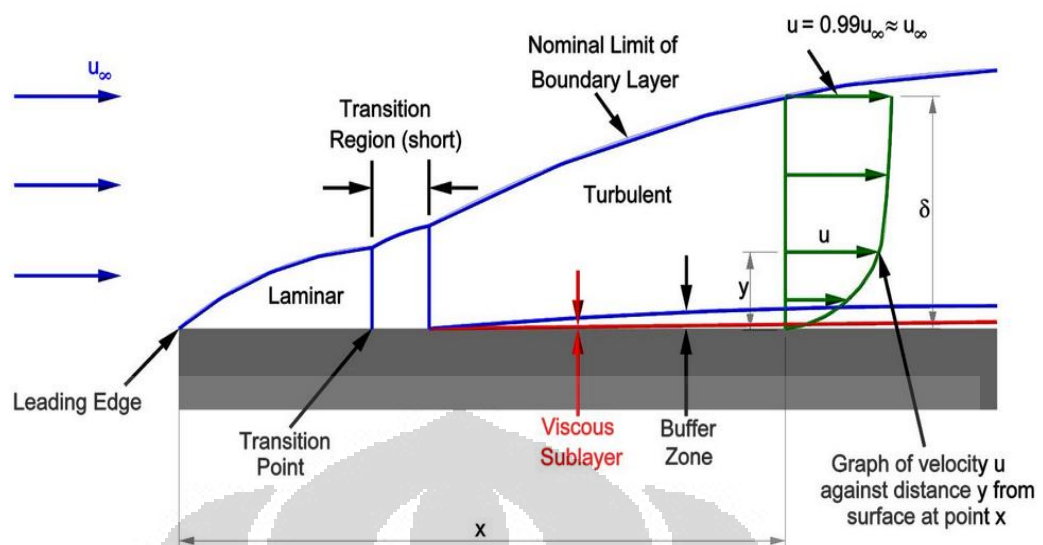
Secara definisi, lapisan batas adalah sebuah lapisan yang terbentuk pada benda yang terendam dalam fluida dimana pada lapisan tersebut efek viskos sangat penting dan di luar lapisan tersebut fluida bersifat *inviscid*. *Inviscid* merupakan aliran fluida yang tidak mengalami gesekan, konduktivitas panas,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

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

Lapisan batas menebal dengan arah yang sama dengan arah aliran, akibatnya perubahan kecepatan dari nol di permukaan pelat hingga *free stream*, U_o , pada jarak d semakin jauh menjadi semakin besar. Laju perubahan kecepatan tadi menentukan gradient kecepatan di permukaan pelat dan juga tegangan gesernya. Tegangan geser untuk lapisan batas laminar adalah :

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} \quad (2.5)$$

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

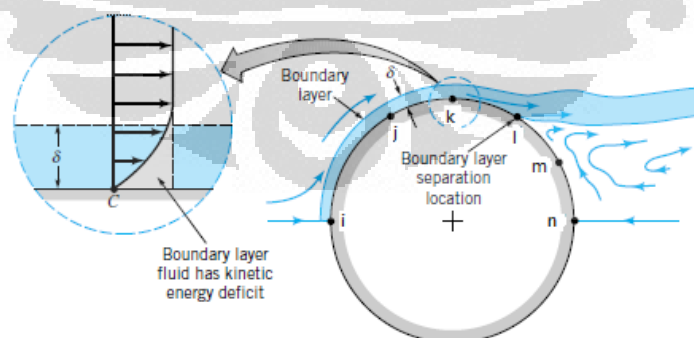


Gambar 2.4 Lapisan batas di sepanjang pelat rata

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

2.5.2 Separasi Aliran

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



Gambar 2.5 : Separasi aliran yang terjadi pada silinder

(sumber : Munson, 2002)

Gb 2.5 menunjukkan skema terjadinya separasi aliran pada silinder.

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

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

2.5.3 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.

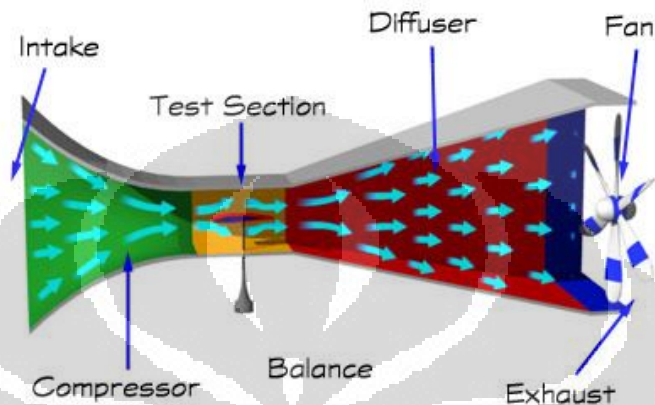
Turbulensi juga dapat dinyatakan dengan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi adalah suatu skala yang mengkarakteristikan turbulen dalam persen. Persamaan dari intensitas turbulensi adalah

$$TI = \frac{u_{rms}}{U_0} \quad (2.6)$$

2.6 Terowongan Angin (*wind tunnel*)

Terowongan angin atau *wind tunnel* adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan pengujian aerodinamika terhadap sebuah model, seperti pesawat dan mobil. Aliran udara akan diserap masuk melalui bagian *intake contraction* oleh fan yang digerakkan oleh motor. Model ditempatkan di bagian *working section*. Selanjutnya udara yang masuk ke dalam terowongan angin akan

dikeluarkan melalui *diffuser*. Dengan demikian ukuran model dibatasi ukuran *working section*, dimana semakin besar ukuran *working section* maka semakin besar pula ukuran model yang bisa ditempatkan.



Gambar 2.6 Bagian-bagian terowongan angin
(sumber: http://www.swe.org/iac/lp/wind_03.html)

Dalam simulasi terowongan angin, model diasumsikan diam dan udara bergerak dengan kecepatan tertentu. Sebaliknya pada kondisi nyata, pesawat atau mobil dianggap bergerak dan udara relatif diam. Itu sebabnya aliran udara dalam *working section* terowongan angin harus memenuhi persyaratan tertentu. Antara lain udara yang bergerak dalam seksi uji harus homogen secara lateral, longitudinal dan vertikal baik kecepatan, tekanan statik, angularitas dan intensitas turbulensinya. Oleh karena itu kecepatan udara homogen yang mampu dihasilkan di seksi uji terowongan angin juga menjadi salah satu ukuran kinerja terowongan angin. Untuk terowongan angin kecepatan rendah umumnya mampu menghasilkan kecepatan 5 m/s hingga 80 m/s. Itu sebabnya konstruksi terowongan angin relatif rumit. Terdiri dari beberapa bagian yang masing-masingnya dirancang untuk menghasilkan kondisi udara agar memenuhi standar yang diharapkan.

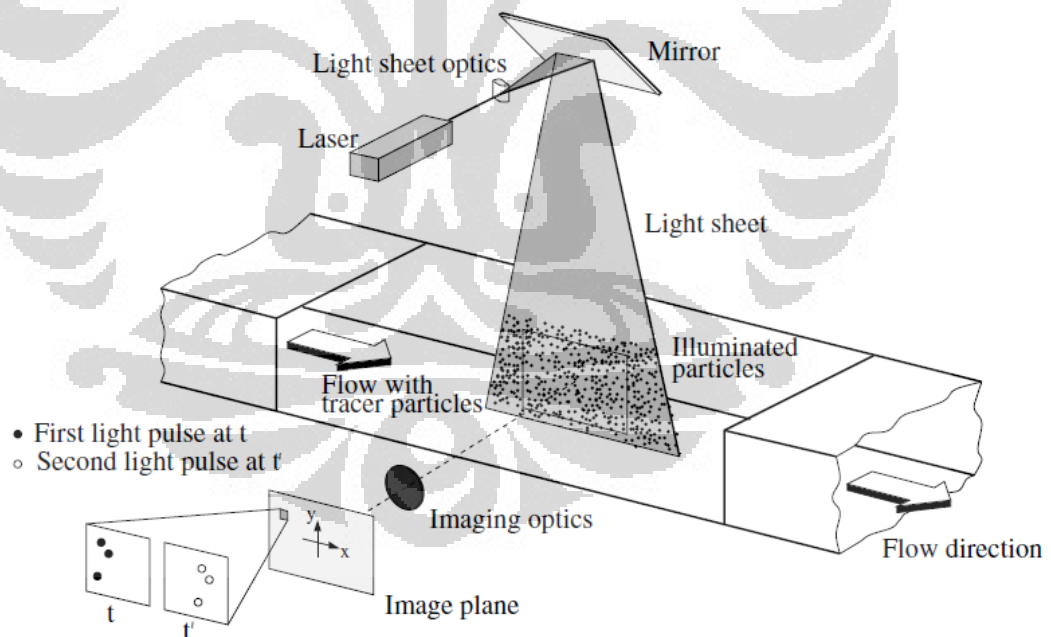
2.7 PIV (Particle Image Velocimetry)

2.7.1 Metode PIV

Particle Image Velocimetry(PIV) adalah metode optik untuk mendapatkan informasi vektor kecepatan aliran dengan menggunakan prinsip perpindahan partikel terhadap waktu yang sebelumnya sengaja ditambahkan pada aliran.

$$\text{kecepatan[m/s]} = \frac{\text{jarak[m]}}{\text{waktu[t]}} \quad (2.7)$$

Aliran yang telah ditambahkan *seeding particle* akan di sinari dengan laser untuk mendapatkan efek freezing, disaat yang sama kamera menangkap posisi sesaat partikel pada aliran tersebut. Dengan menggunakan perhitungan perpindahan partikel terhadap waktu pengambilan antar gambar satu dengan yang lain maka didapatkan informasi kecepatan.



Gambar 2.7 Ilustrasi PIV pada *wind tunnel*
(sumber: M Raffel, *Particle Image Velocimetry*, 2007)

2.7.2 Pergerakan Partikel Pada Fluida Bergerak dan Aplikasinya Pada PIV

Analisis pergerakan partikel adalah suatu yang sangat kompleks dan saat menggunakannya pada kasus *seeding partikel* PIV pada kondisi *real*, tidak ada model matematika yang dapat digunakan. Oleh karena itu, pada praktiknya diasumsikan bahwa bentuk partikel yang digunakan *spherical* dan mengalir di dalam aliran yang *infinite*.

Pada tahun 1888, Basset memperkenalkan persamaan pergerakan partikel berbentuk *spherical* relatif terhadap aliran *infinite stagnant*. Selanjutnya, Hinze (1959) mengembangkan persamaan tersebut untuk pergerakan fluida dengan memperkenalkan *instantaneous particle velocity* V relatif terhadap fluida ($V \equiv U_p - U_f$), yang akhirnya menghasilkan persamaan:

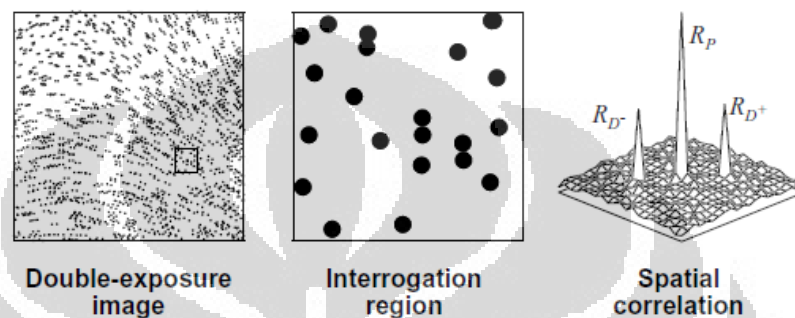
$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{d\hat{U}_p}{dt} = -3\pi\mu d_p \hat{V} + \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_f \frac{d\hat{U}_f}{dt} - \frac{\pi}{12} d_p^3 \rho_f \frac{d\hat{V}}{dt} - \frac{3}{2} d_p^2 \sqrt{\pi\mu\rho_f} \int_{t_0}^t \frac{d\hat{V} d\xi}{d\xi \sqrt{t-\xi}} \quad (2.8)$$

Pada persamaan ini, term pertama merepresentasikan gaya yang dibutuhkan untuk mengakselerasi partikel, dan term kedua pada persamaan (2.8) berhubungan dengan gaya drag viskos yang dihasilkan oleh partikel karena bergerak dalam fluida. Seiring dengan akselerasi fluida, gradien tekanan pada sekitar partikel terbentuk: karenanya, terdapat gaya tambahan pada partikel, yang di representasikan oleh term ke-tiga. Term ke-empat berhubungan dengan resistansi fluida terhadap akselerasi partikel (diprediksi oleh teori aliran potensial). Term terakhir menggambarkan parameter “*Basset history integral*”, yang merepresentasikan peningkatan gaya drag dari penurunan pola aliran dari yang terjadi pada keadaan *steady flow*.

2.7.2 Pengolahan Gambar

Jika pengambilan gambar dilakukan dengan menggunakan frame yang sama (*single frame*) maka perpindahan partikel dapat dikalkulasi menggunakan analisis *auto-correlation*. Teknik *auto-correlation* ini biasa digunakan oleh sistem PIV dengan kamera berbasis film karena keterbatasan kecepatan trigger kamera film dibanding *high speed* kamera digital. Fungsi *auto-correlation* pada dua gambar memiliki sebuah puncak pusat, R_p , dan dua puncak sisi simetri, R_D^- , R_D^+

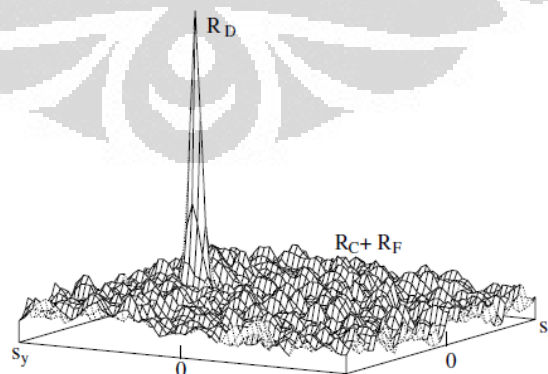
seperti pada Gb.(2.18). Namun, teknik *auto-correlation* memiliki dua kelemahan yaitu: (1) walaupun jarak perpindahan partikel dapat diketahui, tetapi tidak adanya informasi arah pergerakan partikel membuat arah aliran menjadi *ambigu*, (2) pada kasus perpindahan partikel dengan jarak yang sangat kecil, puncak sisi simetri dapat bernilai lebih tinggi dari puncak pusat, hal ini membuat *auto-correlation* memiliki limitasi pada *range* kecepatan tertentu.



Gambar 2.8 Analisis *auto-correlation*

(sumber: K.D Jansen, *flow measurement*, 2004)

Teknik yang lebih baik dalam pengolahan gambar dalam PIV adalah dengan menggunakan dua frame yang berbeda (*double frame*). Teknik *cross-correlation* dapat dilakukan pada gambar dengan *double frame*, fungsi dari *cross-correlation* ini memiliki satu puncak R_D , menghasilkan besar dan arah aliran tanpa kerancuan (*ambiguitas*).

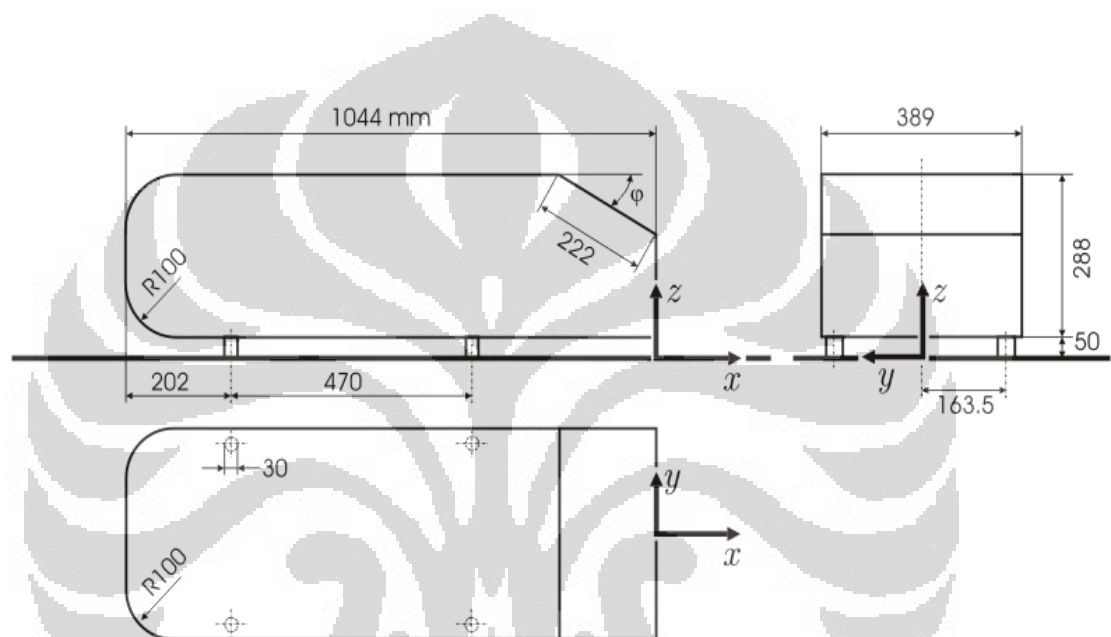


Gambar 2.9 fungsi *cross-correlation*

(sumber: M Raffel, *Particle Image Velocimetry*, 2007)

2.8 Model *Bluff Body* Kendaraan

Permodelan model *bluff body* yang paling sering digunakan dalam penelitian-penelitian aerodinamika adalah *Ahmed body*. *Ahmed body* merupakan sebuah model kendaraan yang disederhanakan, dan digunakan banyak peneliti karena mampu mendeskripsikan permodelan turbulensi untuk kasus geometri yang kompleks. Model *Ahmed body* ditunjukkan pada Gb 2.7



Gambar 2.10 Skema model *Ahmed body*. Dimensi dalam mm.
(sumber: http://www.cfd-online.com/Wiki/Ahmed_body)

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

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

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

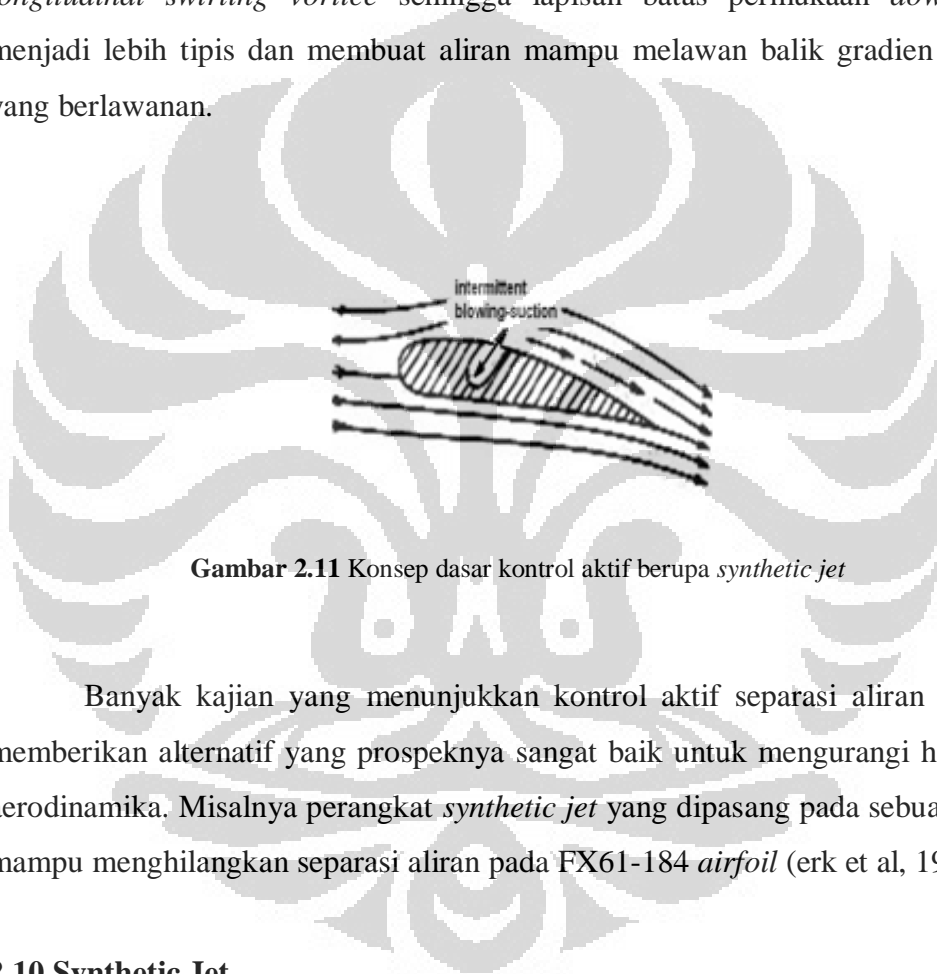
2.9 Modus Kontrol Aliran

Kontrol aliran pada *bluff body* memiliki tujuan mengurangi drag yang menjadi salah satu permasalahan utama dalam bidang aerodinamika kendaraan. 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 struktur*).
- 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.

Salah satu konsep pemberian energi dapat dilakukan dengan penambahan *synthetic jet*. Menurut Amitay et al (2001), penggunaan *synthetic jet (zero mass flux)* dapat memodifikasi bentuk aliran dan hasilnya dapat mengurangi atau bahkan menghilangkan separasi aliran. Sedangkan pada papernya, Honohan et al (2000) menjelaskan bahwa *synthetic jet* digunakan untuk mengganggu *longitudinal swirling vortice* sehingga lapisan batas permukaan *downstream* menjadi lebih tipis dan membuat aliran mampu melawan balik gradien tekanan yang berlawanan.

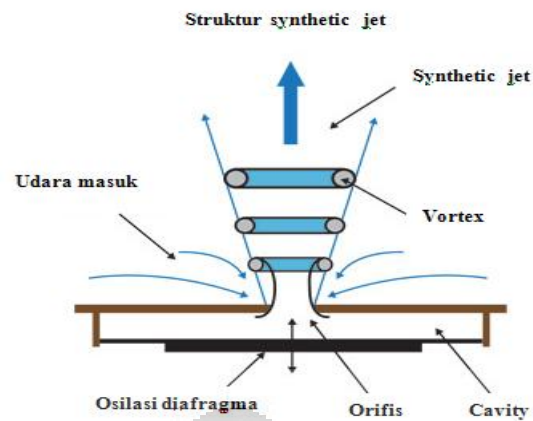


Gambar 2.11 Konsep dasar kontrol aktif berupa *synthetic jet*

Banyak kajian yang menunjukkan kontrol aktif separasi aliran turbulen memberikan alternatif yang prospeknya sangat baik untuk mengurangi hambatan aerodinamika. Misalnya perangkat *synthetic jet* yang dipasang pada sebuah *airfoil* mampu menghilangkan separasi aliran pada FX61-184 *airfoil* (erk et al, 1997).

2.10 Synthetic Jet

Synthetic jet merupakan suatu bentuk aliran fluida berupa serangkaian cincin *vortex* yang terbentuk karena adanya pergerakan periodik dari membran dalam suatu *cavity*. *Synthetic jet* ini digerakkan oleh sebuah aktuator berupa membran piezoelektrik yang memiliki *input massa netto nol* tetapi menghasilkan *output momentum netto* tidak nol. Secara visual *synthetic jet* dapat digambarkan seperti pada Gb. 2.9.



Gambar 2.12 Sketsa dari *synthetic jet*
(Sumber: Lasance & Aarts, 2008)

Secara garis besar *synthetic jet* terbentuk sebagai berikut. Di dalam *cavity* terdapat suatu diafragma atau membran. Membran tersebut akan digerakkan secara periodik dan membentuk getaran sehingga udara di dalam *cavity* ikut bergerak. Fluida udara di dalam *cavity* dipaksa bergerak melewati dua fase yaitu fase hisap (*suction*) dan fase semburan (*ejection*). Kedua fase ini terbentuk karena adanya lubang orifis pada sisi *cavity*.

Pada sisi keluar orifis terjadi separasi aliran dari fluida udara karena adanya kedua fase tersebut dan membentuk pasangan cincin *vortex*. Pasangan cincin *vortex* ini terbentuk karena separasi aliran akibat amplitudo getaran membran yang cukup besar sehingga membentuk lapisan geser (*shear layer*) antara fluida keluar orifis dengan fluida udara sekitar. Lapisan geser dan turbulensi pada sisi luar mengakibatkan terbentuknya pasangan cincin *vortex*.

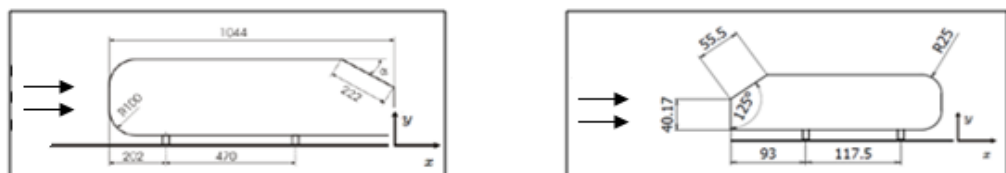
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

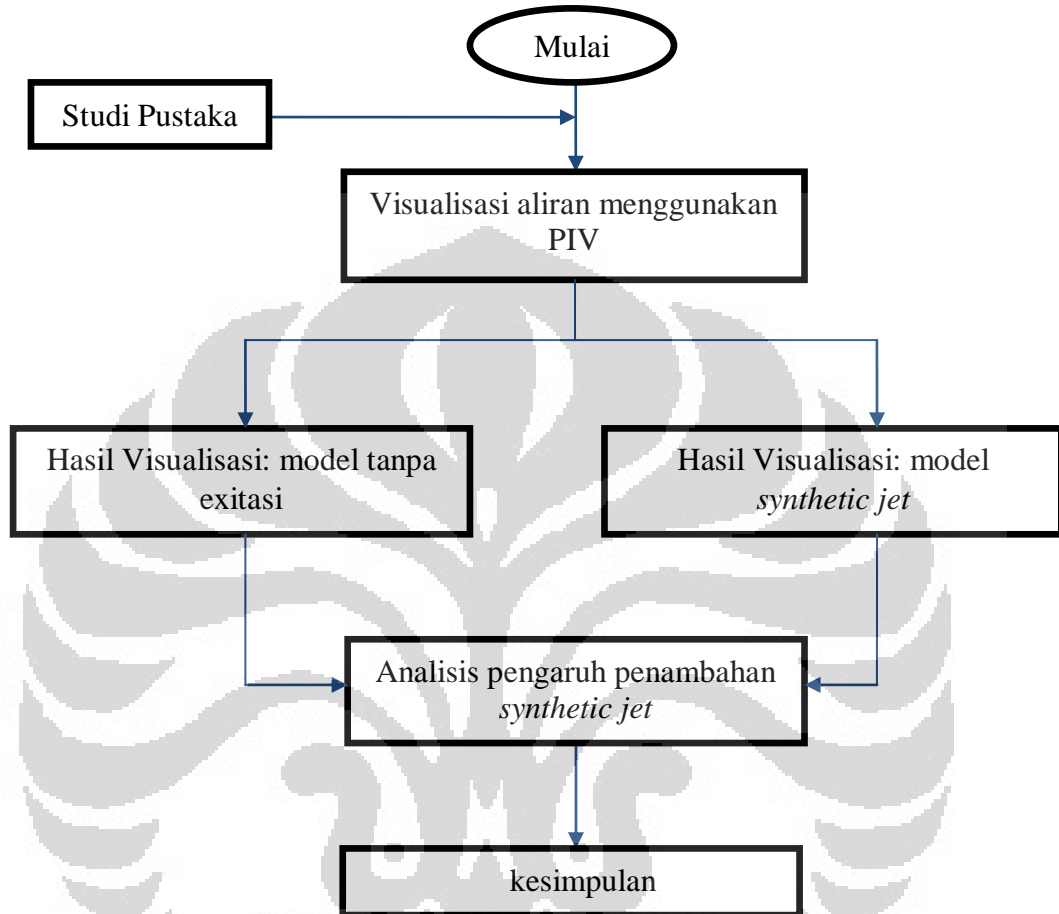
Penelitian ini mengkaji pengurangan drag yang terjadi pada model *reversed Ahmed body* dengan penambahan kontrol aktif berupa *synthetic jet*. Model *reversed Ahmed body* digunakan karena mewakili bentuk mobil van keluarga yang umum di pakai di Indonesia. Metode pendekatan yang dilakukan adalah dengan menggunakan partikel image velocimetry (PIV).

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan model *reversed Ahmed body* terbuat dari bahan akrilik. Model *reversed Ahmed body* terdiri dari 2 model yaitu, model untuk aliran tanpa kontrol aktif dan model untuk aliran dengan kontrol aktif berupa *synthetic jet*. Model *reversed Ahmed body* digunakan dalam penelitian ini dikarenakan model *Ahmed body* tidak dapat mencerminkan bentuk kendaraan keluarga pada umumnya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan model yang berbeda, yaitu model dengan bentuk depan yang dimiringkan (sudut miring pada bagian depan dengan $\alpha = 35^\circ$) dan bagian belakang menyerupai *step back* namun dengan modifikasi penambahan jari-jari kelengkungan pada tepi atas dan bawah, sehingga jika dilihat dari samping model memiliki keserupaan dalam arah sumbu z. Dengan begitu model ini dapat dikatakan menyerupai model *reversed Ahmed body*. Model *reversed Ahmed body* ini memiliki rasio 0.25 jika dibandingkan terhadap model *Ahmed body*, dan memiliki dimensi panjang $l = 0.261$ m, lebar $w = 0.09725$ m, dan tinggi $h = 0.072$ m.



Gambar 3.1 Perbandingan Ahmed Body dengan model eksperimen

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



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

Penambahan kontrol aktif berupa *synthetic jet* pada model *reversed ahmed body* diletakkan pada kedua bagian belakang atas dari model, dengan lebar eksitasi 0,0228 m dan tinggi sepanjang jari-jari kelengkungan ($R=0,25$ m). Total luasan area eksitasi aliran pada dinding dapat dihitung sebagai berikut:

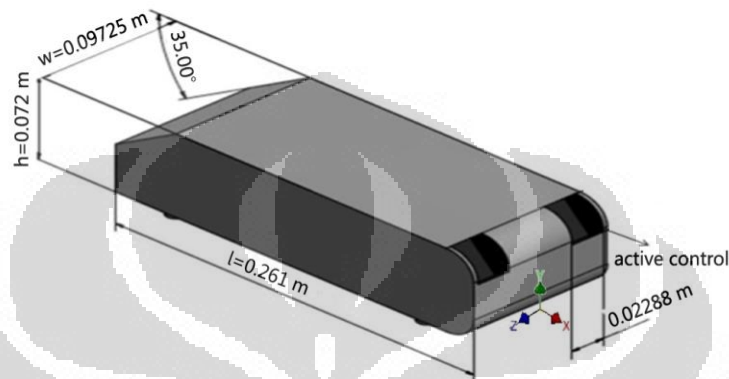
$$\begin{aligned}
 \text{Luasan Eksitasi} &= 2 \left[\left(\frac{\gamma}{360^\circ} \right) 2\pi r z \right] \\
 &= 2 \left[\left(\frac{78.520}{360^\circ} \right) 2\pi (0.025) (0.02288) \right] \\
 &= 2(0.06855 \times 10^{-2}) = 0.1371 \times 10^{-2} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Dimana,

γ = Sudut yang dibentuk oleh juring eksitasi (78.52^0)

r = Radius kelengkungan tepi atas model (0.025 m)

z = lebar slot eksitasi (0.02288 m)



Gambar 3.3 Model dengan penambahan modus kontrol aktif: *synthetic jet*

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

Hasil yang diperoleh melalui eksperimen adalah *streamlines*, vortisitas, intensitas turbulensi, dan profil kecepatan yang nantinya akan dibandingkan antara model tanpa eksitasi dan dengan penambahan sintetik jet. Nilai parameter-parameter yang telah diperoleh kemudian disajikan dalam bentuk, diagram, dan kontur penuh dalam bab berikutnya sehingga memudahkan dalam melihat pengaruh dari penambahan kontrol aktif berupa *synthetic jet*.

3.2 Fasilitas dan Peralatan lab pengujian

Pada proses pengujian ini fasilitas terowongan angin dan sistem PIV yang digunakan adalah terowongan angin subsonik dan *Dantec PIV system* yang terdapat di Laboratorium Mekanika Fluida Universitas Indonesia Depok.



Gambar 3.4 Terowongan angin dan sistem PIV lab mekanika fluida FTUI

3.2.1 Terowongan angin (*wind tunnel*)

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



Gambar 3.5 Terowongan angin *subsonic* yang digunakan pada penelitian

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



Gambar 3.6 Motor DC dan unit kontrol penggerak *blower axial*

Untuk mengukur intensitas turbulensi aliran pada seksi uji, dilakukan pengukuran kecepatan sepanjang garis tengah seksi uji dengan interval jarak 1 cm,

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



Gambar 3.7 Pengukuran kecepatan dalam seksi uji dengan *hot wire*.

3.2.2 Sistem PIV

3.2.2.1 Double-cavity Nd:YAG laser

Double-cavity Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium aluminium garnet) laser atau biasa disebut PIV laser adalah standard laser yang digunakan untuk sistem PIV modern terkini. Nd:YAG laser pada dasarnya menghasilkan sinar *infra-red* dengan panjang gelombang 1064nm yang tidak terlihat oleh mata telanjang dan tidak dapat digunakan untuk sistem PIV karena standard kamera PIV sensitifitasnya tidak mendekati sinar *infra-red*. Dengan penambahan HG(Harmonic generator) dan HS(Harmonic separator) untuk mengubah sinar *infra-red* menjadi sinar hijau dengan panjang gelombang 532nm yang dapat terlihat mata telanjang, membuat Nd:YAG laser dalam sistem PIV menjadi pilihan yang sangat fleksibel dan aman bagi penggunaanya (karena sinar terlihat oleh mata).

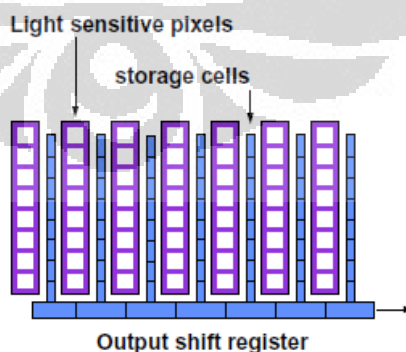


Gambar 3.8 *double-cavity Nd:YAG laser*

3.2.2.2 Kamera *Cross-Correlation*

Kamera *cross-correlation* memiliki *progressive-scan interline CCD chips*, yang memiliki jumlah *light-sensitive cell* dan *storage cell* yang sama. Berbeda dengan kamera *auto-correlation* yang hanya memiliki *light-sensitive cell*, kamera *cross-correlation* dapat menyimpan dalam dua frame yang berbeda.

Dalam *cross-correlation*, posisi awal (*initial position*) dari *seeding particle* direkam dalam frame kamera (frame 1), yang kemudian dengan cepat dipindahkan ke storage frame. Lalu, setelah posisi awal dipindahkan ke storage frame, frame kamera telah *cleared* dan siap untuk merekam *final position* (frame 2). dengan kata lain, informasi arah kecepatan tidak abigu jika menggunakan *cross-correlation*.



Gambar 3.9 *progressive-scan interline CCD chips*

(sumber: Dantec, *2D PIV Reference Manual*, 2005)

Kamera CCD yang digunakan merupakan produk dari dantec, model FlowSense EO 2M dengan *resolusi spatial* 1600x1200 *pixel*, maksimum *frame rate* 35 *frame* per detik dan dilengkapi oleh lensa dengan *focal length* sebesar 50mm.

3.2.2.2 Personal Computer(PC)

PC yang digunakan merupakan produk dari DELL, seri *precision* T3500 dengan *prossesor* intel xeon, dan memory RAM sebesar 6GB. Dilengkapi dengan *software* pengolahan data PIV, *Dynamic Studio*, sebuah *PCI Synchroniser timerboard*, dan sebuah *PCI camera interface*.

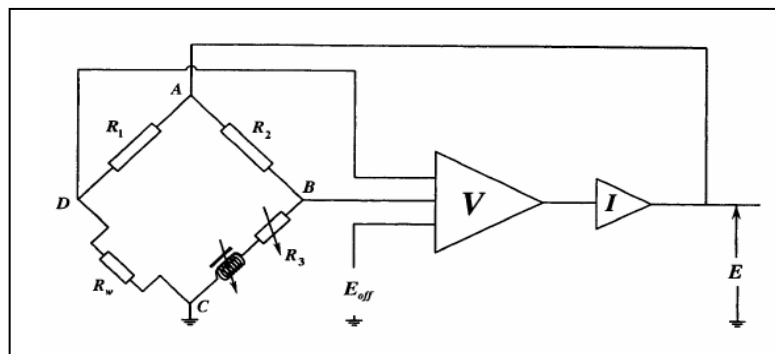


Gambar 3.10 *personal computer*

3.2.3 Peralatan

a. *Hot wire*

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



Gambar 3.11 Skema elektrikal dari CTA



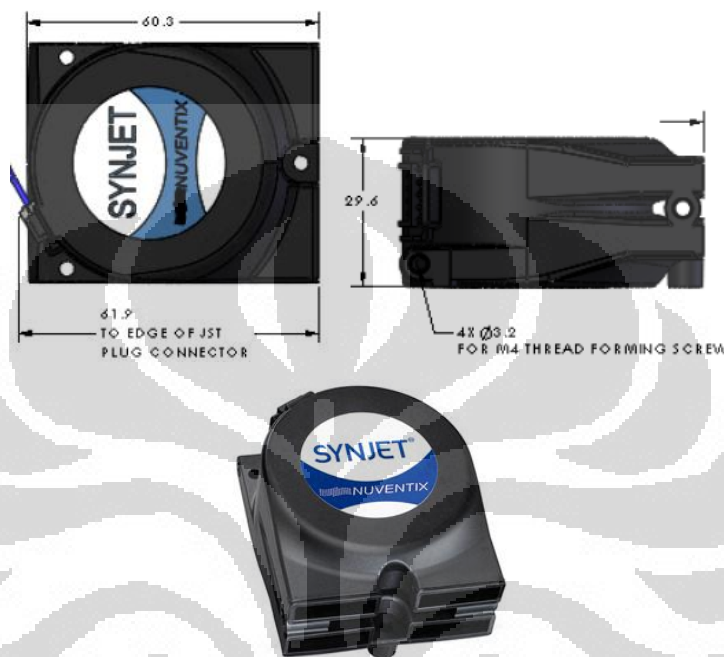
Gambar 3.12 Hot Wire

Spesifikasi dari hot wire yang digunakan adalah sebagai berikut.

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

b. Synthetic Jet actuator

Synthetic jet actuator merupakan alat kontrol aktif yang digunakan dalam eksperimen ini. Aktuator ini terdiri dari *cavity* dengan membran didalamnya, Membran tersebut akan digerakkan secara periodik dan membentuk getaran sehingga udara di dalam *cavity* ikut bergerak.



Gambar 3.13 Geometri SynJet Xflow 30

(sumber: nuventix, synthetic jet x-flow 30, 2010)

Spesifikasi dari *synthetic jet* Synjet Xflow 30 yang digunakan dalam eksperimen adalah sebagai berikut:

- Elektrikal:
 - VDC: +/- 5 VDC
 - I_{\min} : 20 mA
 - I_{peak} : 400mA
 - I_{avg} : 200mA
 - P_{avg} : 1.0 mW
- Lingkungan:
 - *Opening temp* : min -40⁰C/ max 85⁰C
 - *Storage temp.* : min -40⁰C/ max 85⁰C
 - *Storage altitude* : 15000 m DPL

- *Operating* R_h : 5-95% (*non-condensing*)
- Berat : 135 g

3.3 Prosedur Pengujian

3.3.1 Persiapan Model Uji

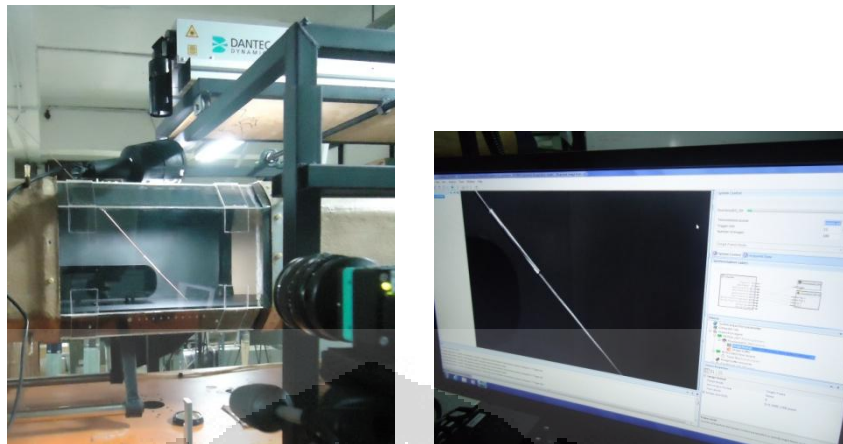
Model uji *reversed Ahmed body* yang sebelumnya telah diberi warna hitam pekat agar mengurangi pantulan cahaya yang dapat menyebabkan *noise* pada gambar hasil, dimasukkan ke dalam terowongan angin. Untuk model dengan tambahan *synthetic jet* dibutuhkan sumber tegangan DC, oleh karena itu, digunakan sebuah adapter untuk mengubah aliran listrik AC ke DC.



Gambar 3.14 penempatan model uji di terowongan angin

3.3.2 Kalibrasi

Kalibrasi gambar dilakukan sebelum pengambilan data gambar dengan PIV. Tujuan dari kalibrasi adalah untuk mendapatkan faktor skala perbandingan antara satuan milimeter pada model real terhadap satuan *pixel* gambar yang ditangkap oleh kamera. Kalibrasi dilakukan dengan mengambil gambar model dengan tambahan sebuah batang yang sebagian dilapisi warna yang kontras dengan warna batang (jika batang berwarna putih, maka dilapisi hitam), panjang dari warna kontras tersebut adalah input untuk *absolute distance* nantinya pada fitur kalibrasi di dalam software PIV. Sehingga, didapatkan *scale factor* milimeter terhadap *pixel*.



Gambar 3.15 kalibrasi

3.3.3 Pengambilan Gambar

Sebelum dilakukan pengambilan gambar, perlu dilakukan pengaturan fokus lensa kamera dan besar energi laser. Pengaturan lensa kamera dapat dilakukan secara manual dengan memutar lensa kamera sambil melihat hasil gambar pada monitor PC, begitu juga pengaturan power laser dilakukan dengan memutar panel energy pada control panel. Pengaturan energi disesuaikan dengan hasil pantulan cahaya laser oleh seeding particle, tambahkan energi hingga dirasa *seeding partikel* cukup terlihat.

Dilakukan pengambilan dua ratus gambar tiap variasi kecepatan kecepatan *upstream*, U_0 : 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s untuk model uji tanpa eksitasi dan dengan penambahan *sycetic jet*.

3.3.4 Pengolahan Gambar

3.3.4.1 Pemilihan Metode Korelasi

Beberapa metode dapat digunakan untuk mencari korelasi dari dua gambar yang mewakili posisi sesaat dari *seeding partikel*, diantaranya yang paling umum digunakan adalah *auto-correlation*, *cross-correlation*, dan *adaptive correlation*. Masing –masing metode tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan.

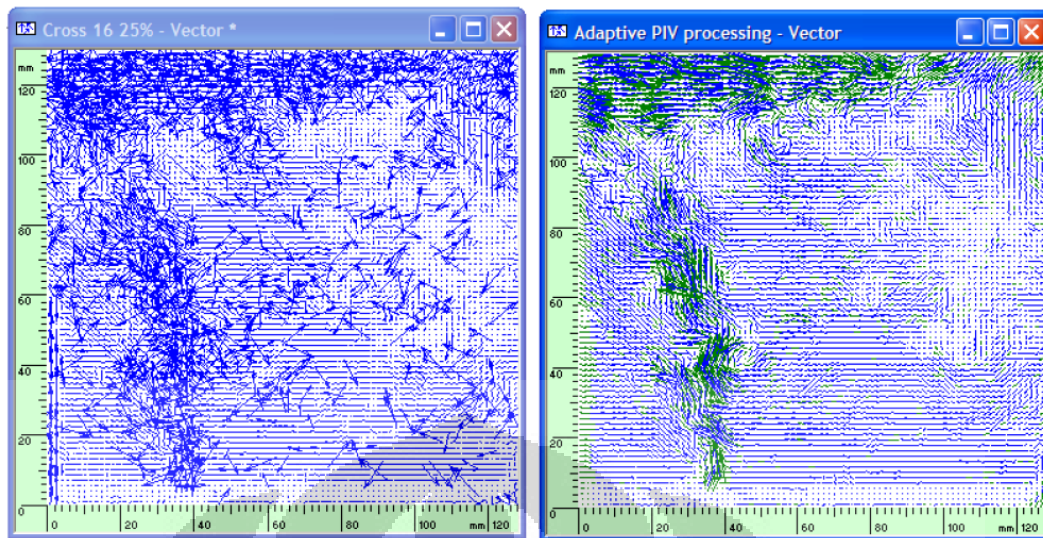
Auto-correlation dapat digunakan pada hasil gambar yang memiliki *single frame*, dengan kata lain, tidak dibutuhkan kamera dan *laser* dengan teknologi yang tinggi, tidak dibutuhkan kamera CCD yang memiliki kemampuan

menyimpan gambar pada dua *frame* yang berbeda dan cukup penggunaan laser yang memiliki *single cavity*. Namun, metode *auto-correlation* memiliki kekurangan akibat hanya digunakannya satu *frame* yaitu tidak adanya informasi arah pergerakan partikel yang akan membuat arah hasil aliran menjadi *ambigu*.

Cross-correlation digunakan untuk mencari korelasi dari hasil gambar yang memiliki *double frame*, bertolak belakang dengan *auto-correlation*, *cross-correlation* mutlak membutuhkan kamera dengan chip CCD dan laser dengan *double cavity* untuk menangkap gambar dengan *double frame*. Hal ini akan mempengaruhi biaya yang dikeluarkan untuk mengadakan peralatan tersebut. Namun, dengan menggunakan metode *cross-correlation* akan didapatkan besar dan arah aliran tanpa kerancuan (*ambiguitas*) seperti pada *auto-correlation*.

Adaptive-correlation sebenarnya adalah metode *cross-correlation* yang dilakukan secara berulang-bertahap dimana hasil dari tahap sebelumnya digunakan untuk meningkatkan keakuratan kalkulasi pada tahap selanjutnya. Tahap pertama dari *adaptive-correlation* adalah metode *cross-correlation* konvensional, tetapi pada tahapan kedua *interrogation area* pada frame ke-2 memiliki besar yang berbeda relative terhadap *interrogation area* pada frame pertama. Hasil dari tahapan pertama akan digunakan untuk menentukan sejauh mana *interrogation area* pada frame ke-2 harus berpindah. Hal ini akan meningkatkan *spatial resolution* dan *dynamic range* dibanding metode *cross-correlation* konvensional. Vektor yang dihasilkan dari metode *adaptive-correlation* juga lebih baik dibandingkan dengan menggunakan *cross-correlation*, berikut pada Gb 3.16 adalah contoh perbandingan vektor yang didapat antara metode *cross-correlation* dan *adaptive-correlation*.

Digunakan metode *adaptive-correlation* pada pengolahan data untuk 200 gambar dengan pertimbangan metode ini adalah metode yang menghasilkan vektor paling baik dibandingkan metode lainnya.



Gambar 3.16 Hasil vektor *cross-correlation* vs *adaptive-correlation*
(sumber: Dantec, *Dynamic Studio Manual*,2011)

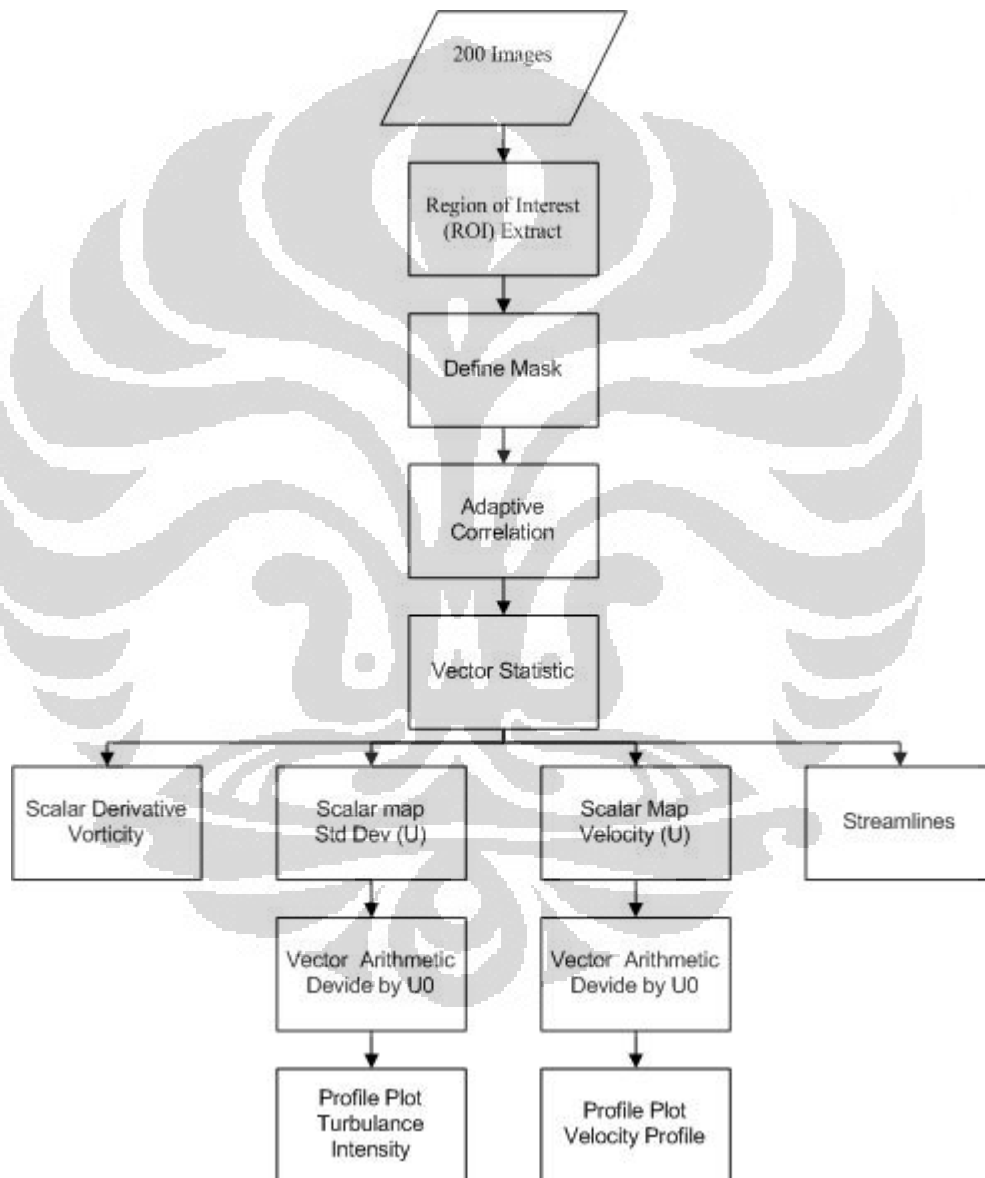
3.3.4.2 Diagram Alir Pengolahan Gambar PIV

Gb 3.17 menunjukkan diagram alir pengolahan gambar PIV secara menyeluruh menggambarkan tahap-tahap proses yang telah dilakukan menggunakan software pengolahan data PIV *Dynamic Studio*.

Region Of Interest (ROI) Extract adalah tools untuk menyeleksi sebagian dari gambar original yang menjadi daerah *interest* atau daerah yang ingin lebih lanjut dianalisis, *ROI Extract* memiliki fungsi yang mirip dengan *snipping tools* pada windows yaitu membuang daerah yang tidak terseleksi dari gambar atau biasa disebut *cropping*. Membuang daerah yang tidak diinginkan dengan menggunakan *ROI Extract* menjadi sangat penting jika pada gambar original terdapat *noise* berupa pantulan dari cahaya yang akan merusak korelasi dari gambar.

Bertolak belakang dengan *ROI Extract* yang membuang daerah diluar daerah seleksi, *Define Mask* membuang daerah didalam seleksi. Selain itu, Berbeda dengan *ROI Extract* yang membuang secara keseluruhan (*Cropping*), *Define Mask* hanya membuang daerah yang diseleksi dari perhitungan yang akan dilakukan selanjutnya. Contoh kasus pada pengolahan gambar penelitian ini adalah penggunaan *Define Mask* pada daerah dimana bagian belakang dari model uji. Pada bagian tersebut tidak ada korelasi atau vektor yang diinginkan karena

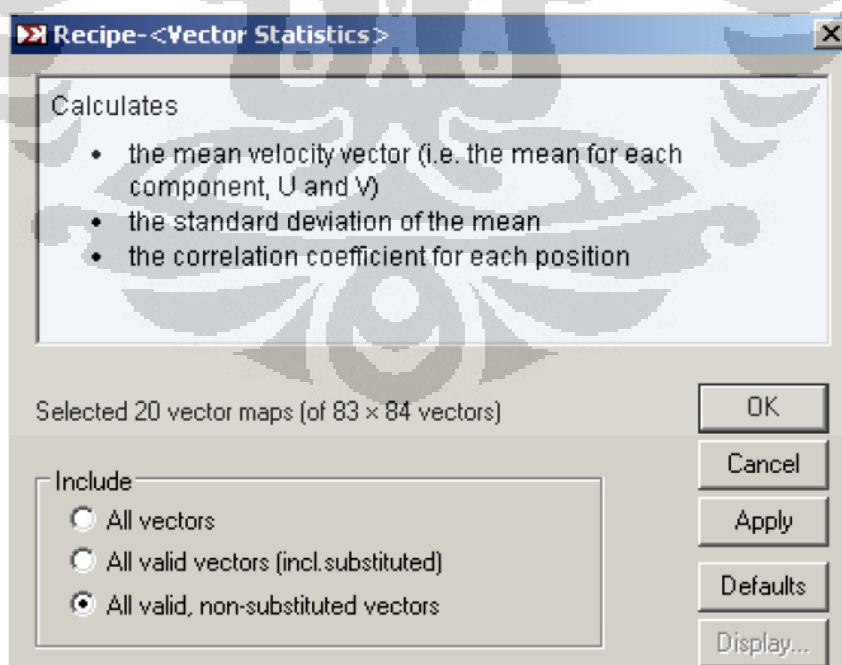
memang bukan bagian aliran melainkan *solid body* yang terambil kamera, namun, daerah tersebut penting ditampilkan sebagai acuan perbandingan jarak pusat *resirkulasi*, *saddle point*, jarak *plot* intensitas turbulensi dan profil kecepatan (x/h). Untuk itu, digunakan *Define Mask* untuk membuang daerah tersebut dari perhitungan tetapi tidak dengan memotong gambar (*cropping*).



Gambar 3.17 Diagram alir pengolahan data gambar PIV

Perhitungan vektor kecepatan dilakukan dengan menggunakan teknik *adaptive correlation*. Dengan parameter *initial interrogation area* sebesar 256×256 , dan *final interrogation area* sebesar 64×64 pixel dengan 50% *overlap*. Pada dasarnya, *interrogation area* yang besar menghasilkan korelasi yang lebih baik karena memiliki jumlah *sample data seeding* partikel yang lebih banyak. Namun, penggunaan *interrogation area* yang besar akan berpengaruh pada jumlah vektor yang dihasilkan, vektor yang dihasilkan *interrogation area* yang besar lebih sedikit dibandingkan penggunaan *interrogation area* yang kecil. Hal ini disebabkan tiap *interrogation area* nantinya akan mewakili satu vektor. Untuk itu, pemilihan *interrogation area* yang digunakan dilakukan dengan sistem *trial-error*, digunakan *interrogation area* yang kecil dahulu, jika hasil yang didapat banyak menghasilkan *bad vector* maka *interrogation area* ditambah.

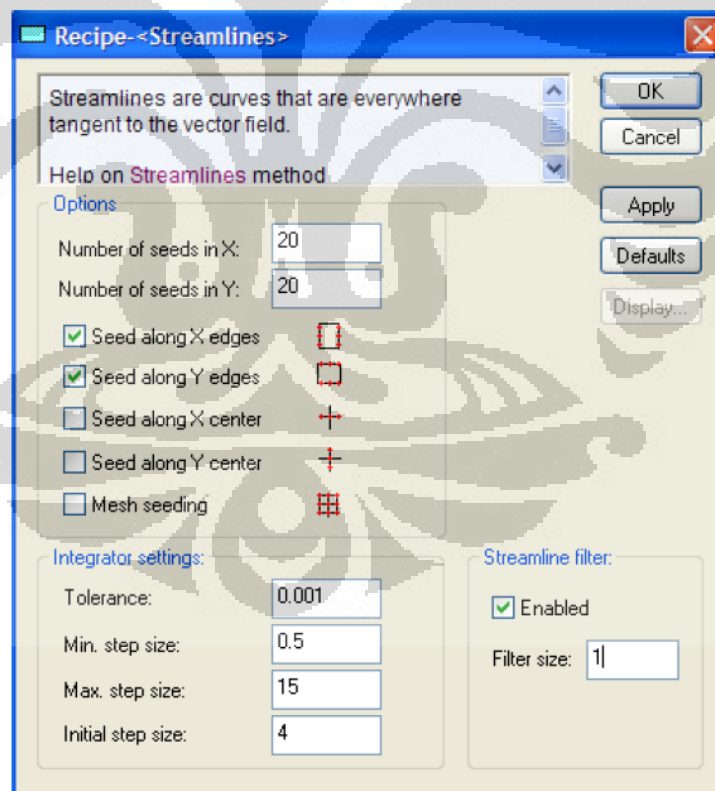
Perhitungan vektor kecepatan dengan *adaptive-correlation* menghasilkan 200 vektor map dari 200 gambar yang dikorelasi, untuk mendapatkan vektor map rata-rata dari 200 vektor map tersebut digunakan *tools Vector Statistic*. Pada *window Vector Statistic* terdapat tiga opsi dalam perhitungan rata-rata vektor, *all vector*, *all valid vector (incl. Substituted)*, *all valid – non substituted vector*.



Gambar 3.18 *Vector statistic*

(sumber: Dantec, *Dynamic Studio Manual*,2011)

Opsi *all vector* digunakan untuk menghitung rata-rata seluruh vektor, termasuk *bad vector* juga dimasukkan dalam perhitungan menggunakan opsi ini. Opsi *all valid vector (incl. Substituted)* digunakan untuk menghitung rata-rata dari valid vektor dan vektor hasil substitusi pengganti dari *bad vector*. Opsi *all valid – non substituted vector* digunakan untuk menghitung rata-rata hanya vektor yang dianggap valid. Gunakan *all vector* jika tidak dihasilkan *bad vector* dari perhitungan korelasi, gunakan *all valid vector (incl. Substituted)* jika banyak *bad vector* yang dihasilkan karena *noise* yang tidak dapat dihindari pada saat pengambilan gambar, dan gunakan *all valid – non substituted vector* jika terdapat sedikit *bad vector* dan tidak akan mengganggu sekalipun tidak dimasukan ke dalam perhitungan vektor rata-rata. Pada penghitungan vektor rata-rata untuk penelitian ini penulis menggunakan opsi *all valid – non substituted vector* karena hanya dihasilkan sedikit *bad vector* dari proses korelasi menggunakan *adaptive correlation*.

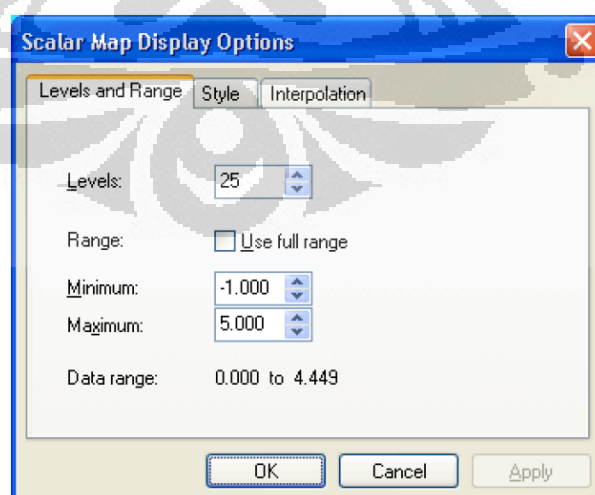


Gambar 3.19 *Streamlines window option*

(sumber: Dantec, *Dynamic Studio Manual*,2011)

Dari vektor map rata-rata hasil *vector statistic* dapat diolah menjadi banyak analisis data, diantaranya adalah *streamlines*, *vorticity*, *velocity profile*, dan *turbulence intensity*. Untuk menampilkan *streamlines* dari vektor rata-rata gunakan *tools streamlines*. Terdapat opsi *streamlines filter* pada *streamlines window*, disarankan untuk mengaktifkan opsi ini setidaknya *filter size=1* untuk mengurangi kerapatan *streamlines* karena untuk menampilkan *streamlines* dibutuhkan *resource* komputer yang tidak sedikit, tidak jarang akan terjadi *lag* jika membuka hasil dari *streamlines* ini.

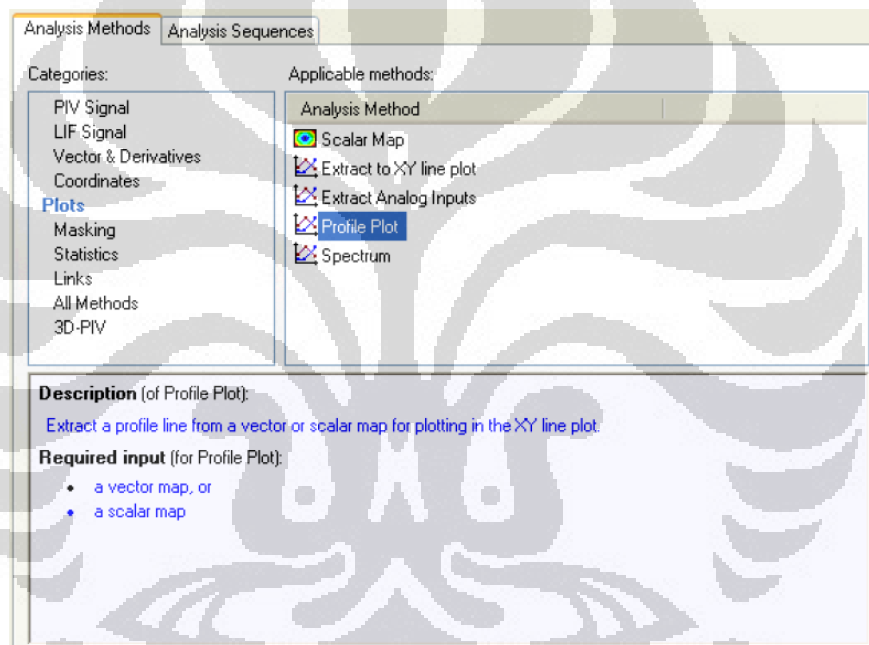
Vorticity dapat dihitung dengan menggunakan *tools Scalar Derivative*, pilih *vorticity* pada opsi *drop-down box* untuk menampilkan *vorticity*. Secara *default*, nilai range di set pada minimum dan maksimum dari *vorticity*. Namun, terkadang nilai tersebut membuat tampilan dari *vorticity* menjadi aneh karena nilai maksimum atau minimum tersebut bisa saja didapatkan dari *bad vector*. Pada penelitian ini juga didapat nilai-nilai maksimum dan minimum *vorticity* dari *bad vector*, terutama pada bagian *solid body* model uji yang seharusnya telah di *masking* ikut terambil membuat nilai-nilai ini menjadi terlalu tinggi atau rendah dibandingkan nilai *vorticity* normal lainnya. Untuk itu, nilai range minimum dan maksimum pada *vorticity* harus ditentukan. Perhatikan pada pusat *vorticity* disitulah nilai maksimum dan minimum sebenarnya terjadi, pada penelitian ini nilai maksimum terjadi pada pusat *vorticity* di bagian bawah model uji, dan minimum pada pusat *vorticity* di bagian atas model uji.



Gambar 3.20 *Vorticity window option*

(sumber: Dantec, *Dynamic Studio Manual*,2011)

Untuk mendapatkan *velocity profile* dan *turbulence intensity*, digunakan *tools scalar map* terlebih dahulu untuk menghitung komponen kecepatan arah horizontal (u), dan standar deviasi dari kecepatan arah horizontal (u). Setelah didapatkan kedua nilai tersebut maka digunakan *tools vector arithmetic* untuk membagi nilai-nilai tersebut dengan kecepatan *upstream* U_0 , hingga didapatkan nilai dari *velocity profile* dan *turbulence intensity*. Nilai yang ditampilkan pada *velocity profile* dan *turbulence intensity* masih berupa map berwarna seperti nilai *vorticity*, untuk menampilkan nilai secara detail sepanjang sumbu vertikal digunakan *tools profile plot*.



Gambar 3.21 *profile plot*

(sumber: Dantec, *Dynamic Studio Manual*, 2011)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menganalisa pola dan struktur aliran, serta melihat pengaruh dari adanya kontrol aktif aliran berupa *synthetic jet* pada model *reversed Ahmed body*, pembahasan difokuskan pada medan vektor, medan kecepatan, dan vortisitas yang terjadi pada bagian belakang dari model uji. Hasil dari eksperimen menggunakan PIV ditampilkan berupa gambar dengan besaran axis dan ordinat relatif terhadap tinggi model uji yang digunakan, yaitu $h=72\text{mm}$.

Pada masing-masing parameter, data yang diambil adalah untuk 3 kecepatan *upstream* $U_o=11.1\text{ m/s}$, $U_o=13.9\text{ m/s}$, dan $U_o=16.7\text{ m/s}$, dan masing-masing kecepatan *upstream* tersebut divariasikan menjadi tanpa kontrol aliran dan dengan kontrol aliran berupa *synthetic jet* $U_j=2.0\text{ m/s}$. Khusus pada kasus dengan kontrol aliran berupa *synthetic jet* ditampilkan hasil eksperimen pada bidang $z=0.5$ (tepat di depan *nozzel synthetic jet actuator*), hal ini bertujuan untuk melihat lebih detail lagi pengaruh penambahan kontrol aktif berupa *synthetic jet*.

4.1 Streamlines

4.1.1 Streamlines Tanpa Kontrol Aliran

Gb. 4.1 menampilkan *streamline* rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z=0$ untuk 3 variasi kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s . Pada Gb. 4.1 terlihat adanya separasi aliran yang terjadi pada bagian belakang model uji, dan mengakibatkan terjadinya daerah olakan (*wake region*). Separasi aliran terjadi akibat dari fluida yang tidak dapat lagi mengalir mengikuti bentuk permukaan model. Olakan (*wake*) juga terjadi disebabkan karena adanya *vortex longitudinal* yang terjadi pada bagian tepi sisi belakang model. *Vortex longitudinal* merupakan vortex yang sumbu putarannya searah dengan aliran. Akibat adanya separasi aliran pada bagian tengah, kecepatan aliran pada bagian tersebut akan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan aliran bagian tepi. Hal ini menyebabkan fluida pada bagian tepi akan mengalir menuju bagian tengah

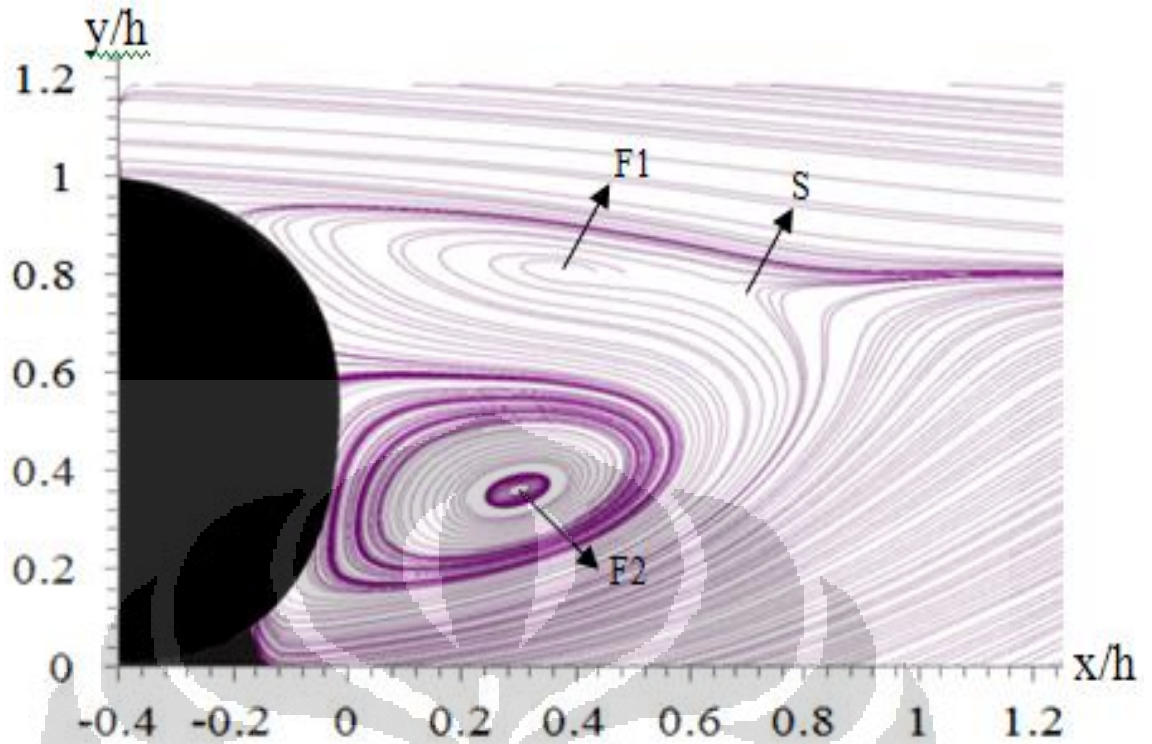
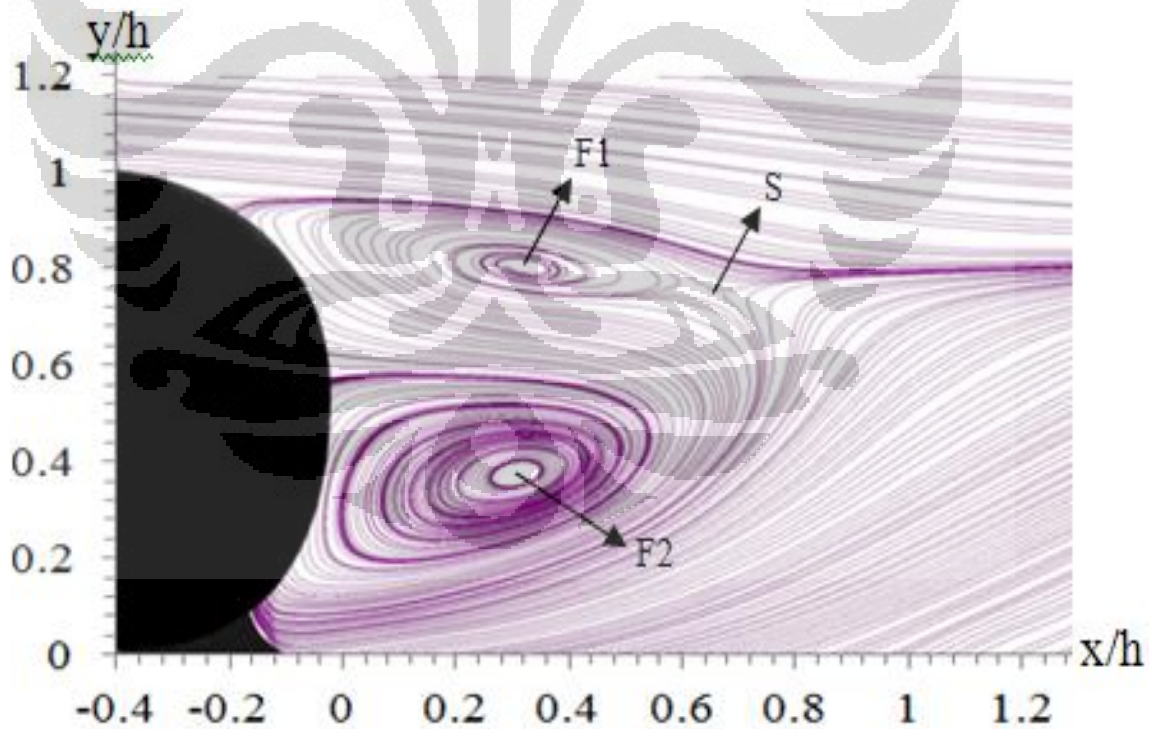
sehingga terbentuk *vortex longitudinal*. Hal ini terlihat pada Gb. 4.1 dimana olakan (*wake*) terjadi pada bagian tepi sisi belakang *reversed Ahmed body*.

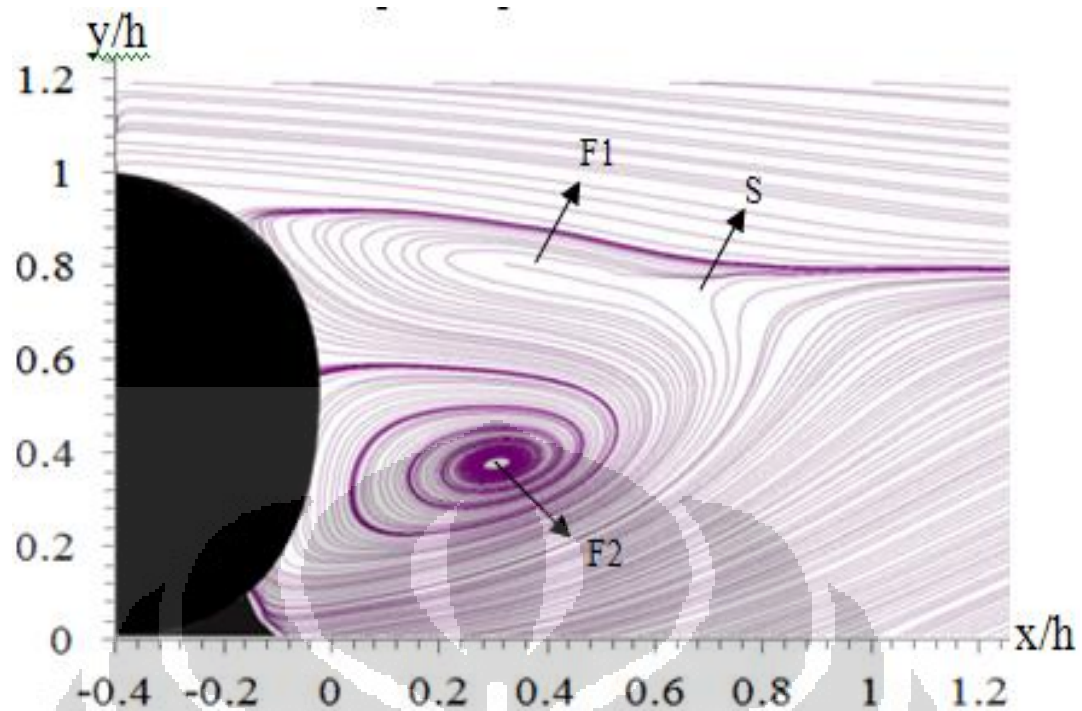
Dua resirkulasi pada Gb. 4.1 memiliki bentuk yang *asimetris* dengan dominasi oleh daerah resirkulasi bagian bawah (*down circle*). Dari tabel 4.1 terlihat adanya *trend* berkurangnya panjang daerah resirkulasi terhadap penambahan kecepatan *upstream* U_0 , terlihat pada resirkulasi bagian bawah, pada kecepatan 11.1 m/s panjang resirkulasi sebesar 0.91 kali tinggi model uji menurun seiring dengan bertambahnya kecepatan *upstream* berangsur hingga 0.79 kali tinggi model uji 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).

Titik pusat aliran balik pada bagian atas (F1) dan titik pusat aliran balik pada bagian bawah (F2) dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi saddle point yang mengindikasikan berakhirnya zona resirkulasi ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i>	F1 (<i>up circle</i>)			F2 (<i>down circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang	Posisi		Panjang	Posisi	
	(m/s)	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h
1	11.1	0.39	0.86	0.68	0.32	0.39	0.91	0.74	0.84
2	13.9	0.36	0.86	0.72	0.34	0.39	0.88	0.74	0.81
3	16.7	0.35	0.83	0.66	0.34	0.40	0.79	0.80	0.83

a. Kecepatan *upstream*, $U_0=11.1$ m/sb. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9$ m/s



c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

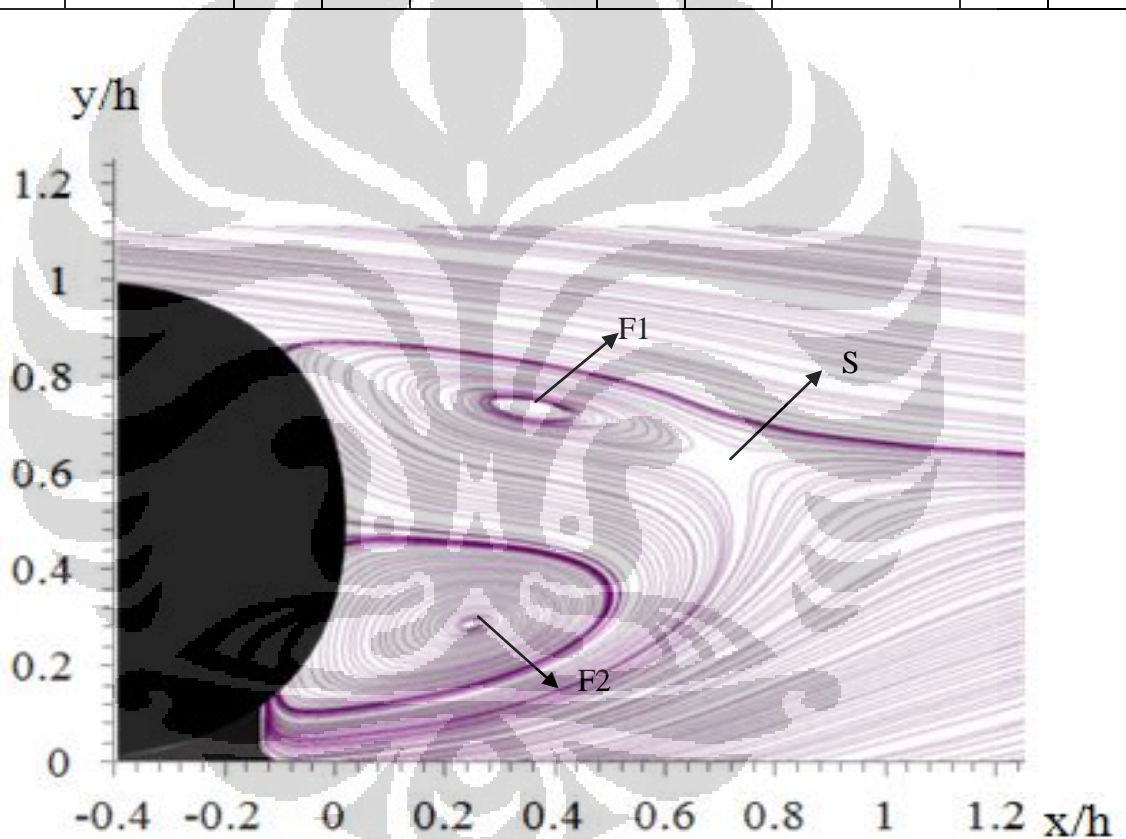
Gambar 4.1 *Streamline* rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$

4.1.2 *Streamlines* Dengan Kontrol Aliran *Synthetic Jet*

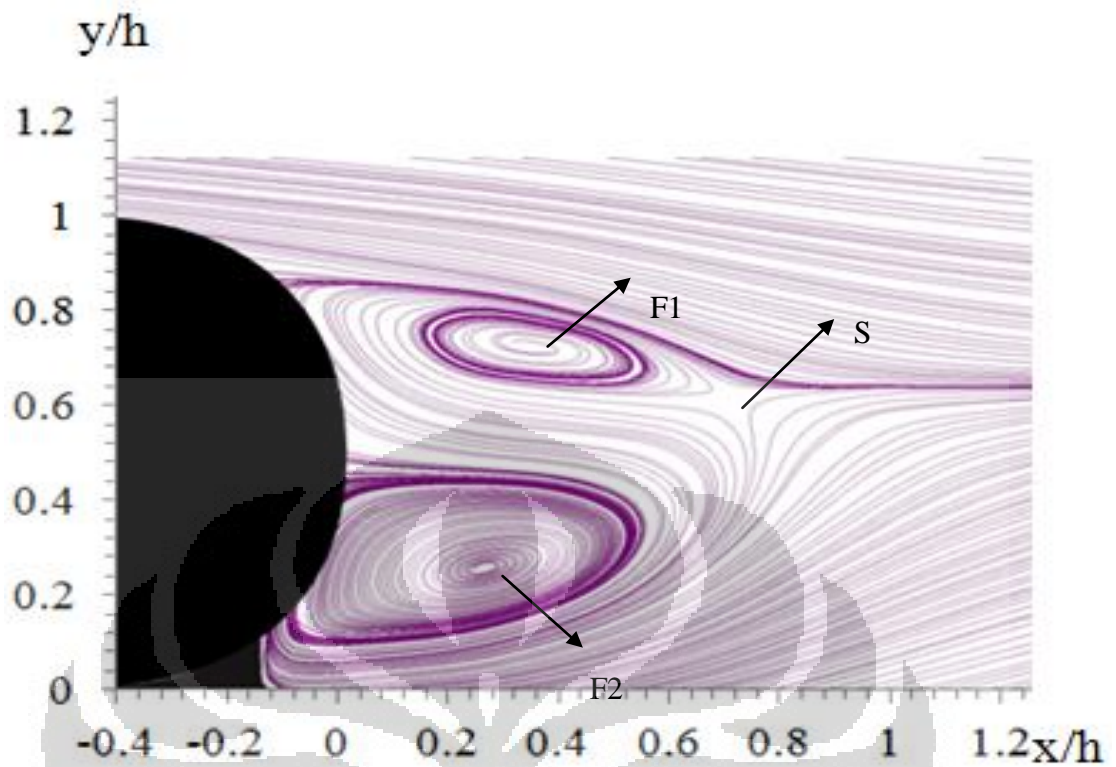
Pengaruh kontrol aliran *synthetic jet* terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan pada bagian belakang dari model uji pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 4.2. Kecepatan *synthetic jet* diset pada 2.0 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.3. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya saddle point (S) dirangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

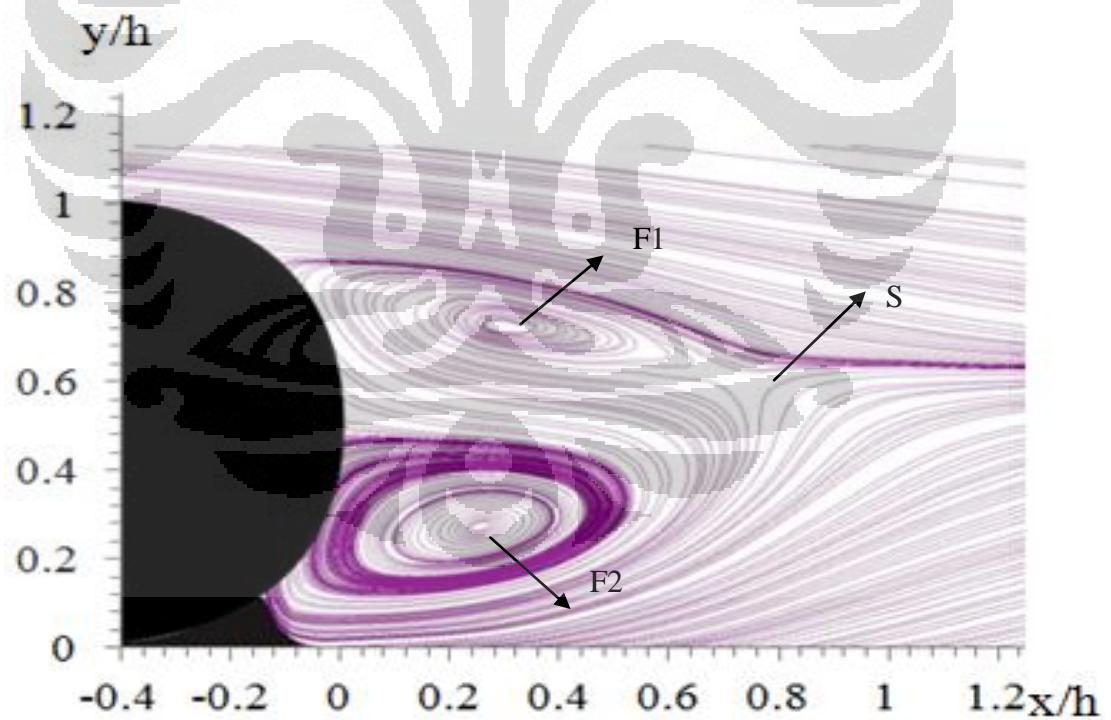
No.	Kecepatan	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>down circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
	<i>upstream</i> ,	Posisi		Panjang	Posisi		Panjang	Posisi	
	(m/s)	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h
1	11.1	0.35	0.81	0.66	0.25	0.31	0.74	0.71	0.69
2	13.9	0.35	0.80	0.68	0.27	0.29	0.76	0.70	0.67
3	16.7	0.31	0.79	0.67	0.28	0.30	0.76	0.71	0.65



a. Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s



b. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9$ m/s



c. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.2 Streamline rata-rata dengan kontrol aliran *synthetic jet* di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$

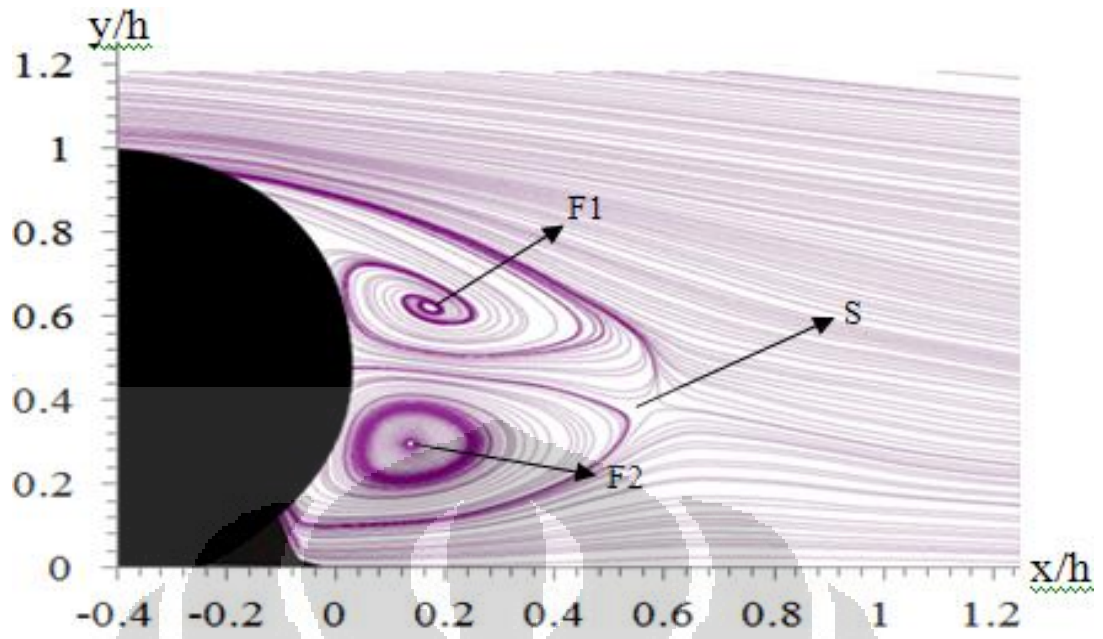
Kontrol aliran *synthetic jet* dengan kecepatan 2.0 m/s yang ditempatkan di bagian belakang pada bidang $z = 0.5$ (bidang yang mengenai kontrol aktif aliran) dengan 3 tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s memperlihatkan *streamline* rata-rata yang diperoleh, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 4.3. Dengan ditematkannya *synthetic jet* tersebut, memberikan efek terhadap *streamline* rata-rata yang diperoleh. Pada Gb. 4.3 dengan penambahan kontrol aliran *synthetic jet*, terlihat dua resirkulasi lebih terlihat *simetris* dibandingkan dengan pada Gb.4.1 tanpa kontrol aliran yang didominasi oleh resirkulasi dari bagian bawah model uji.

Selain perbedaan bentuk resirkulasi, titik *Foci* F1 dan F2 juga mengalami pergeseran kearah model uji yang cukup signifikan, rata-rata lebih dari 50% mendekati model uji. Glazer et al (2003) menjelaskan dalam tulisanya bahwa *synthetic jet actuator* memang memiliki fitur yang unik, yaitu dapat memodifikasi dengan efektif lapisan batas *shear flow* dengan menciptakan yang disebut dengan *closed recirculating flow* mendekati permukaan dari *solid surface*. Pada kenyataanya, *synthetic jet fluid* sebenarnya mempenetrasi lapisan batas untuk memberikan efek medan aliran secara keseluruhan terhadap *solid body*.

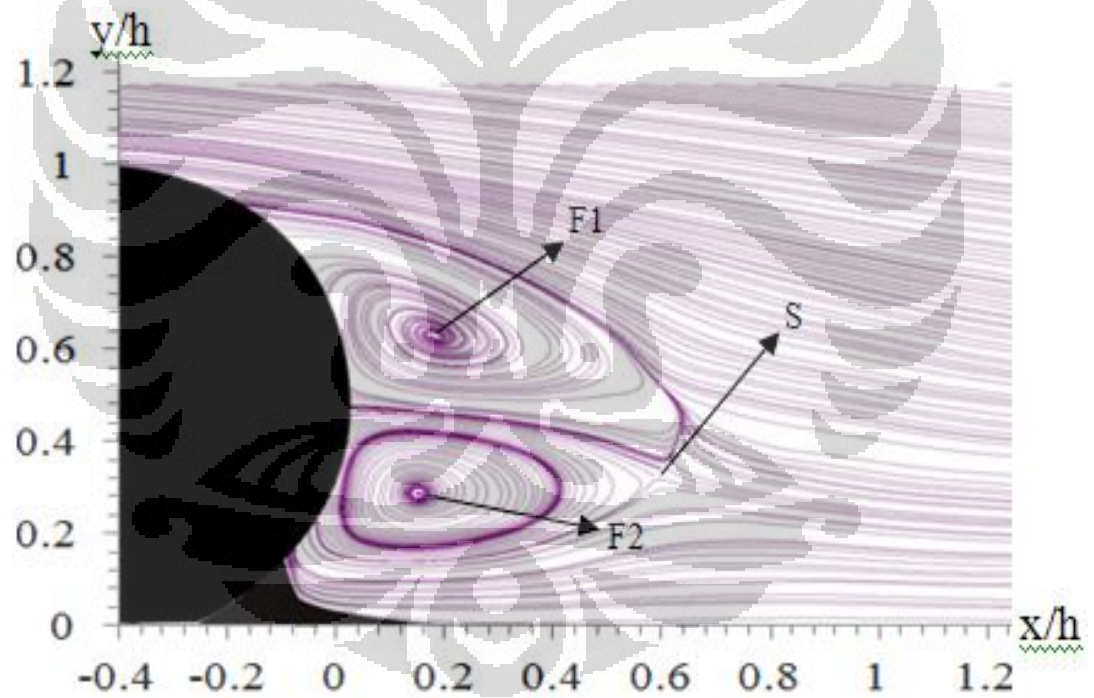
Titik F1 dan titik dengan panjang daerah resirkulasinya serta saddle point (S) diberikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang $z = 0.5$.

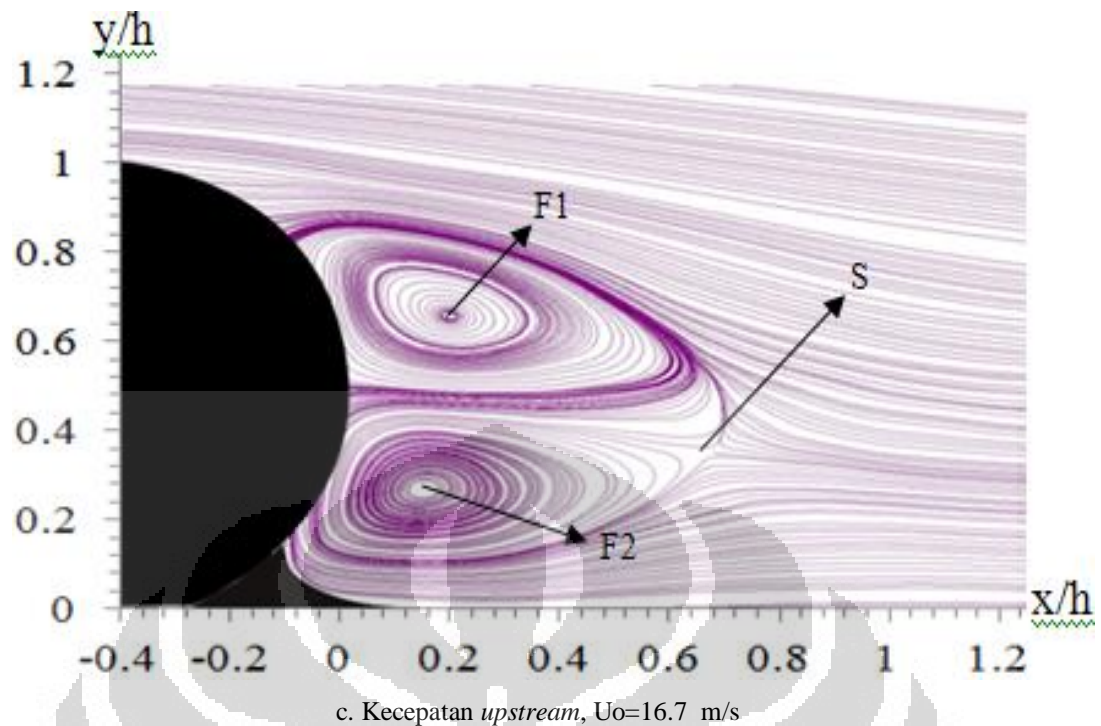
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>down circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang	Posisi		Panjang	Posisi	
	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h	
1	11.1	0.17	0.64	0.65	0.14	0.29	0.53	0.61	0.39
2	13.9	0.18	0.64	0.67	0.15	0.28	0.55	0.58	0.32
3	16.7	0.20	0.67	0.67	0.16	0.26	0.61	0.63	0.34



a. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 11.1$ m/s



b. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9$ m/s

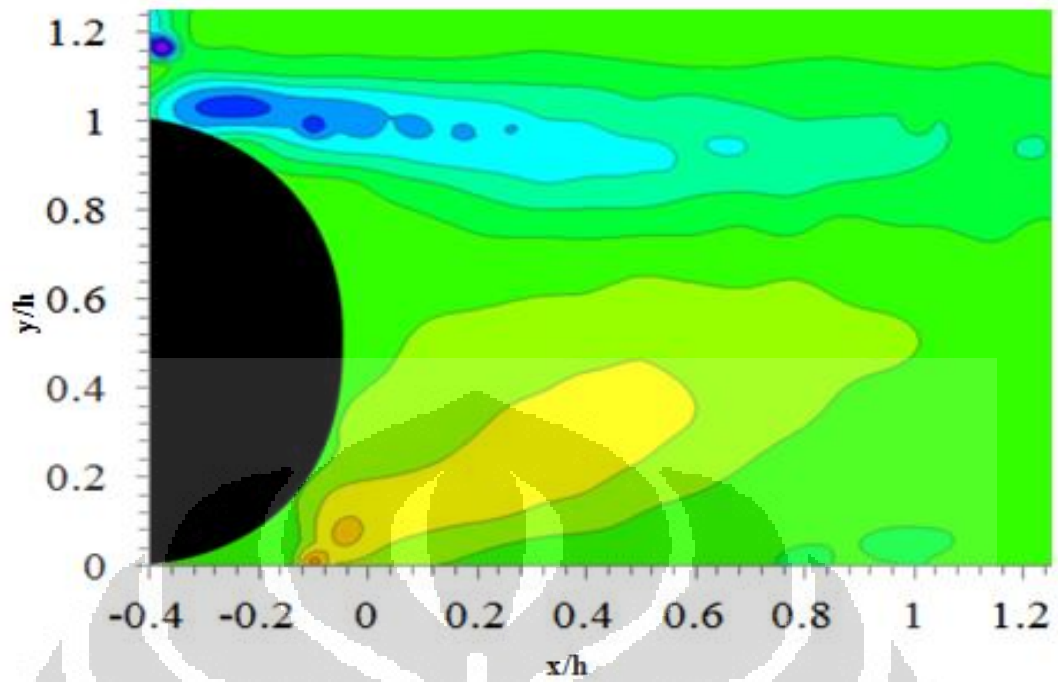


Gambar 4.3 *Streamline* dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0$

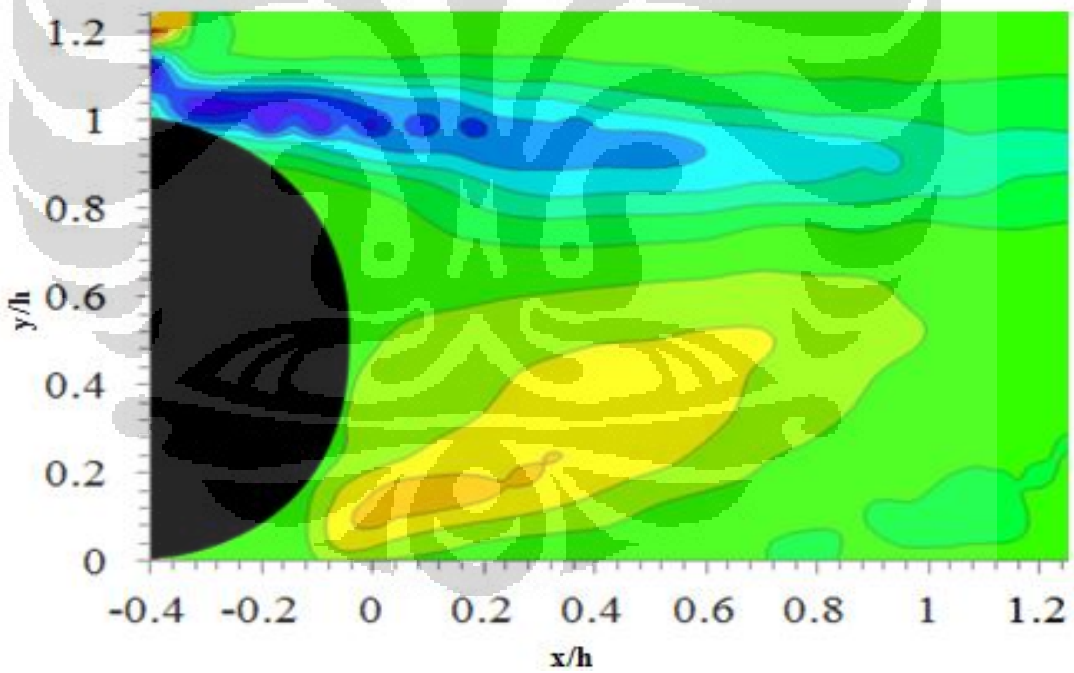
4.2 Vortisitas

4.2.1 Vortisitas Tanpa Kontrol Aliran

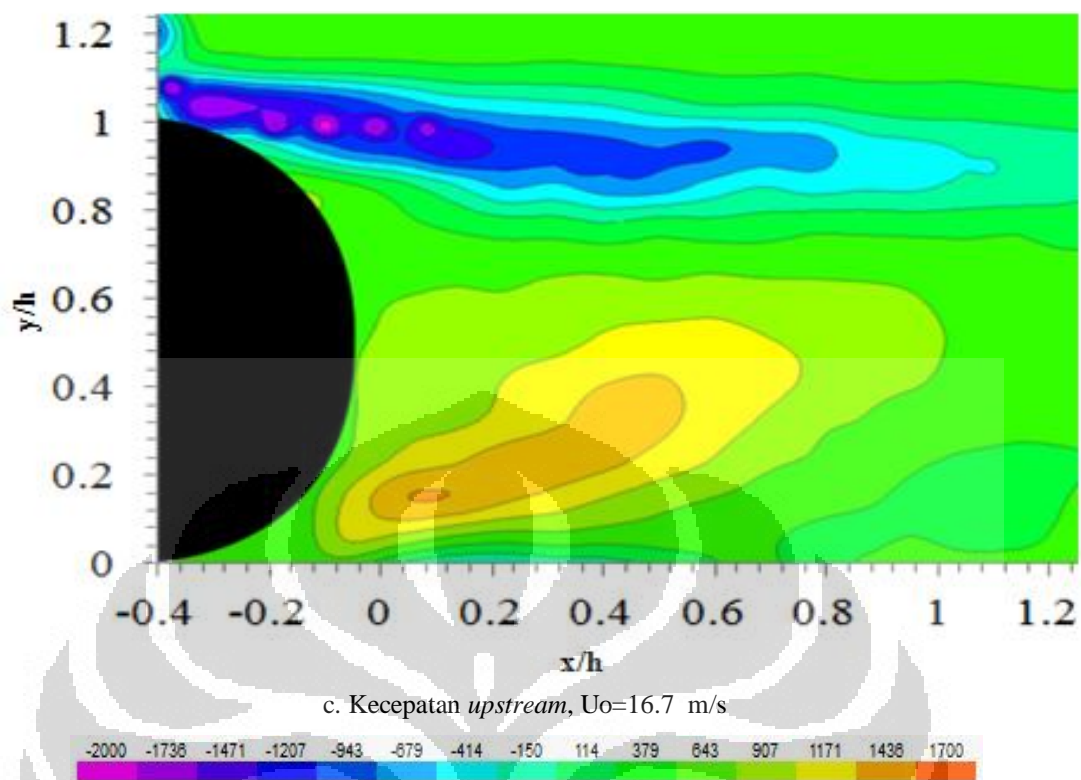
Vortisitas rata-rata tanpa kontrol dan dengan kontrol aktif *synthetic jet* aliran di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ untuk 3 variasi kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Panjang daerah vortisitas pada bagian bawah resirkulasi (*down circle*) diberikan pada Tabel 4.4.



a. Kecepatan *upstream*, $U_0=11.1$ m/s



b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9$ m/s



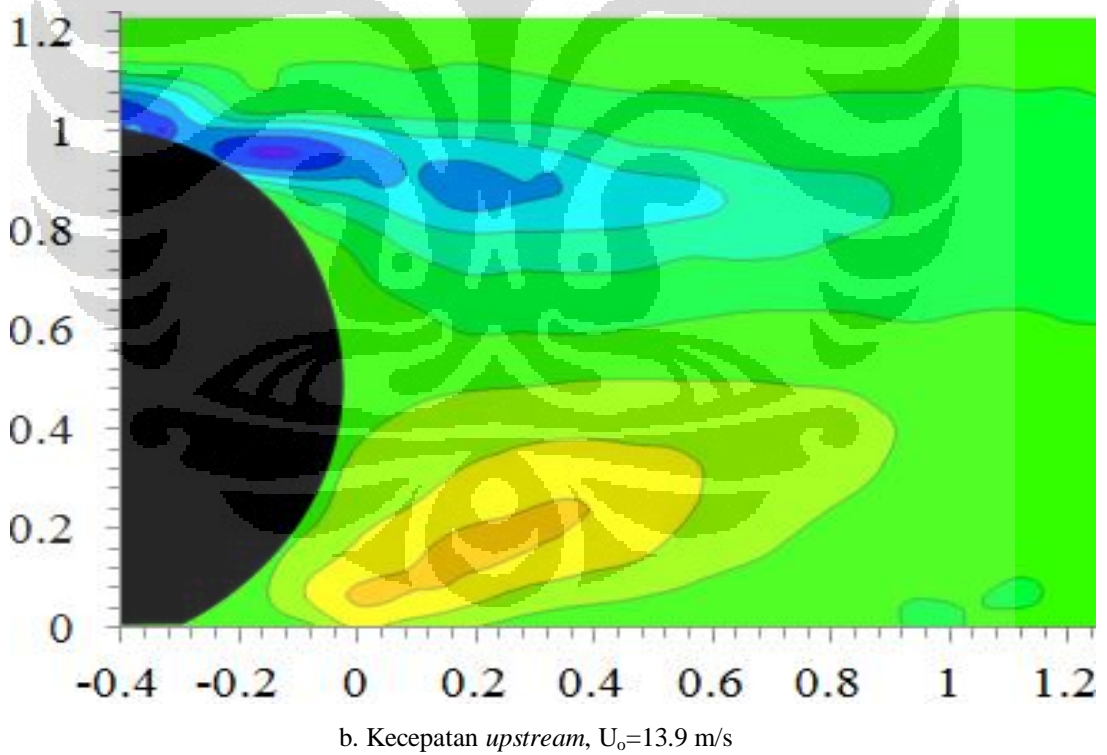
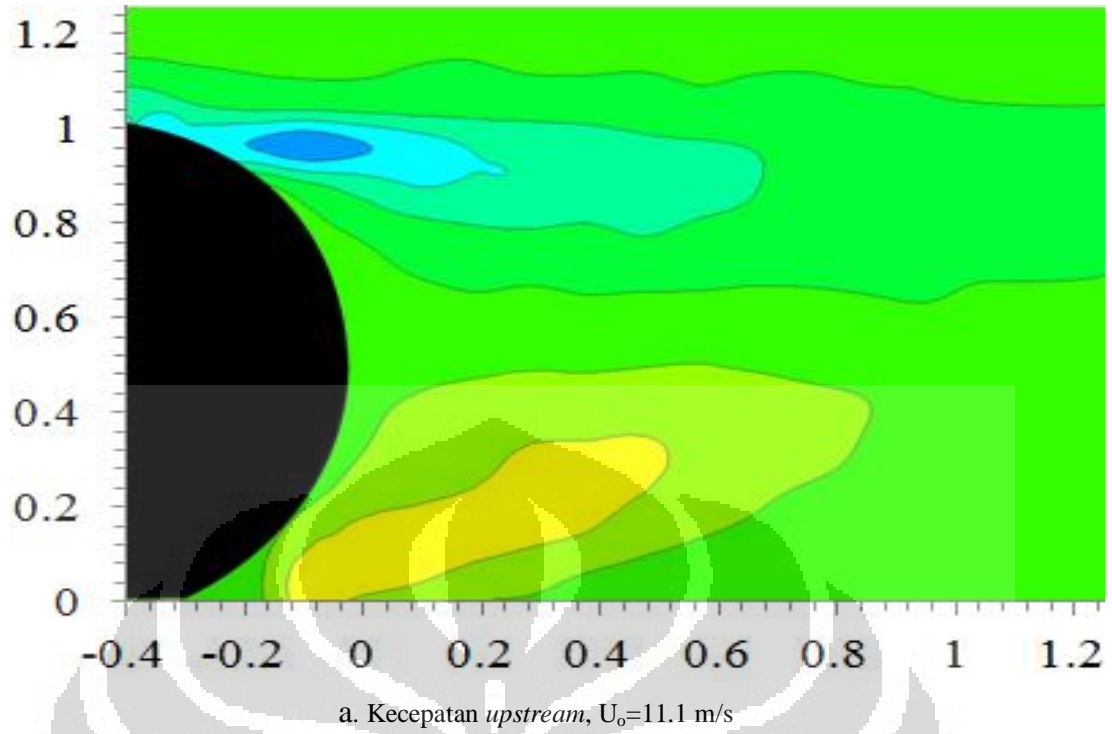
gambar 4.4 vortisitas tanpa eksitasi di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0$

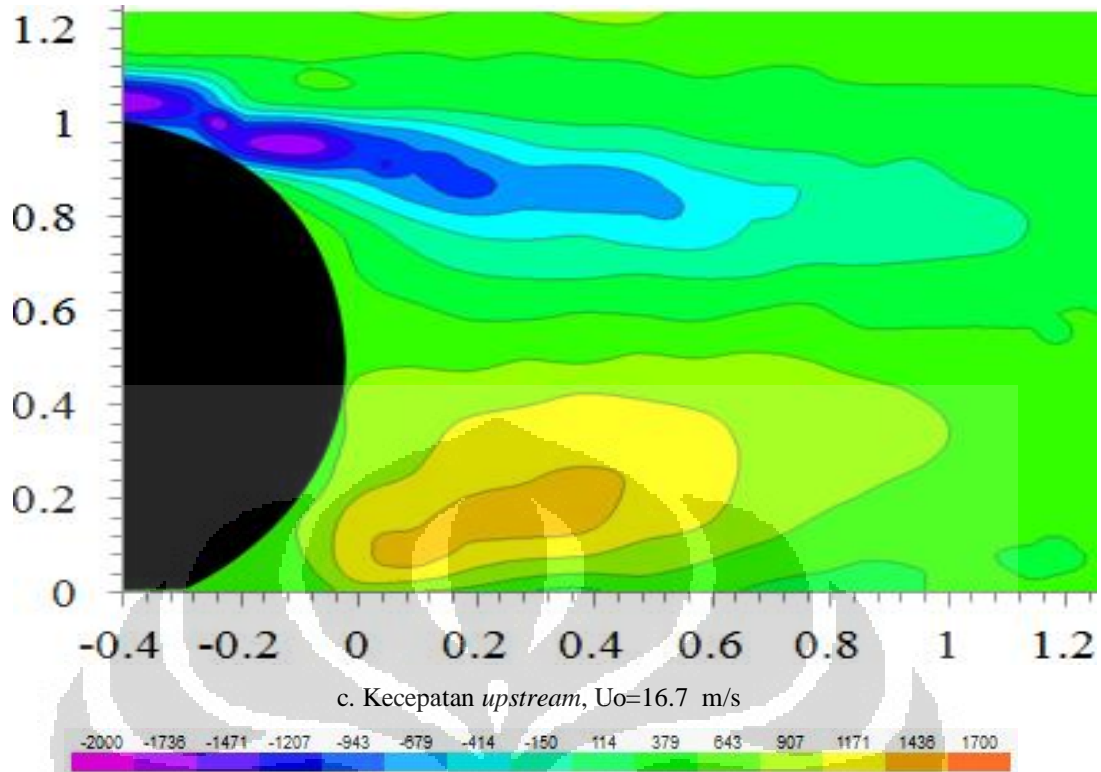
Tabel 4.4 panjang vortisitas positif tanpa kontrol aliran ,bidang $z = 0$

	panjang vortisitas luar (mm)	besar vortisitas dalam (mm)
vortisitas positif	$643 < \zeta < 907$	$\zeta > 1171$
Tanpa eksitasi $u_0=40$ $z=0$	90.69	58.53
Tanpa eksitasi $u_0=50$ $z=0$	85.10	66.15
Tanpa eksitasi $u_0=60$ $z=0$	87.65	64.87

4.2.2 Vortisitas Dengan Kontrol Aliran *Synthetic Jet*

Kecepatan *synthetic jet* diset pada 2.0 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Panjang daerah vortisitas pada bagian bawah resirkulasi (vortisitas positif) diberikan pada Tabel 4.5.





gambar 4.5 vortisitas dengan *synthetic jet* $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0$

Pengaruh kontrol aliran *synthetic jet* terhadap vortisitas rata-rata yang dihasilkan pada bagian belakang dari model uji pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 4.5. terdapat pengurangan panjang dari vortisitas pada hasil dengan penambahan *synthetic jet*. Pengurangan vortisitas ditampilkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.5 panjang vortisitas positif dengan *synthetic jet* di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang $z = 0$

vortisitas positif	panjang vortisitas luar (mm)	panjang vortisitas dalam (mm)
	$643 < \zeta < 907$	$\zeta > 1171$
<i>synthetic jet</i> $u_0=40$ $z=0$	76.50	39.14
<i>synthetic jet</i> $u_0=50$ $z=0$	77.25	50.24
<i>synthetic jet</i> $u_0=60$ $z=0$	76.91	50.62

Tabel 4.6 Pengurangan vortisitas positif akibat penambahan kontrol aktif *synthetic jet*

vortisitas positif	beda ζ/h (luar)	beda ζ/h (dalam)
	$643 < \zeta < 907$	$\zeta > 1171$
$u_0=40$ $z=0$	0.19	0.26
$u_0=50$ $z=0$	0.10	0.22
$u_0=60$ $z=0$	0.14	0.19

Panjang daerah vortisitas dan besar pengurangan panjang vortisitas pada bagian atas resirkulasi (*up circle*) diberikan pada Tabel 4.7, dan Tabel 4.8.

Tabel 4.7 panjang vortisitas negatif dengan *synthetic jet* pada bidang $z = 0$

vortisitas (<i>up circle</i>)	besar vortisitas luar (mm)	besar vortisitas dalam (mm)
	$643 < \zeta < 907$	$\zeta > 1171$
sycjet $u_0=40$ $z=0$	76.89	46.99
sycjet $u_0=50$ $z=0$	93.61	74.24
sycjet $u_0=60$ $z=0$	109.83	82.46

Tabel 4.8 Pengurangan vortisitas negatif akibat penambahan kontrol aktif *synthetic jet*

vortisitas <i>negatif</i>	beda ζ/h (luar)	beda ζ/h (dalam)
	$643 < \zeta < 907$	$\zeta > 1171$
$u_0=40$ $z=0$	27.27	21.12
$u_0=50$ $z=0$	11.72	14.78
$u_0=60$ $z=0$	30.41	25.67

Gb 4.4 dan Gb 4.5 menunjukkan dua buah kontur dari vortisitas yang memiliki arah putaran yang berbeda, pada bagian atas vortisitas memiliki nilai negatif dengan putaran searah putaran jarum jam, sedangkan pada bagian bawah vortisitas memiliki nilai positif dengan arah putaran berlawanan arah dengan putaran jarum jam. Kontur vortisitas negatif bergerak horizontal pada bagian atas

model uji, sedangkan kontur vortisitas positif bergerak mendekati bagian atas dari model uji.

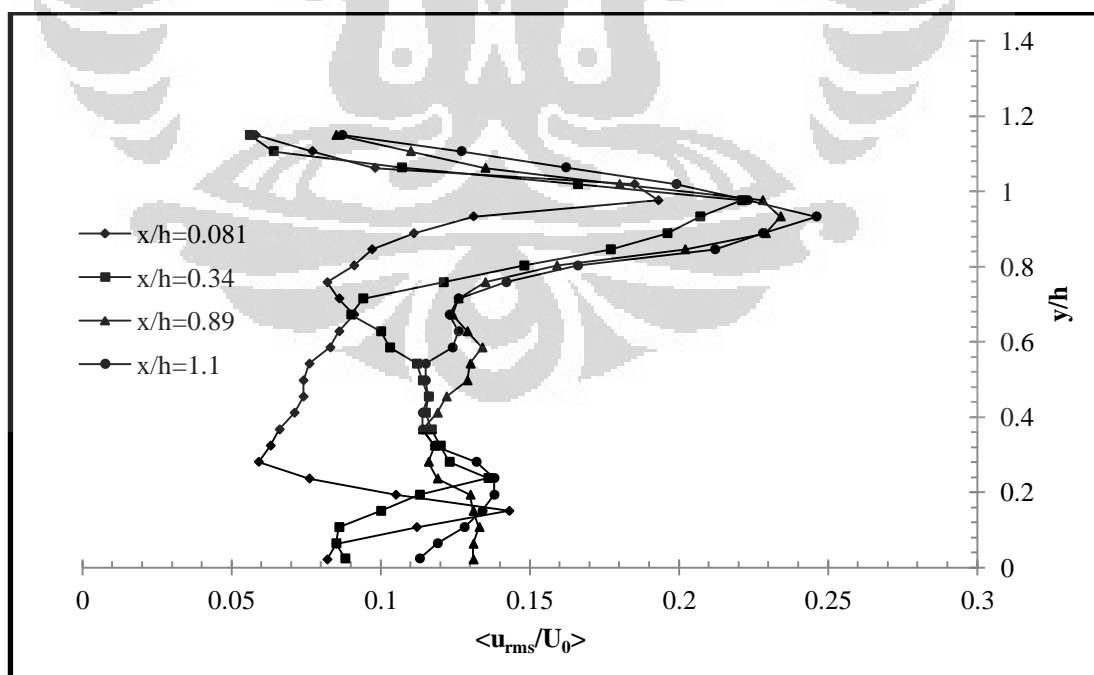
Secara umum, terjadi pengurangan panjang daerah vortisitas positif dan negatif dengan penambahan kontrol aktif *synthetic jet*, pada vortisitas negatif pengurangan panjang dari daerah vortisitas maksimum terjadi pada kecepatan *upstream* $U_0=16.7\text{m/s}$ hingga 42.64%, sedangkan pada vortisitas positif pengurangan panjang daerah vortisitas maksimum terjadi pada kecepatan *upstream* $U_0=11.1\text{m/s}$ hingga 12.87%.

4.3 Intensitas Turbulensi

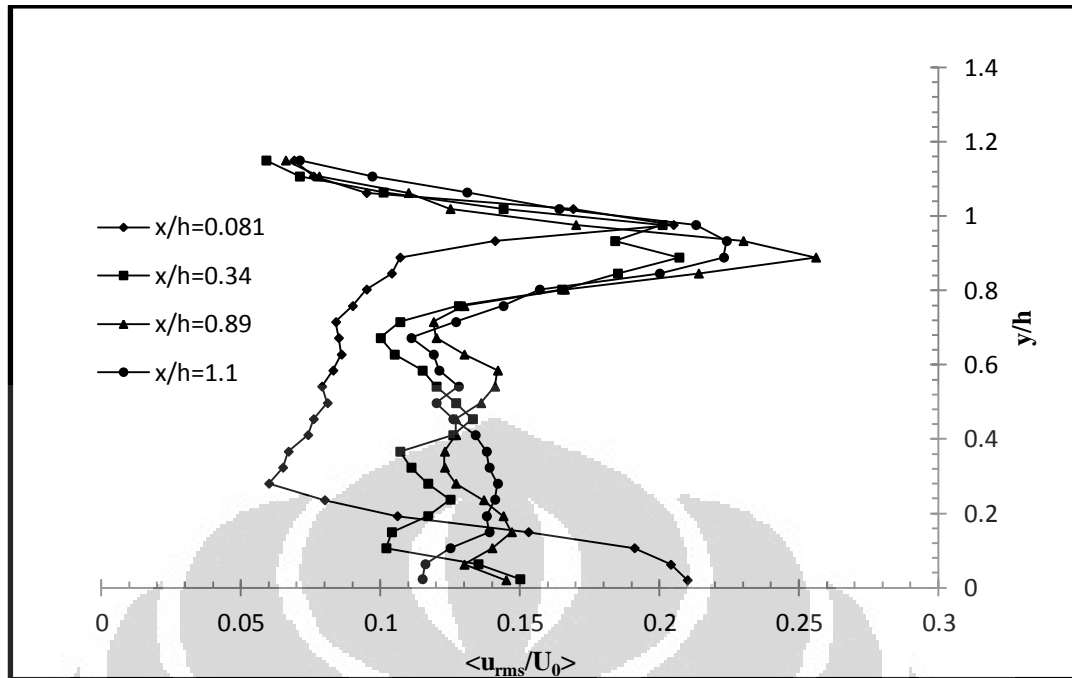
Intensitas turbulensi yang ditampilkan merupakan besaran yang terdapat pada sisi belakang model uji, nilai intensitas turbulensi diperoleh sepanjang garis-*y* pada posisi $x/h=0.081$, $x/h=0.34$, $x/h=0.89$, $x/h=1.1$.

4.3.1 Tanpa Kontrol Aktif

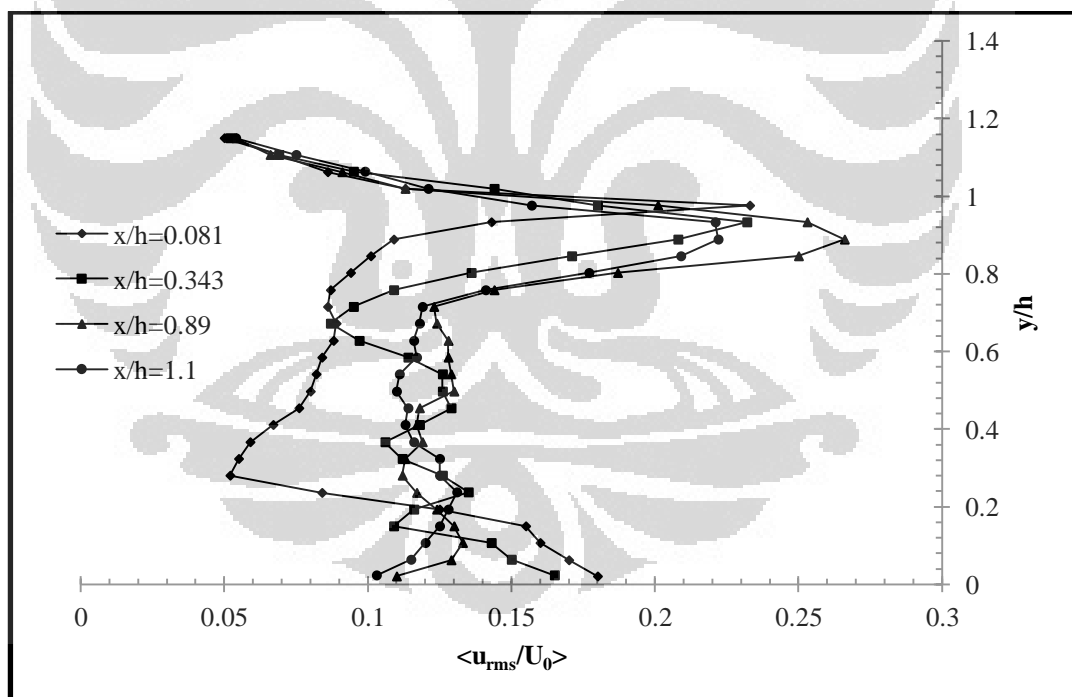
Berikut ini akan ditampilkan grafik intensitas turbulensi tanpa penambahan kontrol aliran.



a. Kecepatan *upstream*, $U_0=11.1\text{ m/s}$



b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9 \text{ m/s}$



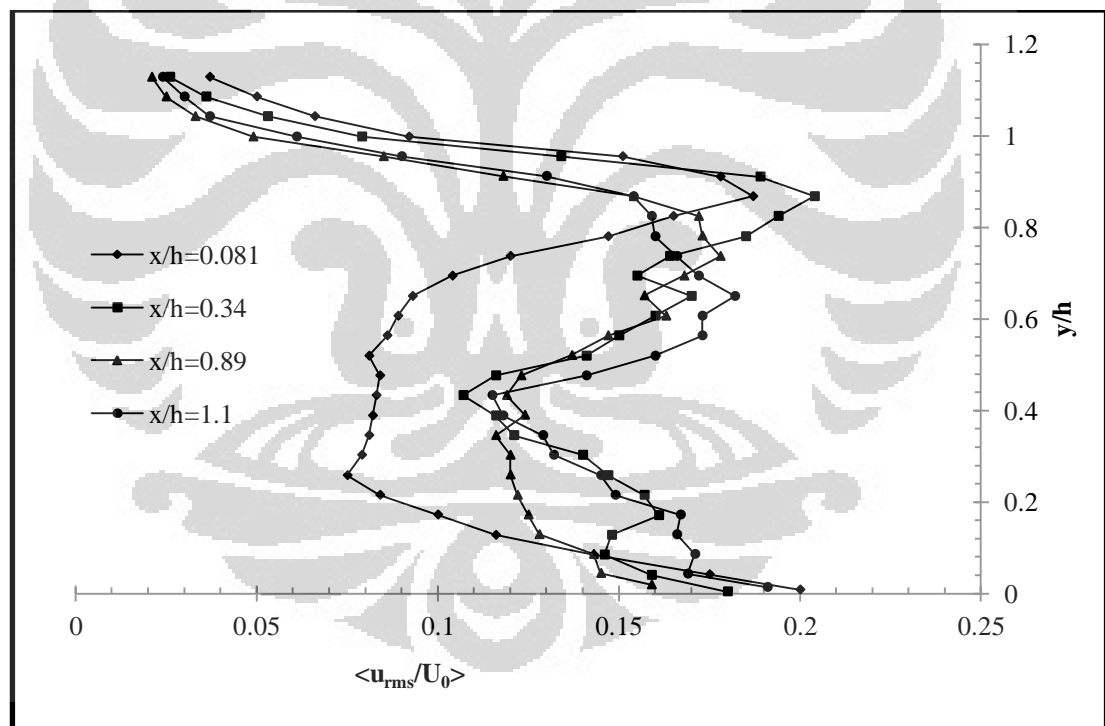
c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7 \text{ m/s}$

gambar 4.6 Intensitas Turbulensi pada $z=0$ tanpa kontrol aliran

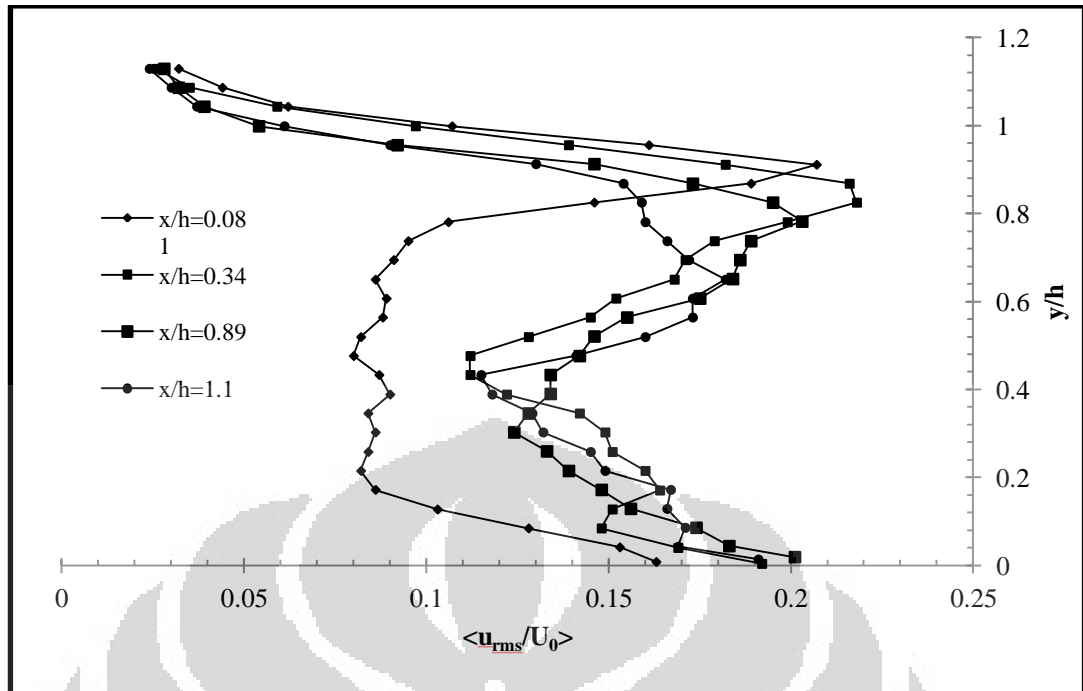
Pada Gb 4.6 diketahui bahwa nilai intensitas turbulensi yang besar terjadi pada sisi tepi atas bagian belakang model. Hal ini sesuai dengan Gb 4.1 dimana pada bagian tepi atas terjadi olakan (*wake*) yang disebabkan oleh separasi aliran. Pada kecepatan *upstream* $U_o = 11.1$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 0.24 pada $y/h=0.93$. Pada kecepatan *upstream* $U_o = 13.9$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 0.25 pada $y/h= 0.88$. Sedangkan pada kecepatan *upstream* $U_o = 16.7$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 0.26 pada $y/h= 0.88$.

4.3.2 Dengan Kontrol Aliran *Synthetic jet*

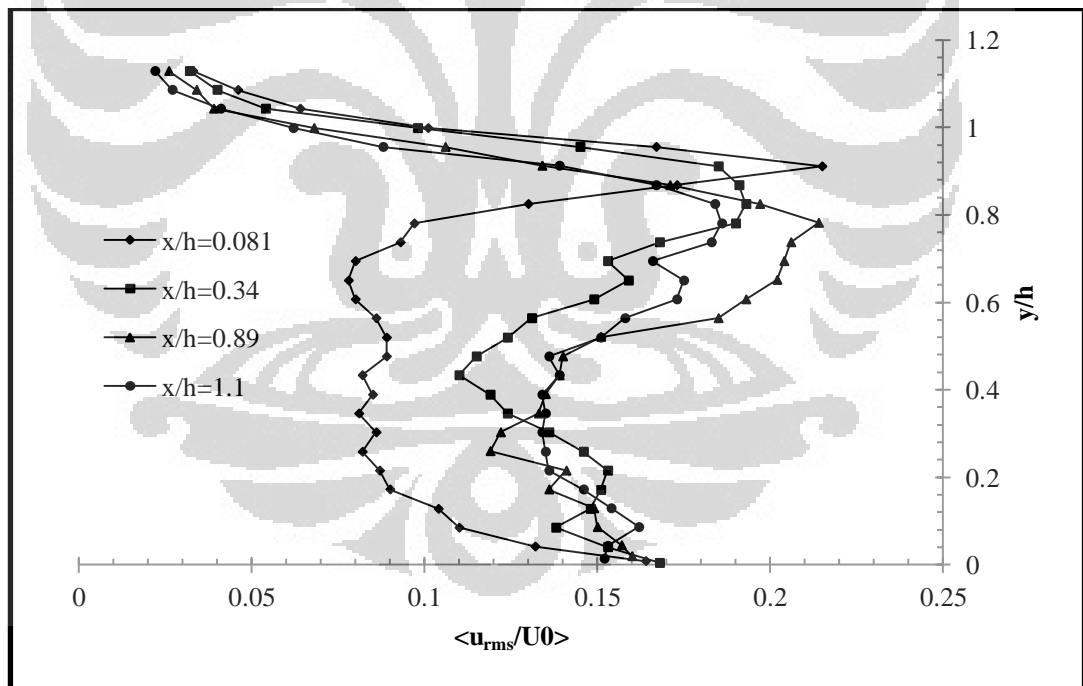
Berikut ini adalah grafik intensitas turbulensi dengan penambahan kontrol aktif berupa *synthetic jet* pada $z=0.5$.



a. Kecepatan *upstream*, $U_o=11.1$ m/s



b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9 \text{ m/s}$



c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7 \text{ m/s}$

gambar 4.7 Intensitas Turbulensi pada $z=0.5$ dengan kontrol aliran *synthetic jet*

Pada Gb 4.7 diketahui bahwa nilai intensitas turbulensi pada kecepatan *upstream* $U_o = 11.1$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 0.20 pada $y/h = 0.86$. Pada kecepatan *upstream* $U_o = 13.9$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 0.21 pada $y/h = 0.84$. Sedangkan pada kecepatan *upstream* $U_o = 16.7$ m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 0.22 pada $y/h = 0.91$.

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

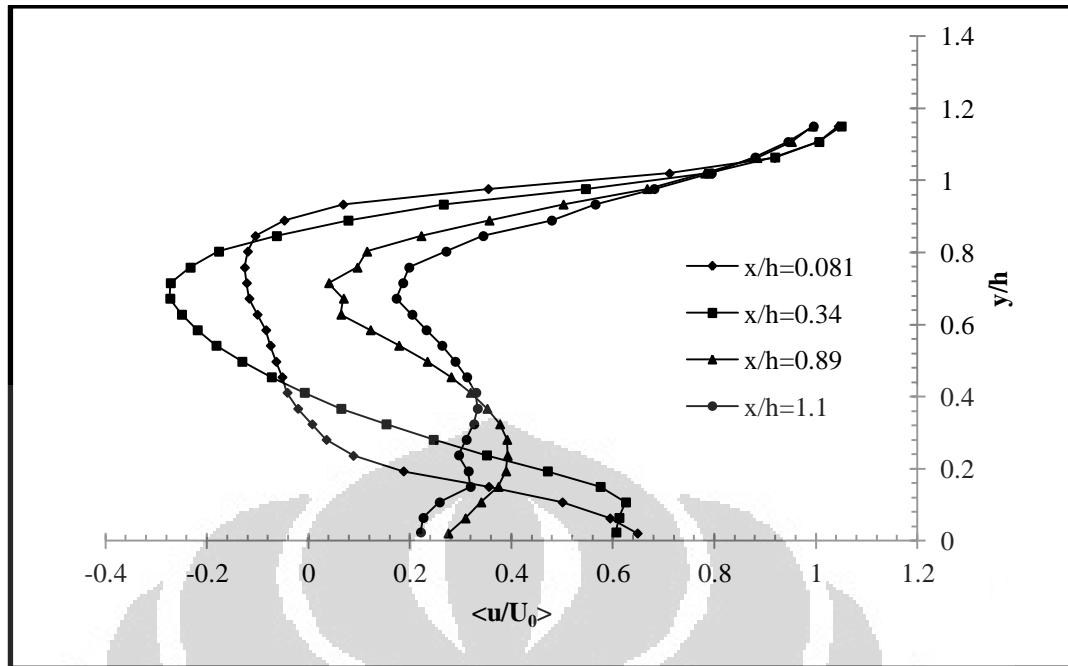
Pengurangan intensitas turbulensi ini karena kontrol aliran berupa *synthetic jet* mampu mengurangi olakan (*wake*) yang terjadi di belakang model *reversed Ahmed body* seperti yang terlihat pada Gb 4.6, dan 4.7.

4.4 Profil Kecepatan

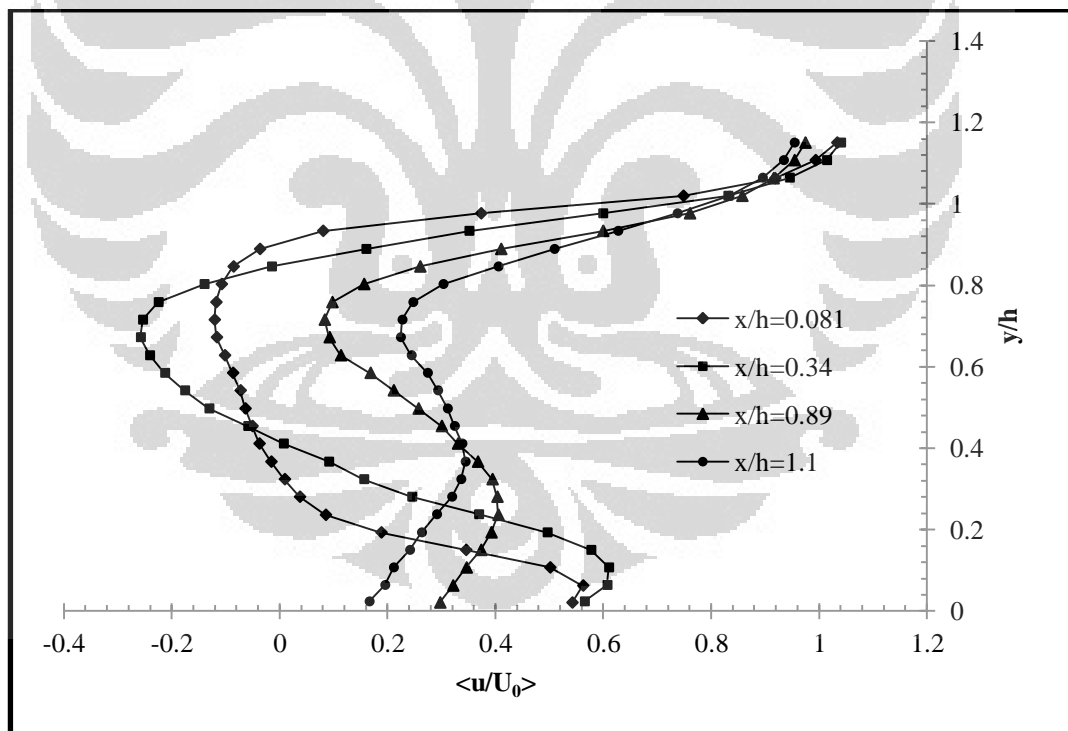
Profil kecepatan yang ditampilkan merupakan besaran yang terdapat pada sisi belakang model uji, nilai profil kecepatan diperoleh sepanjang garis-y pada posisi $x/h = 0.08$, $x/h = 0.34$, $x/h = 0.89$, $x/h = 1.1$.

4.4.1 Tanpa Kontrol Aktif

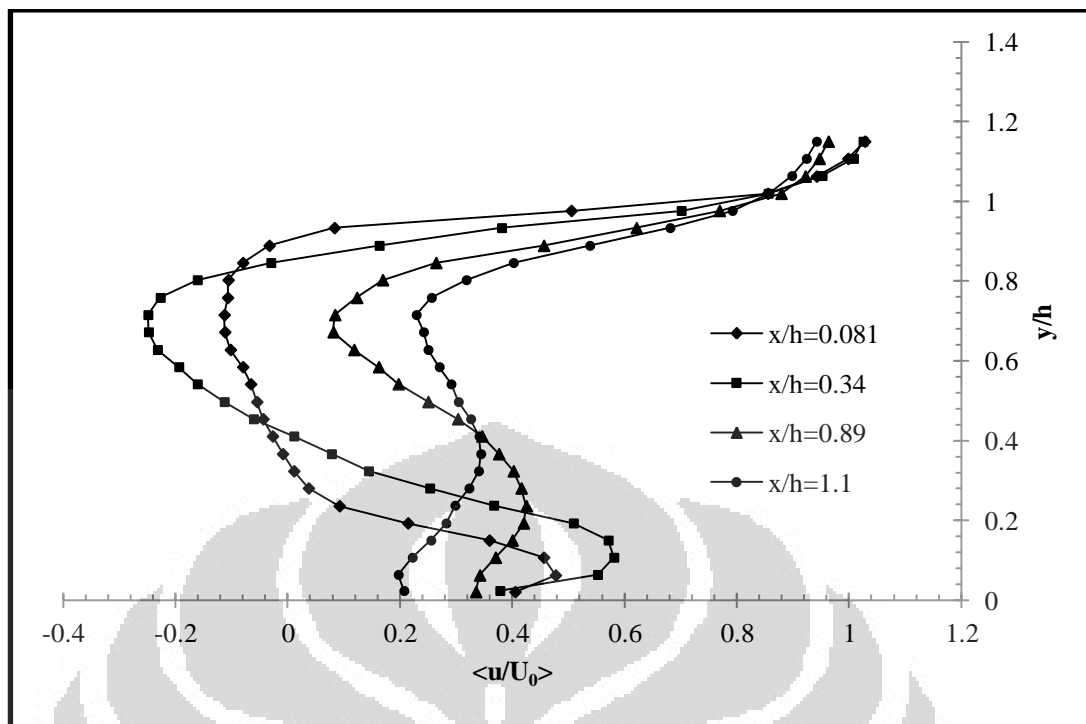
Berikut ini akan ditampilkan grafik profil kecepatan tanpa penambahan kontrol aliran.



a. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 11.1 \text{ m/s}$



b. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9 \text{ m/s}$



c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

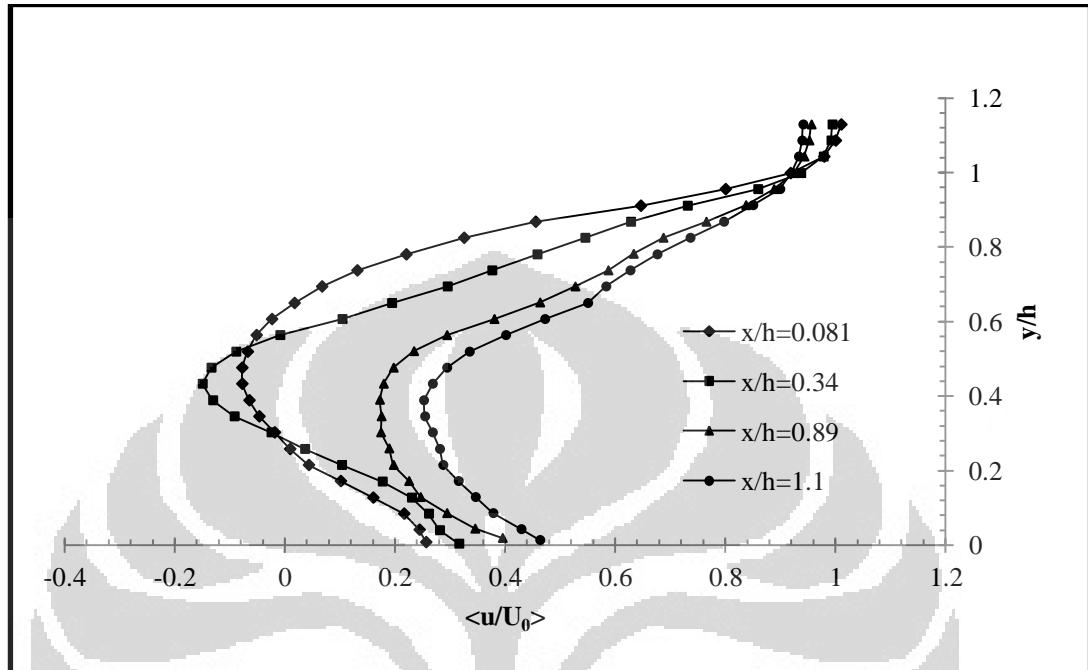
gambar 4.8 Profil Kecepatan tanpa kontrol aktif aliran

Pada Gb 4.8 diketahui bahwa nilai profil kecepatan mendekati nilai 1.0 terjadi pada sisi tepi atas bagian belakang model. Hal ini sesuai dengan Gb. 4.1 dimana pada bagian tepi atas kecepatan aliran berangsur-angsur mendekati dari kecepatan *upstream* (U_0). Pada bagian $x/h=0.081$ dan $x/h=0.34$ terdapat profil kecepatan yang memiliki nilai negatif, hal ini menandakan daerah terjadinya aliran balik (berlawanan dengan arah aliran *upstream*, U_0), seperti yang terlihat pada Gb 4.1 aliran balik (resirkulasi) terbesar terjadi pada bagian tepi atas model yang mempengaruhi besaran maksimum nilai negatif dari hasil profil kecepatan.

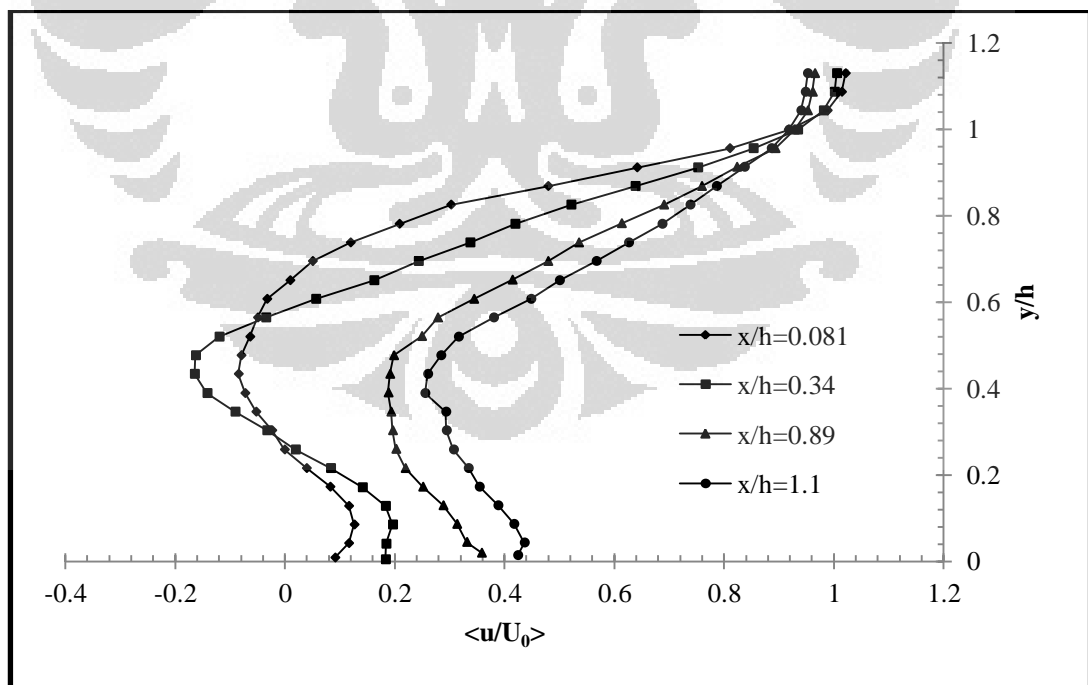
Pada bagian terdekat model uji yaitu, $x/h=0.081$, dan $x/h=0.34$ terdapat puncak positif nilai profil kecepatan pada bagian bawah model uji, hal ini menunjukkan adanya aliran berkecepatan tinggi hasil pengaruh bagian bawah model terhadap sisi jalan.

4.4.2 Dengan Kontrol Aktif Aliran *Synthetic jet*

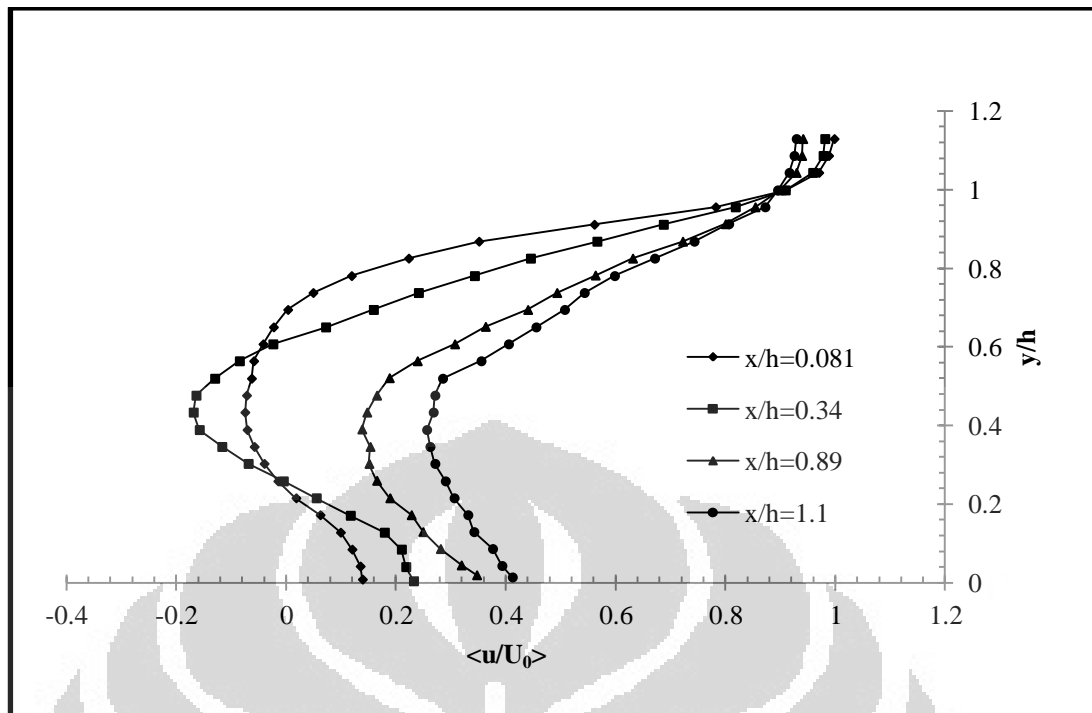
Berikut ini akan ditampilkan grafik profil kecepatan dengan penambahan kontrol aliran *synthetic jet*.



a. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 11.1 \text{ m/s}$



b. Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9 \text{ m/s}$



c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

gambar 4.9 Profil Kecepatan dengan kontrol aktif aliran *synthetic jet*

Pengaruh penambahan kontrol aliran *synthetic jet* dapat terlihat pada Gb 4.9. secara umum, puncak nilai negatif profil kecepatan berpindah dari sisi atas model (pada kisaran $x/h=0.72$) ke arah tengah (pada kisaran $x/h=0.48$) dari model uji. Hal ini memperkuat hasil dari *streamlines* yang menunjukkan pengaruh dari kontrol aliran adalah membuat daerah resirkulasi menjadi terlihat lebih simetris dan memindahkan posisi *saddle point* posisi sebelumnya di bagian sisi atas model uji pada Gb 4.1 tanpa kontrol aliran menjadi lebih ke arah tengah dari model uji pada Gb 4.3 dengan kontrol aktif *synthetic jet*.

Selain mengubah bentuk dari profil kecepatan, penambahan kontrol aliran *synthetic jet* juga mempengaruhi nilai dari profil kecepatan yang didapat, pada Gb 4.8 terlihat bahwa nilai negatif dari profil kecepatan melebihi -0.20 bahkan hingga menembus nilai -0.27, sedangkan dengan penambahan kontrol aktif *synthetic jet*, nilai negatif dari profil kecepatan cenderung mengalami penurunan dan tidak melebihi dari -0.20. hal ini menunjukkan bahwa penambahan kontrol aktif *synthetic jet* mengurangi besaran kecepatan dari aliran balik (reirkulasi) yang terjadi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

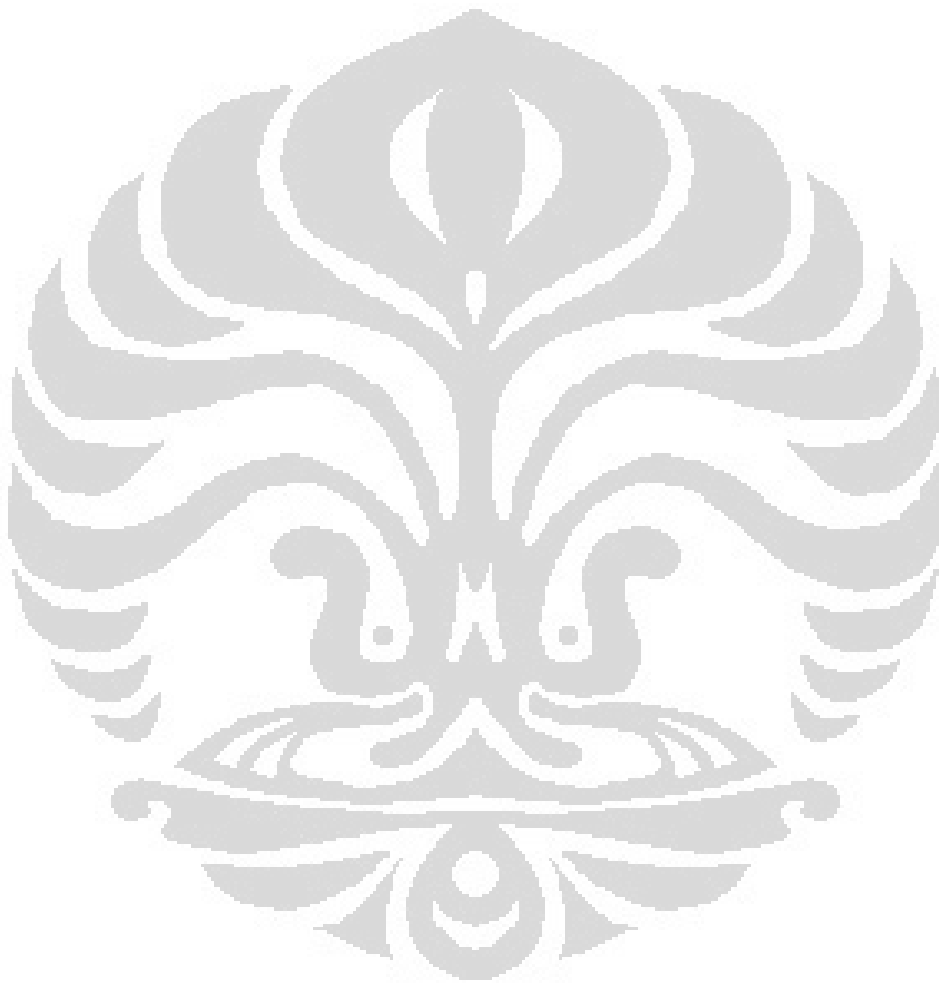
5.1 Kesimpulan

Dari eksperimental menggunakan PIV yang telah dilakukan dalam penelitian pengaruh kontrol aktif berupa *synthetic jet* pada *reversed Ahmed body* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan kontrol aktif aliran berupa *synthetic jet* mempengaruhi medan kecepatan aliran, vortisitas dan intensitas turbulensi pada model *reversed Ahmed body*.
2. Dengan penambahan kontrol aliran *synthetic jet*, terlihat dua resirkulasi yang lebih terlihat *simetris* dibandingkan dengan tanpa kontrol aliran yang berbentuk *asimetris* dan didominasi oleh resirkulasi dari bagian bawah model uji.
3. Pengaruh kontrol aliran *synthetic jet* terhadap titik *Foci* F1 (titik pusat resirkulasi) dan F2 adalah pergeseran titik menuju model uji, maksimum perpindahan titik F1 adalah sebesar 0,21 kali tinggi model uji. Sedangkan pada F2 adalah sebesar 0,18 kali tinggi model uji.
4. *Synthetic jet actuator* memiliki fitur yang unik, yaitu dapat memodifikasi dengan efektif lapisan batas *shear flow* dengan menciptakan yang disebut dengan *closed recirculating flow* mendekati permukaan dari *solid surface*.
5. Terdapat pengurangan panjang dari vortisitas pada hasil dengan penambahan *synthetic jet* hingga 42,64% dibandingkan dengan tanpa kontrol aliran.
6. Pengaruh penambahan kontrol aktif *synthetic jet* dapat menurunkan intensitas turbulensi hingga mencapai 0,04 pada bidang vertikal $x/h=0,081$
7. Pengaruh penambahan kontrol aliran *synthetic jet* terhadap profil kecepatan adalah secara umum, puncak nilai negatif profil kecepatan berpindah dari sisi atas model (pada kisaran $x/h=0,72$) ke arah tengah (pada kisaran $x/h=0,48$) dari model uji.

5.2 Saran

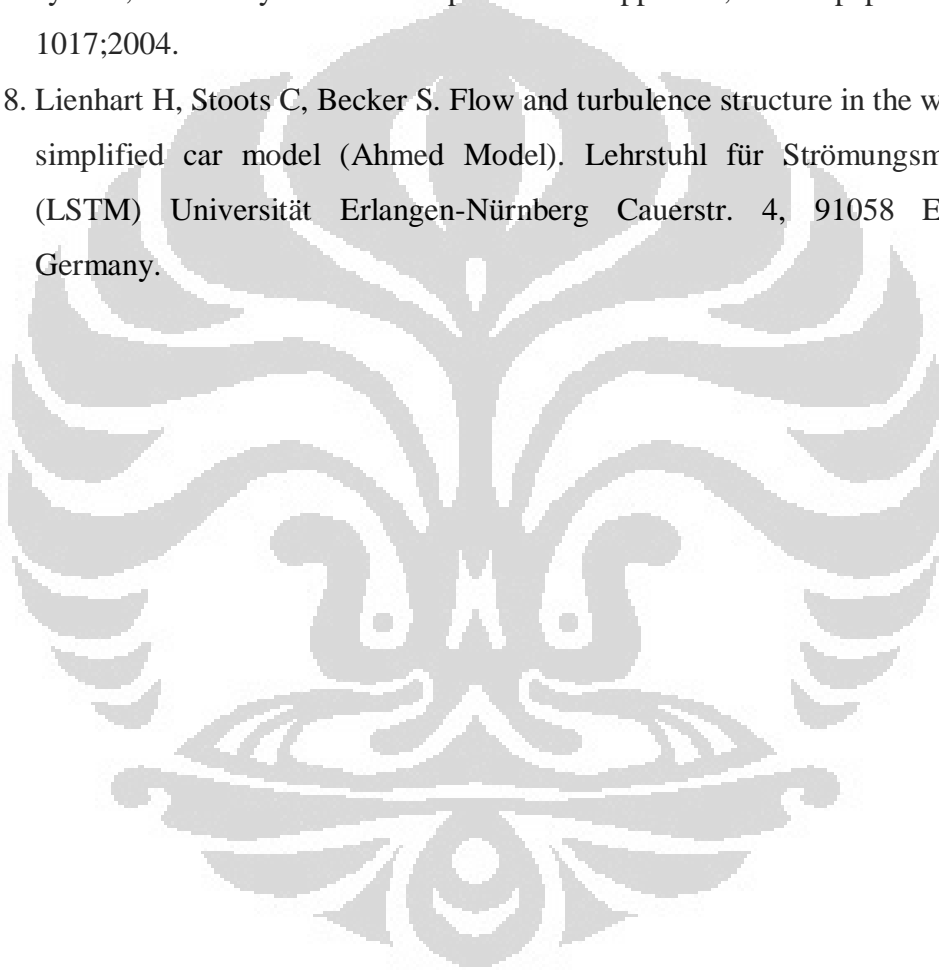
Eksperimen menggunakan PIV yang telah dilakukan terfokus pada bagian belakang bidang vertikal dari *reversed Ahmed body*. Masih banyak lagi hal yang dapat digali dari studi PIV pada *reversed Ahmed body* dengan penambahan *synthetic jet actuator*. Misalnya pada bidang lainya dan perpotongan antara bidang (*cross-section*).

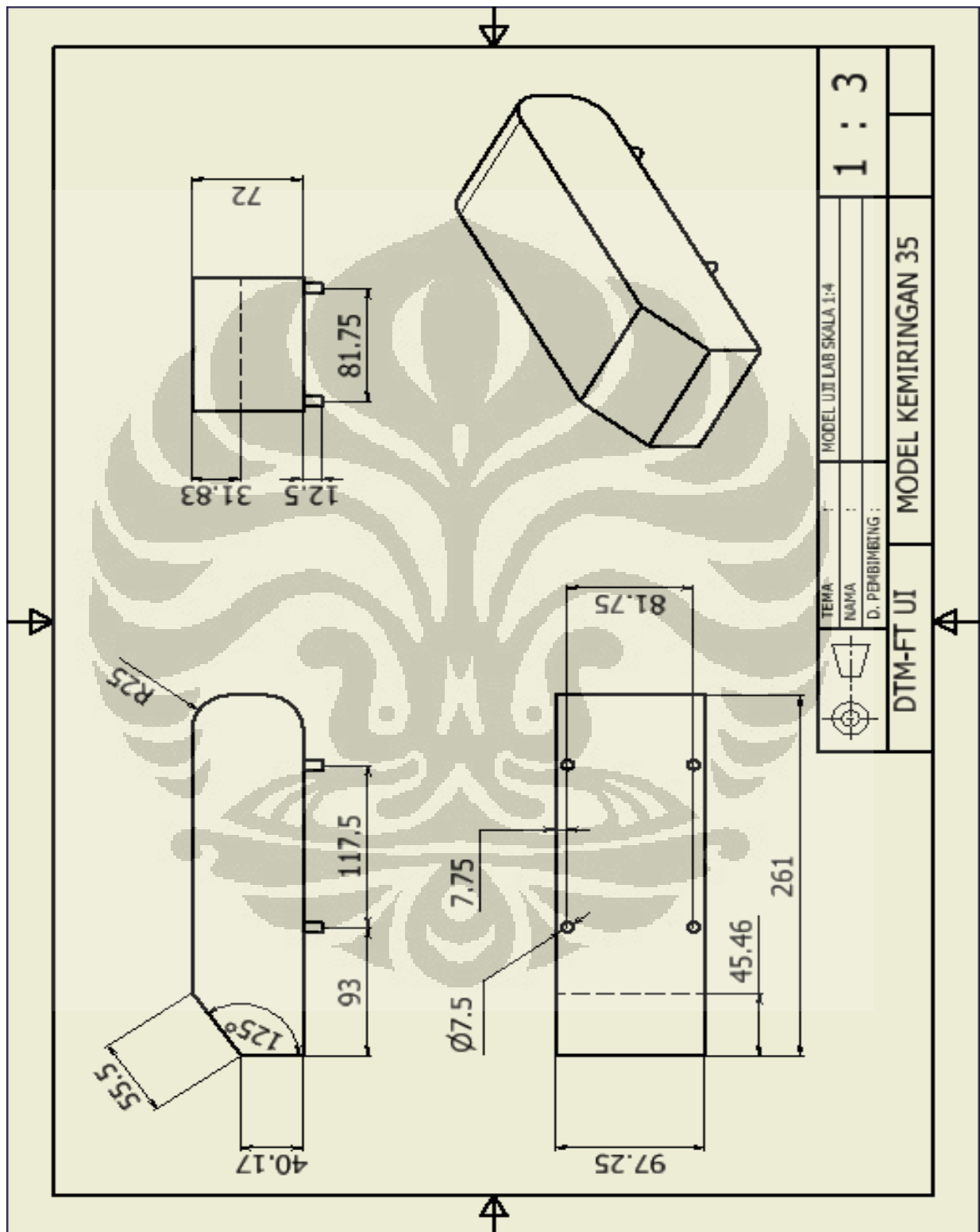


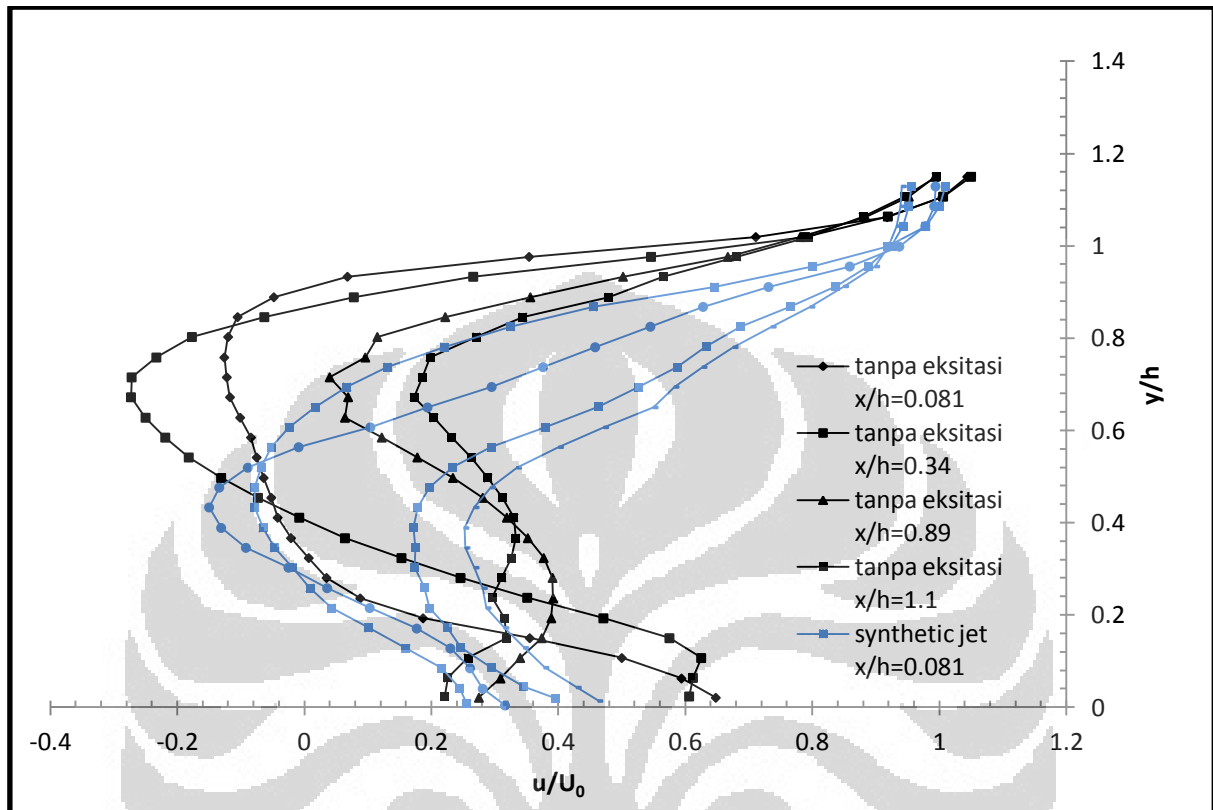
DAFTAR REFERENSI

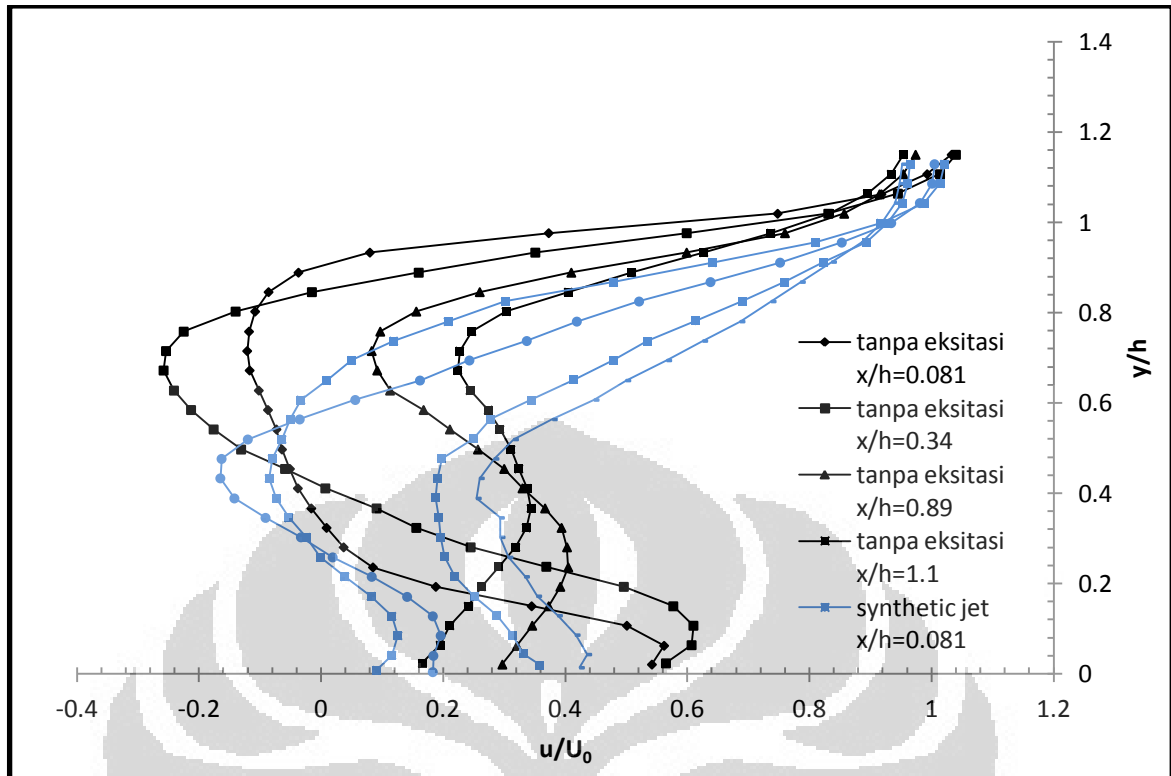
1. PERATURAN PRESIDEN REPUBLIK INDONESIA, No.61/2011, *Rencana Aksi Gas Rumah Kaca*, (2011)
2. Munson, B. (2002). *Mekanika Fluida* (Dr.Ir. Harinaldi & Ir. Budiarmo, M.Eng, Penerjemah). Jakarta:Erlangga.
3. Anderson, J.D. (2001). *Fundamental of Aerodynamics* (3rd ed.).Singapore:McGraw-Hill.
4. Gad-El-Hak M. Modern developments in flow control. *Appl Mech Rev* 1996;9:365–79, 2006.
5. M Raffel.(2007). *Particle Image Velocimetry. Exp Fluids* (second edition).Berlin:Springler.
6. Cahit Gurlek, Besir Sahin, Gokturk Memduh Ozkan. PIV studies around bus model. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38 (2012) 115–126
7. Roumeas M, Gillieron P, Kourta A. Drag reduction by flow separation control on a car after body. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2009; 60:1222-1240.
8. K.D Jansen, *flow measurement*, Dantec Dynamics Inc. (2004), Vol. XXVI, No. 4 / 401.
9. Glazer et al, Modification of Fluid Flow About Bodies and Surfaces Through Virtual Aero-Shaping of Airfoils with Synthetic Jet Actuator, (2003)
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. Kourta A, Gillieron P. Impact of the automotive aerodynamic control on the economics issues. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 2, No. 2, pp. 69-75, 2009.
12. Erk, *Separation Control on a Post-Stall Airfoil Using Acoustically Generated perturbation*, Ph.D Dissertation, 1997.
13. Honohan et al, *Aerodynamic Control Using Synthetic Jet*, AAIA, June, 2000.
14. Uruba V, Hladik O. On the Ahmed Body Wake. *Colloquium FLUID DYNAMICS 2009* Institut of Thermomechanics AS CR, v.v.i.v Prague, October 21-23, 2009.

15. Minguez M, Pasquetti R, Serre E. High order large-eddy simulation of flow over the “Ahmed body” car model. *PHYSICS OF FLUIDS* 20, 095101 (2008).
16. 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.
17. Ivanic T, Gillieronh P. Reduction of the aerodynamics drag due to cooling system; an analytical and experimental approach, SAE paper 2005-01-1017;2004.
18. Lienhart H, Stoots C, Becker S. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model (Ahmed Model). Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) Universität Erlangen-Nürnberg Cauerstr. 4, 91058 Erlangen, Germany.

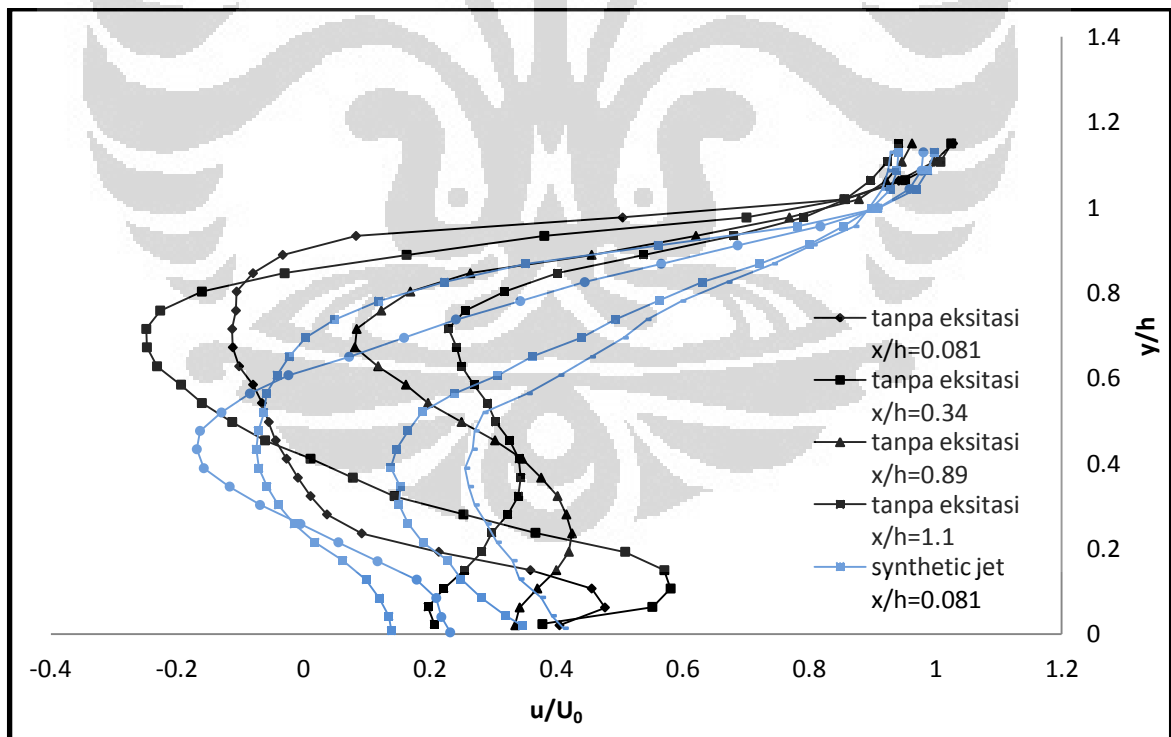


Lampiran 1. Model *reversed Ahmed body*

Lampiran 2. Kurva Profil Kecepatan Pengaruh Kontrol Aktif *Synthetic Jet*a. Kecepatan *Upstream*, $U_0=11.1\text{m/s}$



b. Kecepatan *Upstream*, $U_0=13.9\text{m/s}$



c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7\text{m/s}$