



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN KONTROL AKTIF SEPARASI ALIRAN TURBULEN
PADA AERODINAMIKA *BLUFF BODY* MODEL
KENDARAAN**

DISERTASI

**RUSTAN TARAKKA
0906598650**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN KONTROL AKTIF SEPARASI ALIRAN TURBULEN
PADA AERODINAMIKA *BLUFF BODY* MODEL
KENDARAAN**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

**RUSTAN TARAKKA
0906598650**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rustan Tarakka

NPM : 0906598650

Tanda Tangan :

Tanggal :



HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh

Nama : Rustan Tarakka
 NPM : 0906598650
 Program Studi : Teknik Mesin
 Judul Disertasi : Kajian Kontrol Aktif Separasi Aliran Turbulen
 Pada Aerodinamika *Bluff Body* Model Kendaraan

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

DEWAN PENGUJI

Promtor : Prof. Dr. Ir. Budiarmo, Meng.

Co Promotor : Prof. Dr. Ir. Harinaldi, MEng.

Penguji : Prof. Dr. Ir. Yanuar, MEng., MSc.

Penguji : Dr. Ir. Warjito, MEng.

Penguji : Dr. Ir. Engkos Achmad Kosasih, MT.

Penguji : Prof. Ir. I Nyoman Gede Wardana, MEng., PhD.

Penguji : Prof. Dr-Ing. Herman Sasongko

Ditetapkan di : Depok

Tanggal :

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Pada kesempatan ini, perkenankan penulis menyampaikan terima kasih dan hormat kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Budiarmo, MEng. selaku Promotor, Bapak Prof. Dr. Ir. Harinaldi, MEng., selaku Ko Promotor, yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran dalam membimbing sejak awal hingga selesainya penulisan disertasi ini.
2. Seluruh Panitia Penguji yang terdiri dari Bapak Prof. Dr. Ir. Yanuar, MEng., MSc., Bapak Dr. Ir. Warjito, MEng., Bapak Dr. Ir. Engkos Achmad Kosasih, MT., Bapak Prof. Ir. I Nyoman Gede Wardana, MEng., PhD. dan Bapak Prof. Dr-Ing. Herman Sasongko yang telah bersedia menguji serta memberikan masukan dan arahan yang sangat berharga dalam penulisan disertasi ini.
3. Dekan Fakultas Teknik UI beserta jajarannya dan Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik UI beserta jajarannya serta seluruh staf pengajar dan karyawan Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik UI, atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan hingga terselesaikannya disertasi ini.
4. Rektor Universitas Hasanuddin beserta para Wakil Rektor, Dekan FT-Unhas beserta para Pudek, dan Kajur Teknik Mesin FT-Unhas, yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk melanjutkan studi S3.
5. Pimpinan beserta Tim Proyek Pengembangan Fakultas Teknik Unhas-JBIC Loan IP-541 atas bantuan beasiswa program doktor yang diberikan.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muh. Saleh Pallu, MEng. dan Ibu dr. Hj. Mariani Akib Baramuli, MM. yang selalu memberikan dorongan dan semangat selama mengikuti program doktor.
7. Teman sejawat, mahasiswa S3, S2 dan S1 khususnya kepada Bapak Abdul Hay, Ibu Zuryati Jafar, Ibu Rosmariyani Arifuddin, Bapak Indrabayu Amirullah, Bapak Muh. Syahid, Bapak Marcus A. Talahatu, Bapak Senoadi, Bapak Fajri Vidian, Bapak Mulya Juarsa, Bapak Yulianto, Bapak Damora

Rhakasywi, Bapak Sabar P. Simanungkalit, I Gst Md Fredy L.T., Andre Grivanzi, Ahmad Tri Ageng Sutrisno, Nanda Setiadji dan semua pihak yang telah yang telah banyak membantu dalam penyelesaian disertasi ini.

Akhir kata, saya sampaikan terima kasih kepada kedua orang tua tercinta yang telah membesarkan, mendidik, membimbing dan mendoakan saya selama ini. Terima kasih juga saya sampaikan kepada kedua mertua saya atas perhatian, dukungan dan doa yang selalu diberikan untuk kelancaraan studi saya. Tak lupa pula, kepada istri tercinta dan anak tersayang atas pengertian, pengorbanan, kesetiaan serta kesabarannya untuk selalu mendoakan, mendorong dan memberikan semangat yang tiada henti-hentinya sehingga saya dapat menyelesaikan studi S3. Saya sangat menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan disertasi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan disertasi ini. Saya berharap semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah berkenan membantu. Semoga disertasi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
DISERTASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Rustan Tarakka
NPM : 0906598650
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Disertasi

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 :

Kajian Kontrol Aktif Separasi Aliran Turbulen Pada Aerodinamika *Bluff Body* Model Kendaraan

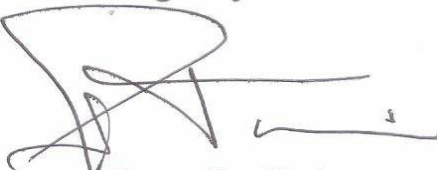
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan disertasi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal :

Yang menyatakan



(Rustan Tarakka)

ABSTRAK

Nama : Rustan Tarakka
 Program studi : Teknik Mesin
 Judul : Kajian Kontrol Aktif Separasi Aliran Turbulen Pada Aerodinamika *Bluff Body* Model Kendaraan

Penelitian ini merupakan kajian dasar pengembangan kontrol aktif terhadap separasi aliran turbulen yang merupakan suatu fenomena fundamental yang berkontribusi pada performa aerodinamika disain *body* kendaraan. Tujuan utama dari penelitian ini adalah menganalisis metode kontrol separasi aliran turbulen secara aktif yang dapat diterapkan dalam mengurangi area separasi, sehingga mengurangi gradien tekanan statik dan total yang mengatur pengurangan hambatan (*drag*) aerodinamika pada *bluff body* model kendaraan.

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode pendekatan komputasional dan eksperimental. Pada pendekatan komputasional digunakan *software CFD (Fluent 6.3)* dengan model turbulensi aliran *k-epsilon*. Model uji yang digunakan adalah *bluff body* kendaraan yang dimodelkan dengan memodifikasi *Ahmed body* dengan mengubah orientasi aliran dari bentuk aslinya (modifikasi *Ahmed body/reversed Ahmed body*). *Reversed Ahmed body* ini dilengkapi dengan kontrol aktif aliran berupa hisapan (*suction*), tiupan (*blowing*) dan jet sintetis (*synthetic jet*) yang penempatannya dilakukan pada bagian belakang. Kecepatan *suction* dan *blowing* diset pada 0.5 m/s, 1.0 m/s dan 1.5 m/s. Kecepatan *synthetic jet* diset pada 2 m/s. Bentuk geometri dari *reversed Ahmed model* mempunyai ϕ (sudut kemiringan) 35° pada bagian depan. Pada pendekatan eksperimental, parameter yang dikaji adalah medan aliran dan gaya-gaya aerodinamika. Medan aliran dikaji dengan menggunakan teknik PIV (*particle image velocimetry*) dan gaya-gaya aerodinamika diambil dengan menggunakan *load cell*. *Reversed Ahmed model* ditempatkan dalam seksi uji pada terowongan angin dengan kecepatan *upstream* adalah 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16,7 m/s.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa olakan yang terbentuk pada bagian belakang *bluff body* model kendaraan didominasi oleh *vortex* longitudinal akibat aliran dari samping model uji. Parameter yang memberikan pengaruh terhadap pengurangan *drag* aerodinamika dengan penerapan kontrol aliran berupa *suction*, *blowing* dan *synthetic jet* adalah peningkatan distribusi koefisien tekanan, pengurangan intensitas turbulensi dan berkurangnya zona resirkulasi pada bagian belakang dari model uji. Hasil yang didapatkan juga menggambarkan terjadinya penundaan separasi pada bagian belakang *bluff body* model kendaraan. Pengaplikasian kontrol aliran *suction* dan *blowing* pada bagian belakang *bluff body* model kendaraan mengakibatkan pergeseran titik pusat resirkulasi F1 dan F2 disertai peningkatan panjang resirkulasinya dan *saddle point* mempunyai kecenderungan menjauhi model uji pada daerah hilir. Mekanisme sebaliknya terjadi dengan penerapan *synthetic jet*. Pengurangan *drag* aerodinamika terbaik yang diperoleh adalah 18.47% sampai 23.05%.

Kata kunci : *reversed Ahmed model*, kontrol aktif aliran, *suction*, *blowing*, *synthetic jet*, pengurangan *drag* aerodinamika

ABSTRACT

Name : Rustan Tarakka
Study Programe : Mechanical Engineering
Title : Study on Active Control of Separation Turbulent Flow in Aerodynamic of Bluff Body Vehicle Model

This research work is a fundamental investigation to develop an active control to the turbulent flow separation which is a fundamental phenomenon governing the aerodynamic performance on vehicle body. The main objective of this study is to analyze the method of an active control to turbulent flow separation which can be applied to reduce the area of separation, thus to reduce the static and total pressure gradients that govern aerodynamic drag reduction in bluff body vehicle model.

The investigation combined computational and experimental work. Computational approach used a CFD software (Fluent 6.3) with standard k-epsilon flow turbulence model. Test model used was a family van that was modeled with a modified form of Ahmed's body by changing the orientation of the flow from its original form (modified/reversed Ahmed body). This reversed Ahmed body was equipped with suction and blowing as well as synthetic jet on the rear side. Suction and blowing velocities were set to 0.5 m/s, 1.0 m/s and 1.5 m/s, respectively. Futhermore, synthetic jet velocity was set to 2 m/s. The front part of the reversed Ahmed model was inclined at an angle of 35°. In the experimental approach, the parameters studied were flow field and aerodynamic forces. Flow field was studied by using PIV (particle image velocimetry) and the aerodynamic forces were taken by using a load cell. Reversed Ahmed model was placed in the test section of the wind tunnel with upstream velocities were set to 11.1 m/s, 13.9 m/s and 16.7 m/s, respectively.

The results obtained show that wake is formed at the rear of the bluff body vehicle model is dominated by longitudinal vortex due to flow from the side of the test model. The parameters which give effect to aerodynamic drag reduction that occurs on bluff body vehicle model with the application of flow control such as suction and blowing as well as synthetic jet are the increase of the pressure coefficient distribution, the decrease of turbulence intensity and the reduction of the recirculation zone at the rear of the test model. The results obtained also describe the delay of separation on the back of the bluff body vehicle model. The application of flow control such as suction and blowing on the back of the bluff body vehicle model caused the shifting of the center of the upper recirculation (F1) and the down recirculation (F2) while increasing the length of the recirculation and the saddle point have tendency to move away from the test model in the downstream region. An opposite mechanism occurred with the application of synthetic jet. The best aerodynamic drag reduction obtained is 18.47% to 23.05%.

Keywords: reversed Ahmed model, active flow control, suction, blowing, synthetic jet, aerodynamic drag reduction

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR NOTASI.....	xxi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Keterbaruan Penelitian.....	7
1.5 Batasan Masalah	8
1.6 Sistematika Penulisan	9
2. LANDASAN TEORI.....	11
2.1 Drag Aerodinamika Kendaraan	11
2.2 Lapisan Batas	13
2.3 Separasi Aliran.....	15
2.4 Intesitas Turbulensi.....	17
2.5 Model <i>Bluff Body</i> Kendaraan – <i>Ahmed Body</i>	17
2.6 Modus Kontrol Aliran.....	19
2.7 Arah Perkembangan dan <i>State of the Art</i> Riset Kontrol Aktif Separasi Aliran pada Aplikasi Otomotif	24
2.8 Efisiensi Energi Kontrol Aktif Aliran.....	29
2.9 Pemodelan Turbulensi	30
3. METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Diagram Alir Penelitian	35
3.2 Model Uji	36
3.3 Tahapan Komputasional	37
3.4 Tahapan Eksperimental.....	42
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	56
4.1 Pengaruh Ukuran Grid dan Model Turublensi.....	56
4.1.1 Medan Tekanan.....	57
4.1.2 Intensitas Turbulensi	61
4.1.3 Drag Aerodinamika.....	65
4.1.4 Validasi Hasil Komputasi	66
4.2 Karakteristik Perubahan Medan Aliran – Hasil-hasil Komputasi.....	67

4.2.1 Medan Kecepatan.....	67
4.2.2 Medan Tekanan.....	91
4.2.3 Intensitas Turbulensi.....	105
4.2.4 Drag Aerodinamika.....	119
4.3 Karakteristik Perubahan Medan Aliran – Hasil-hasil Eksperimental	124
4.2.1 Dinamika Zona Aliran Resirkulasi – Pengukuran PIV	124
4.2.2 Profil Kecepatan – Pengukuran PIV	167
4.2.3 Pengurangan Drag (<i>Drag Reduction</i>) – Pengukuran Load Cell	176
4.4 Efisiensi Energi Kontrol Aktif.....	186
4.5 Mekanisme Pengurangan Drag di Bawah Pengaruh Kontrol Aktif.....	188
5. KESIMPULAN.....	195
DAFTAR PUSTAKA	196
LAMPIRAN.....	200



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Penelitian penerapan kontrol aktif aliran pada model kendaraan	6
Tabel 3.1 Aspek komputasi CFD	37
Tabel 3.2 Kondisi komputasi untuk <i>suction</i> dan <i>blowing</i>	40
Tabel 3.3 Kondisi komputasi untuk <i>synthetic jet</i>	41
Tabel 3.4 Nilai intensitas turbulensi pada <i>free stream</i> dengan kecepatan <i>upstream</i> , U_o 16.7 m/s sepanjang garis tengah pada seksi uji terowongan angin subsonik.....	43
Tabel 4.1 Analisa <i>grid independency</i>	56
Tabel 4.2 Nilai minimum distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran	59
Tabel 4.3 Nilai minimum distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi dengan kontrol <i>blowing</i> ($U_{bl}=1.0$ m/s).....	61
Tabel 4.4 Nilai maksimum intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran	61
Tabel 4.5 Nilai maksimum intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi dengan kontrol <i>blowing</i> ($U_{bl}=1.0$ m/s).....	65
Tabel 4.6 Total gaya <i>drag</i> dan <i>drag reduction</i> pada setiap model turbulensi...	65
Tabel 4.7 Nilai koefisien <i>drag</i> dan pengurangan <i>drag blowing</i> , Eksperimen ..	66
Tabel 4.8 Nilai minimum koefisien tekanan tanpa kontrol aliran.....	91
Tabel 4.9 Nilai minimum koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s.....	93
Tabel 4.10 Nilai minimum koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s.....	93
Tabel 4.11 Nilai minimum koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s.....	96
Tabel 4.12 Nilai minimum koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s....	98
Tabel 4.13 Nilai minimum koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1$ m/s.....	98
Tabel 4.14 Nilai minimum koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s....	101
Tabel 4.15 Nilai minimum koefisien tekanan dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s	103
Tabel 4.16 Nilai maksimum intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran	105
Tabel 4.17 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/	107
Tabel 4.18 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/	108

Tabel 4.19 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s	110
Tabel 4.20 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s.....	112
Tabel 4.21 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s.....	113
Tabel 4.22 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s.....	113
Tabel 4.23 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s.....	118
Tabel 4.24 Nilai koefisien <i>drag</i> sebagai fungsi kecepatan <i>suction</i> , CFD	121
Tabel 4.25 Nilai pengurangan <i>drag</i> (<i>drag reduction</i>) dengan <i>suction</i> , CFD	121
Tabel 4.26 Nilai koefisien <i>drag</i> sebagai fungsi kecepatan <i>blowing</i> , CFD.....	122
Tabel 4.27 Nilai pengurangan <i>drag</i> (<i>drag reduction</i>) dengan <i>blowing</i> , CFD	123
Tabel 4.28 Nilai koefisien dengan kontrol aliran <i>synthetic jet</i> , CFD.....	123
Tabel 4.29 Nilai pengurangan <i>drag</i> (<i>drag reduction</i>) dengan <i>synthetic jet</i> , CFD.....	124
Tabel 4.30 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $z = 0$	124
Tabel 4.31 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	128
Tabel 4.32 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	129
Tabel 4.33 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	132
Tabel 4.34 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$	133
Tabel 4.35 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$	135
Tabel 4.36 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$	136

Tabel 4.37 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	138
Tabel 4.38 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	142
Tabel 4.39 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	142
Tabel 4.40 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$..	143
Tabel 4.41 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$..	147
Tabel 4.42 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$..	149
Tabel 4.43 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2.0$ di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	151
Tabel 4.44 Posisi dan panjang resirkulasi <i>streamline</i> dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2.0$ di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang $z = 0.5$	153
Tabel 4.45 Panjang <i>vorticity</i> tanpa kontrol aliran dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	154
Tabel 4.46 Panjang <i>vorticity</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	154
Tabel 4.47 Panjang <i>vorticity</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	157
Tabel 4.48 Panjang <i>vorticity</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	159
Tabel 4.49 Panjang <i>vorticity</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	159
Tabel 4.50 Panjang <i>vorticity</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	162
Tabel 4.51 Panjang <i>vorticity</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	164
Tabel 4.52 Panjang <i>vorticity</i> dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2.0$ m/s dibagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	164
Tabel 4.53 Nilai koefisien drag sebagai fungsi kecepatan <i>suction</i> , Eksperimen	180

Tabel 4.54 Nilai pengurangan <i>drag</i> (<i>drag reduction</i>) dengan <i>suction</i> , Eksperimen	180
Tabel 4.55 Nilai koefisien <i>drag</i> sebagai fungsi kecepatan <i>blowing</i> , Eksperimen	182
Tabel 4.56 Nilai pengurangan <i>drag</i> (<i>drag reduction</i>) dengan <i>blowing</i> , Eksperimen	182
Tabel 4.57 Nilai koefisien <i>drag</i> sebagai fungsi kecepatan <i>synthetic jet</i> , Eksperimen	183
Tabel 4.58 Nilai pengurangan <i>drag</i> (<i>drag reduction</i>) dengan <i>synthetic jet</i> , Eksperimen	183
Tabel 4.59 Perbandingan pengurangan <i>drag</i> yang diperoleh dengan pendekatan komputasional dan eksperimental, <i>suction</i>	184
Tabel 4.60 Nilai Perbandingan pengurangan <i>drag</i> yang diperoleh dengan pendekatan komputasional dan eksperimental, <i>blowing</i>	184
Tabel 4.61 Perbandingan pengurangan <i>drag</i> yang diperoleh dengan pendekatan komputasional dan eksperimental, <i>synthetic jet</i>	186

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Pengaruh penggunaan spoiler di bagian belakang <i>rear window</i> pada pengurangan hambatan aerodinamika.....	3
Gambar 1.2	<i>Road map</i> penelitian dasar bidang kontrol aliran separasi	6
Gambar 2.1	Gambar skematik untuk model Onorato (Onorato et.al,1984) ..	12
Gambar 2.2	Distorsi dari partikel fluida ketika mengalir di dalam lapisan batas (Munson, 2002).....	14
Gambar 2.3	Separasi aliran yang terjadi pada silinder (Munson, 2002).....	15
Gambar 2.4	Aliran melalui sebuah permukaan lengkung (Olson R.M. & Wright S.J., 1993).....	16
Gambar 2.5	Distribusi tekanan pada permukaan silinder : A. $Re=1.1 \times 10^5 < Re_c$; B. $Re=6.7 \times 10^5 > Re_c$; C. $Re=8.4 \times 10^6 > Re_c$ (Nakayama Y & R.F. Boucher, 1998)..	16
Gambar 2.6	Model body Ahmed (Ahmed et al., 1984).	17
Gambar 2.7	Konsep dasar kontrol aktif separasi aliran	23
Gambar 2.8	Sketsa jet sintetik yang dibentuk oleh aktuator dalam <i>cavity</i> dengan saluran keluar orifis (Mello, 2004).....	24
Gambar 2.9	Medan koefisien total tekanan jatuh pada bidang tengah longitudinal : a. tanpa kontrol aliran ; b. sisi miring tanpa kontrol aliran ; c. dengan kontrol aliran (Roumeas et al, 2008).	26
Gambar 2.10	Karakteristik aliran yang berkembang di sekitar kendaraan	29
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 3.2	Model disain <i>body</i> Ahmed terbalik (<i>reversed Ahmed body</i>).....	37
Gambar 3.3	(a). Komputasi domain, (b). Geometri <i>reversed Ahmed model</i> .	39
Gambar 3.4	Type <i>meshing</i> pada <i>reversed Ahmed model</i> dengan $\phi = 35^\circ$	39
Gambar 3.5	(a). Terowongan angin kecepatan rendah ; (b). Penempatan model uji	43
Gambar 3.6	Motor DC dan unit kontrol penggerak <i>blower axial</i>	44
Gambar 3.7	Pengukuran kecepatan dalam seksi uji dengan <i>hot wire</i>	45
Gambar 3.8	(a). Skema elektrikal dari model <i>hot wire</i> tipe CTA ; (b). <i>hot wire</i> AM-4204).....	45

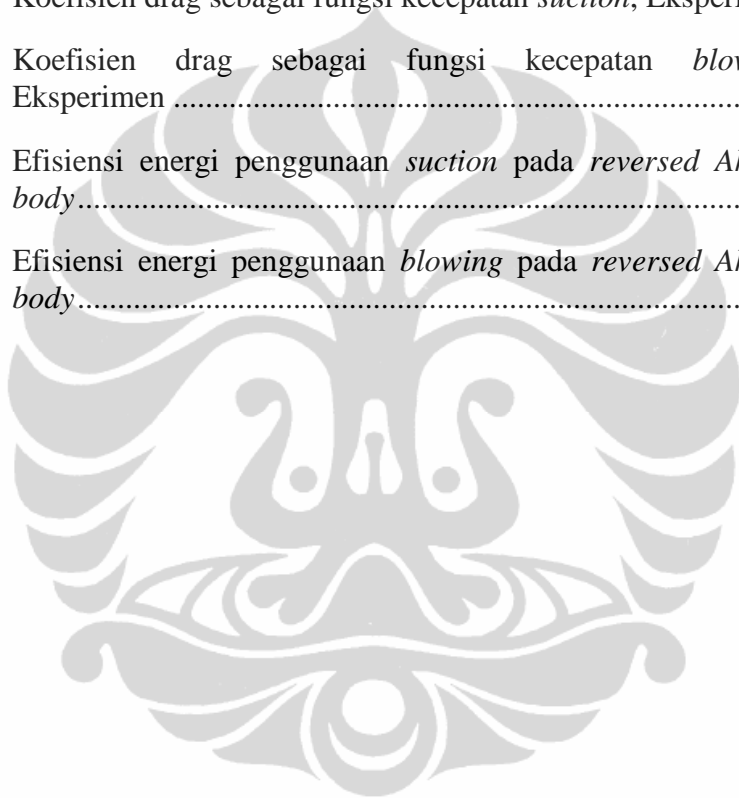
Gambar 3.9	Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif <i>suction</i>	46
Gambar 3.10	Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif <i>blowing</i>	47
Gambar 3.11	Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif <i>synthetic jet</i>	48
Gambar 3.12	Penempatan model uji dengan <i>synthetic jet</i> pada seksi uji terowongan angin.....	48
Gambar 3.13	Sistem PIV dalam <i>wind tunnel</i> (Raffel M. et.al., 2007).....	50
Gambar 3.14	Photo eksperimen setup menggunakan teknik PIV.....	49
Gambar 3.15	Kalibrasi model uji.....	51
Gambar 3.16	Konfigurasi 4 <i>gage</i> aktif untuk pengukuran bending.....	52
Gambar 3.17	Struktur pembentukan <i>strain gage</i> [<i>Strain Gage Bonding Manual, Kyowa</i>].....	53
Gambar 3.18	Monitor dan pengkondisian sinyal tipe A12 (<i>Excellent Scale</i>)..	54
Gambar 3.19	<i>Strain gage</i> yang telah ditempelkan pada plat <i>stainless steell</i> ...	55
Gambar 3.20	Sketsa kalibrasi model uji pada <i>load cell</i>	55
Gambar 4.1	Distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran.....	58
Gambar 4.2	Distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi dengan kontrol <i>blowing</i> ($U_{bl}=1.0$ m/s).....	60
Gambar 4.3	Intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran.....	63
Gambar 4.4	Intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi dengan kontrol <i>blowing</i> ($U_{bl}=1.0$ m/s)	64
Gambar 4.5	Fluktuasi data gaya drag dengan kecepatan <i>upstream</i> 13.9 m/s, <i>blowing</i>	66
Gambar 4.6	<i>Pathline</i> kecepatan tanpa kontrol aliran.....	68
Gambar 4.7	<i>Pathline</i> kecepatan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s.....	69
Gambar 4.8	<i>Pathline</i> kecepatan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s.....	70
Gambar 4.9	<i>Pathline</i> kecepatan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s.....	71
Gambar 4.10	<i>Pathline</i> kecepatan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s	73
Gambar 4.11	<i>Pathline</i> kecepatan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1$ m/s	74
Gambar 4.12	<i>Pathline</i> kecepatan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s	75

Gambar 4.13	Pathline dan vektor kecepatan dengan kecepatan <i>upstream</i> , $U_o = 11.1$ m/s dan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s	80
Gambar 4.14	Pathline dan vektor kecepatan dengan kecepatan <i>upstream</i> , $U_o = 13.9$ m/s dan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s	85
Gambar 4.15	Pathline dan vektor kecepatan dengan kecepatan <i>upstream</i> , $U_o = 16.7$ m/s dan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s	90
Gambar 4.16	Distribusi koefisien tekanan tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	92
Gambar 4.17	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	94
Gambar 4.18	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	95
Gambar 4.19	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	97
Gambar 4.20	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	99
Gambar 4.21	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	100
Gambar 4.22	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	102
Gambar 4.23	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	104
Gambar 4.24	Intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	106
Gambar 4.25	Intensitas turbulensi dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	109
Gambar 4.26	Intensitas turbulensi dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	110
Gambar 4.27	Intensitas turbulensi dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	111
Gambar 4.28	Intensitas turbulensi dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	114
Gambar 4.29	Intensitas turbulensi dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	115
Gambar 4.30	Intensitas turbulensi dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	116

Gambar 4.31	Intensitas turbulensi dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s pada bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i>	119
Gambar 4.32	Koefisien drag sebagai fungsi kecepatan <i>suction</i> , <i>CFD</i>	120
Gambar 4.33	Koefisien drag sebagai fungsi kecepatan <i>blowing</i> , <i>CFD</i>	122
Gambar 4.34	<i>Streamline</i> rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $z = 0$	126
Gambar 4.35	<i>Streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	127
Gambar 4.36	<i>Streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik vertikal $z = 0$	130
Gambar 4.37	<i>Streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	131
Gambar 4.38	<i>Streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	133
Gambar 4.39	<i>Streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	135
Gambar 4.40	<i>Streamline</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	137
Gambar 4.41	<i>Streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	140
Gambar 4.42	<i>Streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	141
Gambar 4.43	<i>Streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> bidang simetrik vertikal $z = 0$	144
Gambar 4.44	<i>Streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	145
Gambar 4.45	<i>Streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	146
Gambar 4.46	<i>Streamline</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	148

Gambar 4.47	<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 $z = 0$	150
Gambar 4.48	<i>Streamline</i> dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	152
Gambar 4.49	<i>Vorticity</i> tanpa kontrol aliran di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	155
Gambar 4.50	<i>Vorticity</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	156
Gambar 4.51	<i>Vorticity</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	158
Gambar 4.52	<i>Vorticity</i> dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	160
Gambar 4.53	<i>Vorticity</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	161
Gambar 4.54	<i>Vorticity</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	163
Gambar 4.55	<i>Vorticity</i> dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	165
Gambar 4.56	<i>Vorticity</i> dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang simetrik $z = 0$	166
Gambar 4.57	Profil kecepatan tanpa kontrol aliran pada bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i>	168
Gambar 4.58	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	169
Gambar 4.59	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	170
Gambar 4.60	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	171
Gambar 4.61	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	172
Gambar 4.62	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	173
Gambar 4.63	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$	174

Gambar 4.64	Distribusi koefisien tekanan dengan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s di bagian belakang <i>reversed Ahmed body</i> pada bidang $z = 0.5$.	176
Gambar 4.65	Fluktuasi data gaya drag dengan varisai kecepatan <i>upstream</i> , <i>suction</i>	177
Gambar 4.66	Fluktuasi data gaya drag dengan varisai kecepatan <i>upstream</i> , <i>blowing</i>	178
Gambar 4.67	Fluktuasi data gaya drag dengan varisai kecepatan <i>upstream</i> , <i>synthetic jet</i>	179
Gambar 4.68	Koefisien drag sebagai fungsi kecepatan <i>suction</i> , Eksperimen .	180
Gambar 4.69	Koefisien drag sebagai fungsi kecepatan <i>blowing</i> , Eksperimen	181
Gambar 4.70	Efisiensi energi penggunaan <i>suction</i> pada <i>reversed Ahmed body</i>	187
Gambar 4.71	Efisiensi energi penggunaan <i>blowing</i> pada <i>reversed Ahmed body</i>	187



DAFTAR NOTASI

Simbol	Uraian	Unit
A	Luas karakteristik/proyeksi benda	m ²
C _d	Koefisien <i>drag</i>	-
C _p	Koefisien tekanan	-
C _x	Koefisien <i>drag</i> rata-rata	-
D	Total gaya <i>drag</i>	N
l	Panjang model uji	m
f	Frekuensi <i>synthetic jet</i>	Hz
F1	Titik pusat resirkulasi bagian atas	m
F2	Titik pusat resirkulasi bagian bawah	m
F _d	Gaya <i>drag</i>	N
h	Tinggi model uji	m
N	Jumlah <i>image</i>	-
p	Tekanan pada permukaan model uji	Pa
p _o	Tekanan <i>streamline</i> atau garis arus	Pa
R	Hambatan	ohm
Re	Bilangan Reynolds	-
S	<i>Saddle point</i>	m
t	Waktu	s
TI	Intensitas turbulensi	%
u'	Fluktuasi kecepatan	m/s
u _{avg}	Kecepatan rata-rata	m/s
U _{bl}	Kecepatan <i>blowing</i>	m/s
U _{maks}	Kecepatan maksimum	m/s
U _o	Kecepatan <i>upstream</i>	m/s
U _{sc}	Kecepatan <i>suction</i>	m/s
U _{sj}	Kecepatan <i>synthetic jet</i>	m/s
U _{ac}	Kecepatan kontrol aktif	m/s
v _{rms}	Vektor kecepatan rata-rata	m/s
V _x	Kecepatan dalam arah sumbu x	m/s
V _y	Kecepatan dalam arah sumbu y	m/s
V _z	Kecepatan dalam arah sumbu z	m/s
w	Lebar model uji	m
ρ	Massa jenis fluida	kg/m ³
τ	Tegangan geser	Pa
ω	Kecepatan sudut	rad/s
φ	Sudut kemiringan model uji	derajat
μ	Viskositas dinamik	kg/m-s
ν	Viskositas kinematik	kg/m-s
P _{ec}	Energi yang dihemat melalui pengurangan <i>drag</i> aerodinamika	kg.m ² /s ³
P _{ac}	Energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan kontrol aktif	kg.m ² /s ³
ζ	Efisiensi kontrol aktif aliran	-
ε	Regangan	-

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Publikasi Ilmiah 200



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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

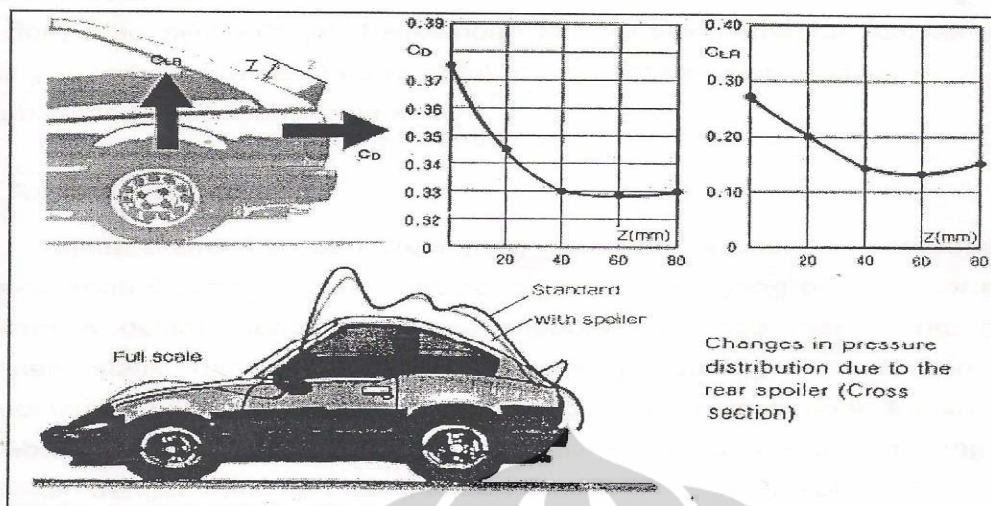
Di banyak negara berkembang dengan tingkat populasi yang tinggi, angka pertumbuhan produksi kendaraan penumpang meningkat sangat signifikan yang menjadikan sektor transportasi sebagai pengguna energi bahan bakar minyak dunia yang utama. Khususnya di Indonesia yang masih belum memiliki moda transportasi massal yang baik, sekalipun di kota-kota metropolitannya, ketergantungan masyarakat akan kendaraan (mobil) penumpang menjadi sangat tinggi. Karakteristik kultur sosial masyarakat Indonesia yang memiliki ikatan kekeluargaan yang kuat mendorong produsen kendaraan penumpang membuat kendaraan-kendaraan berkapasitas besar (kendaraan keluarga/*family car*) yang telah terbukti sangat diminati di pasaran. Tentunya pula, kendaraan-kendaraan jenis ini mengusung mesin yang berkapasitas besar yang konsumsi bahan bakarnya juga besar. Di lain pihak, dengan semakin berkurangnya cadangan energi dunia yang berasal dari bahan bakar minyak serta belum mapan dan mantapnya aplikasi sumber-sumber energi melalui upaya-upaya memanfaatkan energi secara efektif dan efisien di berbagai sektor kehidupan

masyarakat modern, termasuk diantaranya adalah pemakaian energi di bidang transportasi.

Berkaitan dengan hal tersebut di atas, riset-riset terkini dalam bidang aerodinamika kendaraan (mobil) dilakukan dengan sudut pandang pengembangan disain yang efisien dan mampu memberi dampak penghematan bahan bakar. Karena alasan ini, aerodinamika kendaraan darat telah dipelajari secara eksperimental dan numerik oleh banyak peneliti. Kebanyakan penelitian sebelumnya telah menggunakan model kendaraan sederhana yang dapat menghasilkan fitur yang relevan dari aliran sekitar kendaraan nyata (Ahmed et al, 1984; Hinterberger et.al, 2004; Fares, 2006; Minguez M. et al, 2008; Uruba V. & Hladík O., 2009; Conan B. et al, 2011). Model terbaik penyederhanaan *body* kendaraan, dikenal sebagai *Ahmed body* dan telah diteliti oleh Ahmed et al. (Ahmed et al, 1984). Medan aliran di sekitar olakan ditandai dengan sepasang vortisitas tapal kuda (*a pair of horseshoe vortices*) dan *trailing vortices* yang berasal dari tepi miring bagian samping *body*.

Beberapa produsen mobil seperti Renault menetapkan tujuan penelitian dan pengembangannya untuk menghasilkan sistem kontrol yang dapat menekan hambatan (*drag*) aerodinamika mobil sekurang-kurangnya 30% tanpa mengorbankan tampilan disain, kenyamanan, kapasitas dan keselamatan penumpang (Cooper, 1985). Untuk mengurangi hambatan aerodinamika, jika ditinjau dari dinamika fluida maka metode yang dapat dilakukan adalah dengan : 1) memodifikasi aliran secara lokal, 2) memindahkan atau menunda posisi separasi atau, 3) mengurangi berkembangnya zona resirkulasi di bagian 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 dengan menggunakan sistem kontrol aktif atau pasif (Friedler & Fernholz, 1990).

Penggunaan sistem-sistem pasif dalam kontrol aliran sampai sejauh ini lebih populer karena alasan biaya yang lebih murah. Beberapa hasil yang cukup signifikan dapat diperoleh dengan teknik-teknik kontrol yang sederhana. Dalam prakteknya, kontrol aliran dapat dilakukan jika distribusi tekanan pada dinding dapat dimodifikasi dengan tepat di bagian belakang dan pada kaca belakang (*rear window*) mobil dengan menggunakan berbagai jenis perangkat, seperti pemakaian *spoiler* atau *fin*, yang dapat mengubah geometri aliran secara lokal seperti yang diilustrasikan pada Gb. 1.1.



Gambar 1.1 Pengaruh penggunaan spoiler di bagian belakang *rear window* pada pengurangan hambatan aerodinamika

Eksperimen-eksperimen kontrol pasif aliran di terowongan angin pada model ataupun prototipe kendaraan telah banyak dilakukan pada berbagai penelitian (Gak-El-Hak, 1996; Hucho, 1998). Pengukuran tekanan statik dinding dan torsi aerodinamik menunjukkan efek-efek yang ditimbulkan dari pengontrolan aliran tersebut dapat mengurangi perkembangan zona resirkulasi di kaca belakang atau di bagian belakang dan mengurangi interaksi antar struktur-struktur olakan yang berpusar (*swirling wake structure*) sehingga terjadi pengurangan hambatan aerodinamik yang cukup signifikan. Teknik-teknik lain pengurangan hambatan aerodinamik juga banyak diteliti seperti *artificial rough surface*, *self adapting surface* dengan pelapisan khusus untuk menunda transisi laminar-turbulen. Optimasi dengan kontrol pasif pada kendaraan telah memberikan efek yang signifikan pada pengurangan gaya *drag* (dari $C_x=0.45$ pada 1975 menuju $C_x=0.35$ pada 1985 (Gak-El-Hak, 1996; Hucho, 1998), dimana C_x adalah koefisien *drag* rata-rata). Namun demikian, kontrol aliran secara pasif ternyata memberikan efek yang lemah dalam aerodinamika kendaraan karena sifat aliran yang terlibat adalah turbulen dan kontribusi dari gesekan pada hambatan aerodinamik masih kecil, hanya sekitar 10% (Kourta & Gillieron, 2009)

Kontrol aliran pada *bluff body* dengan tujuan untuk mengurangi *drag* dan kebisingan merupakan salah satu isu utama dalam aerodinamis. Perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang *bluff body* merupakan kontributor utama untuk keseluruhan drag, perbedaan ini terutama disebabkan oleh separasi aliran pada bagian belakang *body* (Hucho, 2002). Metode kontrol aktif aliran dapat diterapkan untuk

menghindari atau mengurangi jenis separasi yang menyebabkan kerugian kinerja (*performance loss*). Fakta ini ditunjukkan pada *Ahmed body* dua dimensi dengan sudut kemiringan $\phi = 35^\circ$. Medan aliran pada daerah olakan (*near wake*) dalam kasus ini didominasi oleh struktur *vortex* dua dimensi, dan karena itu digunakan pendekatan kontrol untuk jenis *vortex* ini. Aktuator yang digunakan menghasilkan gangguan periodik untuk merangsang separasi lapisan geser pada bagian belakang yang miring dari model kendaraan. Eksitasi dengan gangguan-gangguan periodik di tepi miring menyebabkan fluktuasi kecepatan meningkat di lapisan geser, sedangkan perpindahan momentum antara daerah resirkulasi dan aliran luar secara signifikan meningkat karena adanya dorongan dari pancaran vortex (*forcing of the vortex-shedding*). Penurunan *drag* total yang diperoleh sebesar 27% (Brunn & Nitschew, 2005).

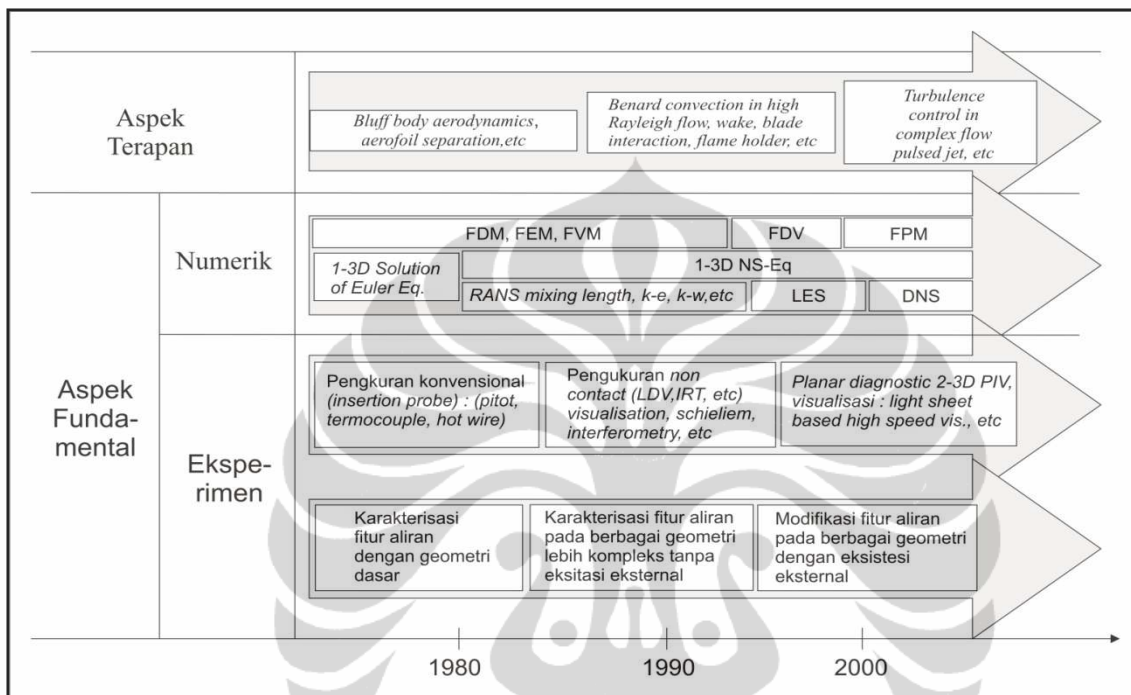
Kebutuhan akan pengurangan gaya *drag* yang lebih efektif mendorong pada perancangan otomobil yang lebih kreatif dalam mengembangkan model kontrol aktif yang inovatif. Metode kontrol aktif memungkinkan untuk memodifikasi topologi aliran tanpa merubah bentuk dari kendaraan. Dalam lingkup akademik dan laboratorium industri, metode kontrol aktif telah dan masih dikembangkan dengan metode komputasi maupun eksperimen, dan hasil yang signifikan telah diperoleh pada kerangka akademik (Gad-El-Hak, 1996). Kontrol aktif hisapan (*suction*) yang diletakkan pada bagian atas dari jendela belakang (*rear window*) mampu menghilangkan separasi pada geometri mobil *fastback* yang disederhanakan dimana pengurangan *drag* aerodinamis diperoleh 17% (Roumeas et al, 2009). Kontrol aktif aliran berupa *continous blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang dari *generic squareback bluff body* memberikan pengurangan *drag* sebesar 20% (Roumeas et al, 2009). Hal serupa juga dilakukan Bruneau C.H. et al (2009), dimana kontrol aktif aliran yang digunakan adalah tiga kombinasi penempatan *suction* dan *blowing* pada bagian belakang dari *Ahmed model*, dimana menghasilkan pengurangan *drag* terbaik sebesar 13%. Demikian pula penelitian secara numerik yang dilakukan oleh Kourta and Gillieron (2009) dengan menggunakan kontrol aktif *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian atas jendela belakang *Ahmed model* dimana pengurangan *drag* yang diperoleh sebesar 13%. Beberapa penelitian tentang penggunaan kontrol aktif aliran pada model kendaraan ditampilkan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Penelitian penerapan kontrol aktif aliran pada model kendaraan

No	Nama peneliti	Tahun penelitian	Metode	Jenis kontrol aktif	Pengurangan drag (%)
1	Gerrop & Odhental	2000	Eksperimental	Kombinasi <i>blowing</i> dan <i>suction</i>	10
2	Brunn A. et al	2007	Komputasi dan Eksperimental	<i>Blowing</i>	2.5
3	Roumeas et al	2009	Komputasi	<i>Suction</i>	17
4	Roumeas et al	2009	Komputasi	<i>Blowing</i>	20
5	Bruneau C.H. et al	2009	Komputasi	Kombinasi <i>suction</i> dan <i>blowing</i>	13
6	Kourta & Gillieron	2009	Komputasi	<i>Synthetic jet</i>	13
7	Bruneau C.H.	2010	Eksperimental	Kombinasi kontrol pasif dengan <i>blowing</i>	5.7
8	Wassen E. et al	2010	Komputasi	<i>Blowing</i>	11.1
9	Krajnovic S. & Fernandes J	2011	Komputasi	<i>Actuation strategy</i>	11
10	Harinaldi et al	2011	Komputasi	<i>Suction</i> <i>Blowing</i>	15.83 14.38

Dalam konteks di atas, teknik kontrol aliran dengan sistem aktuator fluida (kontrol aliran secara aktif) seperti *suction*, *blowing*, dan *synthetic jet* menarik perhatian banyak peneliti bidang aerodinamika kendaraan untuk menggantikan sistem-sistem pasif yang kurang memenuhi kebutuhan (Kourta and Gillieron, 2009). Berdasarkan uraian tersebut di atas dan hasil penelitian yang telah dilaporkan oleh banyak peneliti, masih memberikan ruang untuk melakukan riset tentang penerapan kontrol aktif aliran yang dapat menghasilkan pengurangan *drag* yang signifikan khususnya pada *bluff body* model kendaraan. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis mengkaji penerapan kontrol aktif aliran berupa *suction*, *blowing*, dan *synthetic jet* dengan metode komputasi dan eksperimen untuk *bluff body* model kendaraan yang disederhanakan. Model ini didekati dengan model *reversed Ahmed body* karena mempunyai kemiripan yang sangat

dekat dengan disain dasar dari berbagai bentuk *body* kendaraan penumpang yang dewasa ini diproduksi di Indonesia. Penelitian yang dilakukan ini juga masih berkedudukan di salah satu bagian terkini dalam *road map* penelitian dasar bidang kontrol aliran separasi yang sedang ditekuni berbagai laboratorium dinamika fluida di seluruh dunia seperti yang ditunjukkan pada Gb. 1.2.



Gambar 1.2 *Road map* penelitian dasar bidang kontrol aliran separasi

1.2 Perumusan Masalah Penelitian

Secara umum dipahami bahwa bentuk benda (*body* kendaraan) akan sangat mempengaruhi pola aliran dan distribusi tekanan yang terjadi. Sampai saat ini, banyak laboratorium aerodinamika di universitas maupun industri yang mengkaji dan mengembangkan berbagai variasi kontrol aliran secara aktif dengan menggunakan bentuk-bentuk geometri kendaraan yang disederhanakan. Dengan menggunakan pendekatan serupa, pada penelitian ini bentuk geometri kendaraan yang dikaji dibatasi pada model *bluff body* dari kendaraan yang disederhanakan. Ruang lingkup penelitian ini akan berkisar pada upaya pemahaman fundamental yang sekomprensif mungkin pada peran dan efek yang ditimbulkan oleh suatu kontrol aktif separasi aliran berupa tiupan (*blowing*), hisapan (*suction*) atau *synthetic jet* terhadap :

- 1). Fenomena fisik yang berkaitan dengan aliran di sekitar olakan (*near-wake flow*).

- 2). Identifikasi parameter-parameter yang berkontribusi pada pembentukan dan pertumbuhan hambatan aerodinamika.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah menganalisis metode kontrol separasi aliran turbulen secara aktif yang dapat diterapkan dalam mengurangi area separasi sehingga mengurangi gradien tekanan statik dan total yang mengatur pengurangan hambatan (*drag*) aerodinamika pada *bluff body* model kendaraan. Untuk mencapai tujuan utama tersebut, penelitian dilaksanakan dalam beberapa kegiatan yang saling berkaitan dengan masing-masing tujuan khusus sebagai berikut :

1. Pengembangan model kontrol aktif separasi aliran melalui pendekatan komputasi (analisis numerik / aplikasi CFD) dan verifikasi serta validasi kehandalannya dengan korelasi-korelasi empiris yang telah diperoleh, sehingga model tersebut dapat menjadi dasar dalam memprediksi kondisi optimum yang dibutuhkan untuk memodifikasi pancaran *vortex* (*vortex shedding*) dan olakan (*near wake*) dan khususnya gradien tekanan statik untuk mengurangi koefisien hambatan (*drag coefficient*) di bawah kendali aktif terhadap separasi aliran turbulen.
2. Menguji *bluff body* model kendaraan yang disederhanakan dengan pendekatan eksperimental yang mengintegrasikan kontrol separasi aliran turbulensi secara aktif berupa *suction*, *blowing*, dan *synthetic jet*.

1.4 Keterbaruan Penelitian

Kontrol separasi aliran turbulen memegang peranan penting dalam berbagai aplikasi bidang keteknikan. Khususnya dalam bidang aerodinamika kendaraan penumpang yang sangat memperhatikan aspek-aspek tampilan disain, kenyamanan, kapasitas dan keselamatan penumpang, suatu kontrol separasi aliran yang efisien dan efektif dapat memberikan peningkatan unjuk kerja aerodinamika optimal (menghasilkan drag sekecil-kecilnya) terutama dari sudut pandang penghematan energi sangat diperlukan. *State of the art* dari pengetahuan dasar dan teknologi kontrol turbulensi itu sendiri masih sangat membuka peluang dalam mendisain suatu teknik kontrol yang handal dan orisinal sesuai dengan kebutuhannya masing-masing.

Berdasarkan uraian tersebut di atas, maka kebaruan dalam penelitian ini adalah :

1. Model uji yang digunakan adalah *bluff body* kendaraan yang dimodelkan dengan memodifikasi *Ahmed body* dengan mengubah orientasi aliran dari bentuk aslinya (modifikasi *Ahmed body/reversed Ahmed body*). Model uji ini didekati dengan model *reversed Ahmed body* karena mempunyai kemiripan yang sangat dekat dengan disain dasar dari berbagai bentuk *body* kendaraan penumpang yang dewasa ini diproduksi di Indonesia.
2. Penggunaan kontrol aktif aliran berupa *suction*, *blowing* dan *synthetic jet* dengan beberapa variasi perbandingan kecepatan kontrol aktif terhadap kecepatan *upstream* untuk mendapatkan pengurangan *drag* terbaik. Penempatan kontrol aktif pada bagian belakang model uji didasarkan pada fenomena aliran yang terjadi tanpa kontrol aliran.

1.5 Batasan Masalah

Mengingat kompleksitas masalah yang dihadapi, maka 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. *Drag* yang dikaji adalah *form drag*
- c. Model yang digunakan adalah *bluff body* model kendaraan (*modified/reversed Ahmed body*) yang 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).
- d. Kemiringan sudut pada bagian depan model uji adalah 35° terhadap sumbu horizontal.
- e. Kecepatan *upstream* adalah 11.1 m/s (40 km/jam), 13.9 m/s (50 km/jam dan 16.7 m/s (60 km/jam).
- f. Kontrol aktif aliran yang digunakan adalah *suction* (hisapan), *blowing* (tiupan) dan *synthetic jet* (jet sintetik).
- g. Kecepatan kontrol aktif aliran adalah 0.5 m/s, 1.0 m/s dan 1.5 m/s untuk *suction* dan *blowing*, sementara untuk *synthetic jet* adalah 2 m/s.
- h. Metode yang digunakan adalah metode komputasi dengan model turbulensi *k-epsilon standard* dan metode eksperimen dengan pengukuran PIV (*particle image velocimetry*) dan pengukuran *load cell*.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Disertasi ini terdiri atas 5 bab, daftar pustaka dan lampiran-lampiran, adapun kelima bab tersebut adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

Pada bab ini akan dijelaskan tentang hal-hal sebagai berikut :

- Latar belakang, mengapa penelitian ini dilakukan, pada bagian ini akan diuraikan penelitian-penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan topik yang sedang diteliti, selain itu juga pada bagian ini akan ditunjukkan posisi penelitian ini terhadap penelitian lain.
- Perumusan masalah, pada bagian ini diuraikan pokok permasalahan yang akan diteliti.
- Tujuan penelitian, pada bagian ini dijelaskan tujuan dari penelitian ini baik tujuan umum maupun tujuan khususnya.
- Batasan masalah, pada bagian ini dijelaskan batasan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini yang berhubungan dengan topik yang diteliti dan metode yang digunakan.
- Sistematika penulisan, pada bagian ini secara garis besar urutan dari penulisan yang dilakukan. Penulisan Disertasi ini terdiri atas 5 (lima) Bab yakni : Pendahuluan, Landasan Teori, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan serta Kesimpulan.

Bab 2 Landasan Teori

Bab ini terdiri atas landasan teori yang berisi atas teori-teori yang mendasari penelitian ini. Teori dasar ini meliputi *drag* aerodinamika kendaraan, lapisan batas, separasi aliran, intensitas turbulensi, efisiensi energi kontrol aktif aliran dan pemodelan turbulensi. Pada Bab 2 ini juga akan disusun penelitian yang sudah ada atau telah dilakukan oleh para ahli yang berhubungan dengan model *bluff body* kendaraan – *Ahmed Body*, modus kontrol aliran serta arah perkembangan dan *state of the art* riset kontrol aktif separasi aliran pada aplikasi otomotif.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan adalah metode komputasional dan eksperimental. Pada pendekatan komputasional digunakan *software CFD (Fluent 6.3)* dengan model turbulensi aliran *k-epsilon*. Model uji yang digunakan adalah model *bluff body* dari kendaraan yang disederhanakan yang mempunyai disain dasar berupa *reversed Ahmed body*. Peralatan kontrol aktif separasi aliran berupa hisapan (*suction*), tiupan (*blowing*) dan jet sintetik (*synthetic jet*) ditanamkan pada *body* model yang penempatannya dilakukan pada bagian belakang. Bentuk geometri dari *reversed Ahmed model* mempunyai ϕ (sudut kemiringan) 35° pada bagian depan. Pada pendekatan eksperimental, parameter yang akan dikaji adalah medan aliran dengan menggunakan pengukuran PIV (*particle image velocimetry*) dan gaya-gaya aerodinamika diambil dengan menggunakan sel *strain gage*. Sel *strain gage* tersebut ditempatkan dalam sebuah plat yang dipasang secara vertikal sehingga membentuk sebuah *load cell*. Model *reversed Ahmed body* ditempatkan dalam seksi uji pada terowongan angin, dialiri udara dengan kecepatan 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16,7 m/s.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab 4 berisi tentang data serta analisis data yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan. Grafik yang ditampilkan diantaranya adalah distribusi koefisien tekanan, intensitas turbulensi dan koefisien *drag* tanpa kontrol aliran dan dengan kontrol aliran berupa *suction*, *blowing* dan *synthetic jet*.

Bab 5 Kesimpulan

Bab 5 berisi kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan diantaranya parameter-parameter yang berpengaruh terhadap pengurangan *drag* aerodinamika pada *bluff body* model kendaraan dan nilai pengurangan *drag* maksimum yang diperoleh dari masing-masing modus kontrol aliran yang digunakan yaitu *suction*, *blowing* dan *synthetic jet*.

Daftar Pustaka.

Berisi sumber informasi pengetahuan baik dalam bentuk buku maupun dalam bentuk paper dan jurnal yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Drag Aerodinamika Kendaraan

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

Gaya *drag* (hambatan) diekspresikan sebagai hasil kali koefisien *drag*, tekanan dinamis arus bebas dan luas karakteristik yang dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut (Munson, 2002) :

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

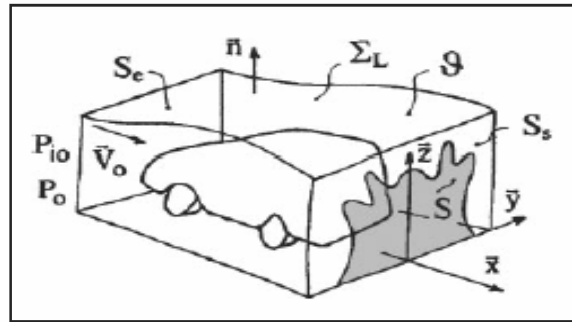
dimana :

C_D = koefisien hambatan

$\frac{\rho U_s^2}{2}$ = tekanan dinamis arus bebas

A = luas karakteristik (luas daerah yang mengalami geseran)

Onorato et.al (1984) menyatakan suatu model matematika yang didasarkan atas persamaan momentum aliran dalam suatu terowongan terhadap model kendaraan yang ada di dalamnya. Gb. 2.1 menunjukkan model kendaraan beserta komponen gaya *drag* yang bekerja padanya.



Gambar 2.1 Gambar skematik untuk model Onorato (Onorato et.al,1984)

Model ini dinyatakan dalam persamaan matematika berikut :

$$Fx = -\frac{\rho V_0^2}{2} \int_S \left(1 - \frac{v_x}{V_0}\right)^2 d\sigma + \frac{\rho V_0^2}{2} \int_S \left(\frac{v_y^2}{V_0^2} + \frac{v_z^2}{V_0^2}\right) d\sigma + \int_S (P_{10} - P_1) d\sigma \quad (2.2)$$

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, maka gaya *drag* aerodinamika dari sebuah model kendaraan disebabkan oleh pembentukan lapisan terseparasi pada model, 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 (Duppen & Ward Van, 2009).

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.

Untuk menyatakan nilai *drag* tekanan, parameter tidak berdimensi C_p secara umum digunakan yaitu (Munson, 2002) :

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (2.3)$$

dimana :

p = tekanan pada permukaan model uji (Pa)

p_0 = tekanan *streamline* atau garis arus (Pa)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

U_0 = kecepatan *upstream* (m/s)

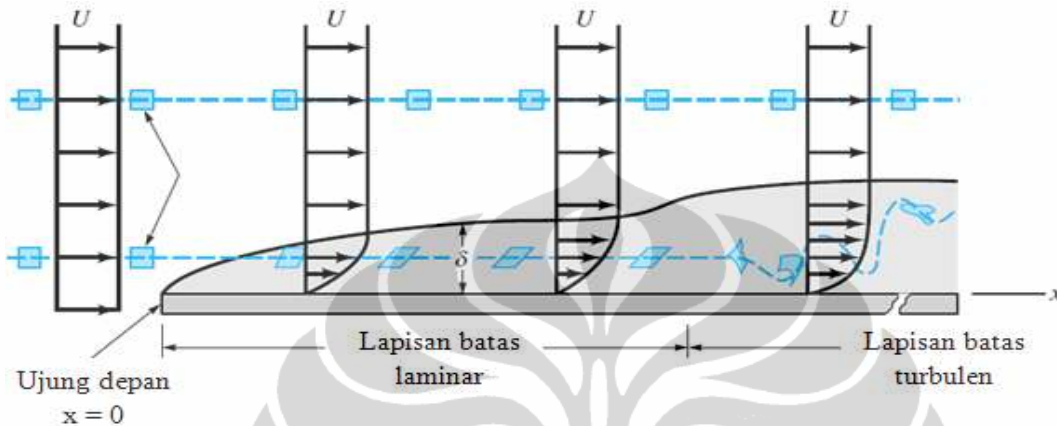
2.2 Lapisan Batas

Konsep lapisan batas merupakan konsep yang dikembangkan oleh Ludwig Prandtl (1874-1953), seorang ilmuwan dari Universitas Göttingen. 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 tersebut menentukan gradien kecepatan di permukaan pelat dan tegangan gesernya. Tegangan geser untuk lapisan batas laminar adalah (Olson R.M & Wright S.J., 1993) :

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

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 Distorsi dari partikel fluida ketika mengalir di dalam lapisan batas
(Munson, 2002)

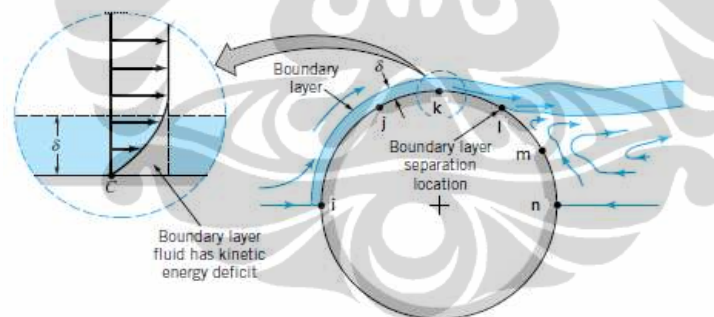
Gb. 2.2 menunjukkan lapisan batas yang terbentuk pada sebuah pelat datar dengan panjang tak berhingga yang di sepanjangnya mengalir suatu fluida viskos, tak mampu-mampat. Dalam gambar tersebut terlihat, sebuah partikel segiempat kecil mempertahankan bentuk aslinya ketika mengalir di dalam aliran seragam di luar lapisan batas. Ketika partikel itu memasuki lapisan batas, partikel tersebut mulai terdistorsi karena gradien kecepatan di dalam lapisan batas, dimana bagian atas partikel mempunyai kecepatan yang lebih besar daripada bagian bawahnya. Partikel fluida tidak berotasi ketika mengalir sepanjang bagian luar lapisan batas, namun akan mulai berotasi ketika melewati batas semu permukaan lapisan batas dan mulai memasuki kawasan aliran viskos. Aliran tersebut dikatakan tak berotasi (*irrotasional*) di luar lapisan batas dan berotasi (*rotasional*) di dalam lapisan batas. Pada suatu jarak di hilir dari ujung depan, aliran lapisan batas menjadi turbulen dan partikel fluida menjadi sangat terdistorsi karena sifat acak dan tak beraturannya turbulensi. 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.

2.3 Separasi Aliran

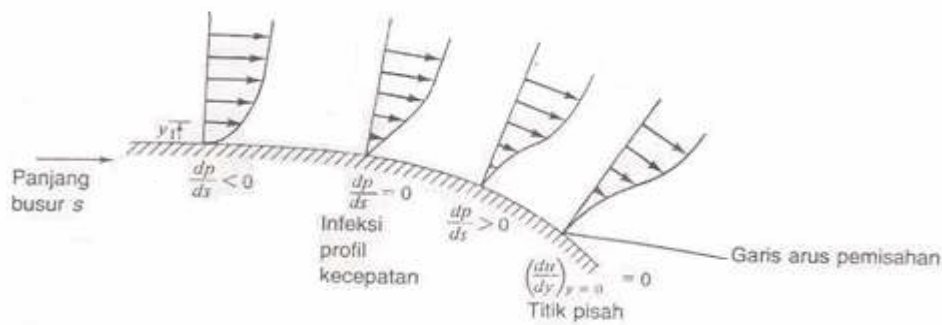
Ketika kontur permukaan suatu benda berubah secara drastis, aliran fluida pada kondisi tertentu tidak mampu untuk bergerak mengikuti kontur tersebut dan mengalami separasi aliran. Separasi aliran menyebabkan munculnya daerah olakan yang memiliki tekanan rendah sehingga menimbulkan gaya *drag*. Adanya daerah bertekanan rendah ini menyebabkan perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang model kendaraan, yang merupakan kontributor utama dari keseluruhan *drag* (Bruneau C.H., 2010).

Separasi aliran merupakan bentuk efek viskos dari fluida, seperti yang ditunjukkan dalam Gb. 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 (Munson, 2002).



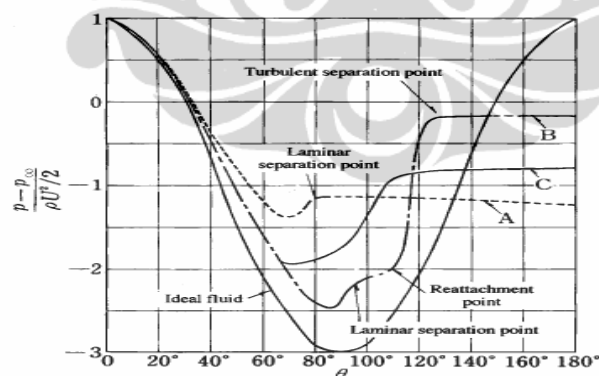
Gambar 2.3 Separasi aliran yang terjadi pada silinder (Munson, 2002)

Untuk aliran yang melalui sebuah permukaan lengkung sedemikian rupa sehingga aliran meluas, profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan kelengkungan) yang dimulai di tempat gradien tekanan menjadi positif seperti yang terlihat pada Gb 2.4. Pada Gb. 2.4 nampak bahwa partikel pada y_1 mengalami penurunan kecepatan ketika mengalir sepanjang permukaan dan akhirnya berhenti sesaat di tempat lapisan batas memisahkan diri.



Gambar 2.4 Aliran melalui sebuah permukaan lengkung
(Olson R.M. & Wright S.J., 1993)

Parameter yang menjadi ukuran terjadinya separasi aliran adalah bilangan Reynolds yang menyatakan perbandingan antara efek inersia dengan efek viskos pada aliran. Untuk sebuah silinder pada aliran terendam, pada bilangan Reynolds 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 Reynolds tinggi separasi aliran terjadi karena lapisan batas turbulen, dan separasi terjadi pada sudut hingga mendekati 130° . Gb. 3.3. menunjukkan lokasi separasi yang berbeda-beda pada permukaan silinder dengan variasi bilangan Reynolds (Nakayama Y & R.F. Boucher, 1998).



Gambar 2.5 Distribusi tekanan pada permukaan silinder : A. $Re = 1.1 \times 10^5 < Re_c$;
B. $Re = 6.7 \times 10^5 > Re_c$; C. $Re = 8.4 \times 10^6 > Re_c$ (Nakayama Y & R.F.
Boucher, 1998)

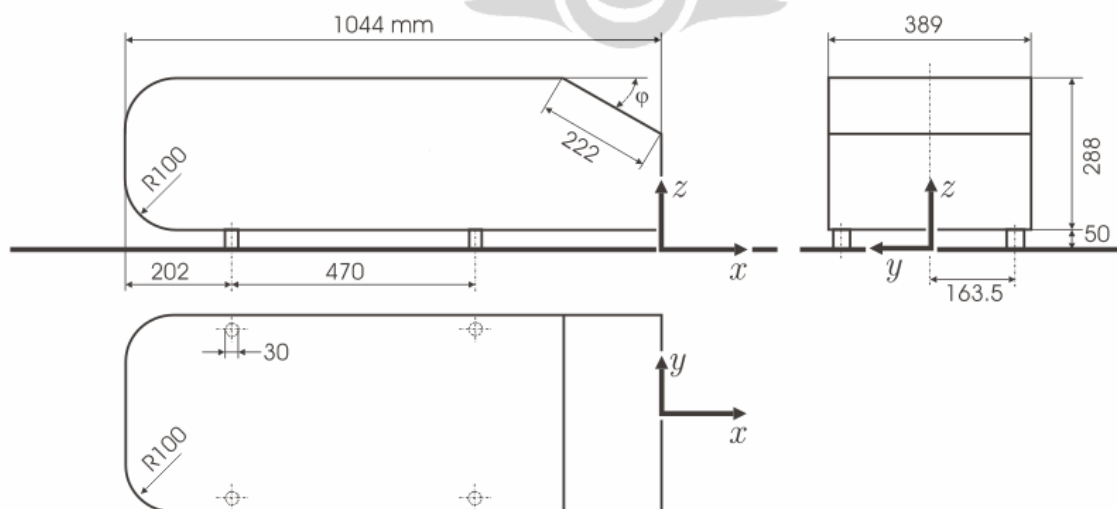
2.4 Intensitas Turbulensi

Turbulensi dapat dianggap sebagai aliran fluida yang berfluktuasi dan merupakan sifat fluida yang sangat penting, khususnya yang berkaitan dengan aliran yang terjadi pada kendaraan. Turbulensi juga dapat dinyatakan dengan intensitas turbulensi yang didefinisikan sebagai perbandingan antara akar purata kuadrat (*root mean square*) dari fluktuasi kecepatan, u' terhadap kecepatan rata-rata, u_{avg} . Intensitas turbulensi adalah suatu skala yang mengkarakteristikan turbulen dalam persen. Adapun persamaan dari intensitas turbulensi (TI) adalah (Munson, 2002) :

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

2.5 Model Bluff Body Kendaraan – Ahmed Body

Kompleksitas yang tercakup dalam disain mobil karena adanya sejumlah besar aksesoris dan perangkat yang membentuk geometrinya mendorong kajian yang intensif secara komputasi dalam memodifikasi medan aliran, sebelum dilakukan pengujian secara eksperimental. Banyak penelitian (Hinterberger et.al, 2004; Fares, 2006), menggunakan model Ahmed (Gb. 2.6) sebagai referensi model paling umum untuk mobil berjenis *bluff body* karena bentuknya yang cukup sederhana namun diyakini dapat mencapai tingkat akurasi yang memadai pada simulasi aliran dengan mempertahankan fitur yang relevan, penting dan praktis dari *body* mobil tersebut.



Gambar 2.6 Model *body* Ahmed (Ahmed et al., 1984)

Model Ahmed adalah geometris *body* sederhana yang mempertahankan fitur aliran utama, khususnya *vortex wake flow* di mana sebagian besar bagian dari *drag* terkonsentrasi dan merupakan parameter yang baik digunakan sebagai acuan tes (*test reference*) (Ahmed et al., 1984). Lienhart H. et.al (2002), melakukan penelitian tentang struktur aliran dan turbulensi pada daerah olakan dari *Ahmed model* dengan sudut kemiringan pada bagian belakang 25° dan 35° secara eksperimental menggunakan *Laser Doppler Anemometer* (LDA). Franck G. dan D'Elia J. (2004) juga melakukan penelitian dengan menggunakan model geometri *body* yang dianalisis dengan sudut kemiringan 12.5° . Penelitian serupa, juga dilakukan (Hinterberger et.al, 2004) menggunakan metode simulasi dengan kode *Finite Volume LESOCC2* yang disempurnakan versinya dari kode yang dikembangkan di *Institute Hydromechanics*. Sementara itu, Fares (2006) menggunakan model *Lattice Boltzman PowerFLOW 4,0 D3Q191* tetapi dengan sudut kemiringan 25° dan 35° . Demikian pula, Minguez M. et al (2008), melakukan penelitian secara komputasi tentang simulasi *High-order large-eddy* terhadap aliran yang melewati kendaraan *Ahmed model*. *Ahmed model* yang diinvestigasi mempunyai sudut kemiringan 25° . Kecepatan *upstream* yang digunakan adalah 40 m/s dengan bilangan Reynolds adalah 786000. Pendekatan numerik yang digunakan adalah penyelesaian multidomain *Spectral Chebyshev-Fourier* dan model *bluff body* dibuat dengan metode *Pseudopenalization*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa topologi aliran ditangkap dengan baik dimana separasi parsial (*partial separation*) dari lapisan geser yang melewati permukaan bidang miring dan terjadinya dua *contrarotating trailing vortices* yang kuat sehingga memperluas olakan. Interaksi antara vortisitas yang berukuran besar dengan struktur yang lebih kecil sehingga menyerupai vortisitas tapal kuda pada lapisan geser di atas permukaan miring akan membentuk struktur heliks yang besar dan hal ini merupakan fenomena *unsteady* pada *wake*.

Uruba V. & Hladík O. (2009), melakukan penelitian secara eksperimental tentang olakan pada *Ahmed body*. Model Ahmed yang digunakan mempunyai perbandingan 3/20 dari *Ahmed model* original sehingga mempunyai panjang 156.6 mm. Kecepatan aliran dan bilangan Reynolds masing-masing 6.5 m/s dan 54000. *Ahmed body* yang dianalisis mempunyai sudut kemiringan 25° dan 35° pada bagian belakang terhadap bidang horizontal. Model uji ditempatkan pada seksi uji terbuka (*open test section*) dengan ukuran 250 x 250 mm². Pengukuran dilakukan dengan menggunakan

metode PIV (*particle image velocimetry*). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada kasus 25° *down-flow* terlihat sangat kuat di sekitar bidang simetri sehingga pasangan *contra-rotating vortex* lemah, sedangkan pada kasus 35° terlihat *vortex* sangat kuat.

Penelitian secara eksperimental tentang aerodinamika kendaraan tipe *bluff body* dilakukan dengan mengkombinasikan PIV dan *oil visualization* untuk memahami secara mendalam perilaku aliran di sekitar *Ahmed body* dan menginterpretasikan secara fisik evolusi dari koefisien *drag*. *Ahmed model* yang digunakan pada pengujian ini diberikan variasi sudut kemiringan pada bagian belakang. Adapun sudut kemiringan yang digunakan adalah 10° , 20° , 25° , 30° dan 40° . Hasil koefisien *drag* yang diperoleh jika dibandingkan dengan hasil dari *Ahmed model* menunjukkan bahwa untuk sudut 10° s/d 20° , koefisien *drag* tidak mengalami perubahan yang banyak, hampir konstan. Untuk 20° s/d 30° , ada perbedaan sekitar 50% koefisien *drag* yang diperoleh dari 0.27 ke 0.40 yang terjadi pada sudut 30° . Dan setelah sudut 30° , koefisien *drag* yang diperoleh hampir konstan (Conan B. et al, 2011).

2.6 Modus Kontrol Aliran

Pengembangan kendaraan saat ini membutuhkan latar belakang aerodinamika yang kuat untuk meningkatkan kontrol aliran baik dengan alat kontrol pasif maupun aktif. Secara umum, teknik kontrol aliran yang telah dikembangkan dapat dibedakan menjadi 4 berdasarkan konfigurasi dan tujuannya (Jean-Luc Aider, 2009) :

- 1) 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*.
- 2) Melakukan kontrol terhadap lapisan batas pada *upstream* dari titik separasi, sehingga dapat dimodifikasi lokasi dari titik separasi dan sifat dari lapisan geser.
- 3) 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*.
- 4) 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.

Strategi kontrol aliran untuk mengurangi hambatan aerodinamika sebuah benda pada dasarnya berlandaskan pada upaya memodifikasi timbulnya separasi aliran di lapisan batas dari permukaan padat sebuah benda yang berakibat pada terbentuknya aliran balik di sekitar benda tersebut. Aliran yang sedang bergerak maju secara teratur terpecah saat terjadinya separasi dan mengakibatkan perubahan drastis pada distribusi tekanan dan menimbulkan gaya hambat (*drag*). Oleh karena itu, pada banyak aplikasi aerodinamika sangat diperlukan pengendalian terhadap aliran pada lapisan batas untuk mencegah atau menunda terjadinya separasi sejauh mungkin.

Secara umum terdapat lima era yang cukup berbeda pada perkembangan sains dan teknologi di bidang kontrol aliran separasi : era empiris (sebelum abad 20), era saintifik (1900-1940), era perang dunia II – perang dingin (1940-1970), era krisis energi (1970-1990) dan era sesudah 1990 (Gad-El-Hak, 1996). Setelah era saintifik dimulai dengan dikemukakannya teori lapisan batas oleh Prandtl (1908), secara pelan tetapi pasti penggunaan peralatan kontrol aliran (*flow control devices*) tidak lagi berdasarkan upaya *trial and error* semata, namun sangat didasari oleh pertimbangan-pertimbangan fisika (*physical reasoning*) untuk mendukung disain yang rasional baik pada pesawat terbang maupun kendaraan. Pada era perang, kebutuhan militer mendikte pengembangan pesawat, kapal, kapal selam, misil yang mampu bergerak cepat dan bermanuver tinggi sehingga kontrol separasi aliran menjadi kunci dalam mencapai tujuan tersebut. Krisis energi yang dimulai sejak awal tahun 1970-an mengubah fokus pengembangan teknologi kontrol aliran pada sektor sipil. Dengan didukung pesatnya perkembangan teknologi komputasi, pengembangan aerodinamika pada pesawat, kapal dan kendaraan darat untuk transportasi sipil ditujukan pada pengurangan hambatan (*drag reduction*) sebagai upaya penghematan energi. Pada era ini, teknik kontrol pasif separasi aliran berkembang sangat intensif dan kemudian diikuti oleh teknik kontrol aktif mulai akhir tahun 1990-an yang memberi alternatif menjanjikan dalam mengembangkan kendaraan dengan disain aerodinamis yang cerdas (*smart aerodynamics designs*).

Strategi kontrol pasif mempunyai dua alternatif penerapan, pada dinding (*at the wall*) atau terpisah dari dinding (*apart from the wall*) parameter-parameter permukaan

dinding yang meliputi bentuk, kelengkungan (*curvature*), kekasaran, temperatur dan porositas dimanipulasi untuk mendapatkan bentuk profil kecepatan tertentu di dekat dinding dapat meningkatkan ketahanan lapisan batas terhadap transisi dan separasi (Bearman 1965; Bearman & Harvey, 1993). Pada pendekatan kedua, sebuah alat pengontrol diletakkan terpisah dari dinding (*large-eddy break up devices/outer-layer devices*). Pada kendaraan penumpang, teknik ini antara lain diterapkan dengan perangkat terpisah yang ditempatkan di depan atau di belakang kendaraan yang berfungsi mengurangi perkembangan zona resirkulasi di kaca belakang atau di bagian belakang dan mengurangi interaksi antar struktur-struktur olakan yang berpusar (*swirling wake structure*). Hasil pengurangan hambatan aerodinamika yang cukup menarik diperoleh dengan menempatkan alat kontrol di bagian belakang dengan orientasi arah sejajar atau melintang aliran utama (Gillieron, 2003). Pendekatan lain adalah dengan menempatkan alat kontrol di sepanjang dinding untuk menghasilkan *vortical structure* yang akan menggeser garis separasi akan mengurangi hambatan aerodinamika sampai 40%. Struktur berpusar akan meningkatkan turbulensi lokal dalam aliran dan perpindahan energi di lapisan batas, oleh karena itu kecepatan akan meningkat di dekat dinding (Bak, et.al, 2000). Aider J.L. (2009), melakukan penelitian secara eksperimental terhadap *bluff-body* 3D menggunakan kontrol pasif berupa *vortex generator*. Model yang digunakan adalah *Ahmed model* dengan sudut kemiringan 25° . Semua pengukuran dilakukan pada PSA Peugeot-Citroen *in-house open wind tunnel* dengan panjang 6 m, tinggi 2.1 m dan lebar 5.2 m. Pengukuran struktur aliran dilakukan dengan menggunakan PIV (*particle image velocimetry*). Pengurangan *drag* yang diperoleh sebesar 12% dengan kecepatan *upstream* $U_0 = 40$ m/s.

Penelitian secara eksperimental tentang pengurangan *drag* aerodinamika dengan menggunakan pelat *splitter vertical* telah dilakukan (Gillieron P. & Kourta A., 2010). Model uji yang digunakan adalah *Ahmed body* yang mempunyai skala perbandingan 0.75 dari *Ahmed body* original dengan dua sudut kemiringan 0° dan 25° . Pelat *splitter* vertikal ditempatkan pada bagian depan atau belakang dari model uji untuk mengurangi *drag*, dengan dan tanpa sudut kemiringan yang diinvestigasi pada bilangan Reynold 1.0×10^6 dan 1.6×10^6 . Eksperimen dilakukan dengan menggunakan terowongan angin yang terdapat pada Laboratorium Aerodinamik Paris ENSAM (*Ecole Nationale Supérieure d'Arts & Métiers*). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pelat *splitter*

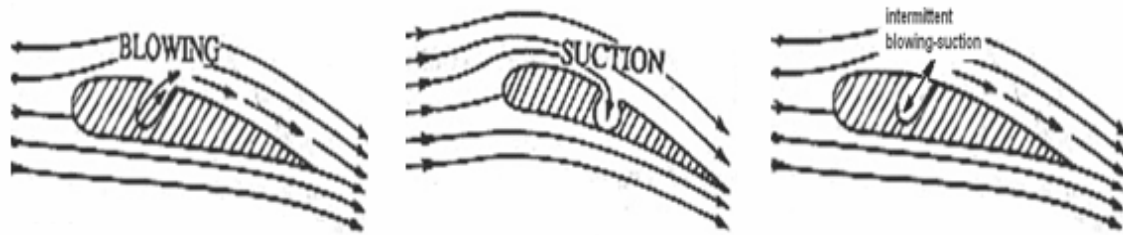
vertical yang diletakkan pada bagian hilir (*downstream*) dari dasar model uji, pengurangan *drag* mendekati 12%. Dan jika pelat *splitter vertical* ditempatkan pada bagian hulu (*upstream*) sejajar dengan model uji dari depan, pengurangan *drag* yang diperoleh hampir 7%.

Sementara itu, Fourrie G (2011) juga melakukan suatu penelitian tentang pengurangan *drag* pada *bluff body* dengan menggunakan sebuah *deflector*. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental, dimana kontrol pasif aliran berupa *deflector* ditempatkan pada tepi atas jendela belakang dari model. Studi ini dilakukan pada sebuah terowongan angin dengan bilangan Reynolds sebesar 3.1×10^5 and 7.7×10^5 berdasarkan panjang dari model. Model yang digunakan adalah *Ahmed model* dengan sudut kemiringan pada bagian belakang 25° . Hasil yang diperoleh adalah pengurangan *drag* sebesar 9%. Namun tanpa adanya pemberian energi tambahan, didapati banyak keterbatasan dalam mengendalikan separasi aliran tersebut untuk mencapai tingkat pengurangan *drag* yang lebih besar. Alih-alih sebagai suatu strategi kontrol, beberapa peneliti cenderung mengatakan strategi kontrol pasif hanya sebagai suatu strategi manajemen aliran (Friedler & Fernholz, 1990).

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 gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*). Secara konseptual, lapisan batas yang mengalami retardasi ini mungkin diberikan energi tambahan atau dihilangkan dan digantikan dengan fluida berenergi tinggi sehingga memungkinkan aliran terus bergerak melawan gradien tekanan balik tanpa mengalami separasi. Konsep pemberian energi dapat dilakukan dengan tiga mekanisme yaitu : (1) tiupan (*blowing*), (2) hisapan (*suction*), dan (3) jet sintetik (*net zero mass flux intermittent blowing and suction*). Konsep dasar tersebut diilustrasikan pada Gb. 2.7.

Mekanisme kontrol dengan tiupan (*blowing*) secara praktis dapat direalisasikan dengan mudah melalui penggunaan perangkat hembus (*blowing devices*) seperti *blower* atau kompresor, sementara mekanisme hisapan (*suction*) dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat hisap (*vacuum devices*) seperti pompa vakum. Secara teoritis

modus tiupan atau hisapan dapat dilakukan secara kontinu maupun pulsatif/periodik yang akan memodifikasi lapisan batas dengan karakteristiknya masing-masing.



Gambar 2.7 Konsep dasar kontrol aktif separasi aliran

Sementara itu, mekanisme jet sintetik dihasilkan oleh sebuah aktuator jet sintetik (*Synthetic Jet Actuator/SJA*). Secara teknik, aktuator ini adalah peralatan yang memerlukan input massa netto nol (*zero mass input*), namun menghasilkan output momentum netto tidak nol (*non zero momentum output*). Jet sintetik ini terbentuk dari perpaduan rangkaian *vortex* yang ditimbulkan oleh getaran harmonik sebuah diafragma yang berfungsi sebagai dinding sebuah *cavity*. Jika amplitudo getaran diafragma cukup besar, separasi aliran terjadi di sekitar orifis yang berfungsi sebagai saluran keluar-masuk aliran fluida. Dengan demikian suatu lapisan geser akan terbentuk antara fluida yang keluar dan fluida di sekelilingnya. Lapisan geser ini kemudian menggelinding membentuk cincin *vortex* (pada nosel jet lingkaran) atau pasangan *vortex* (pada *nossel jet slot*). Secara ringkas, sebuah jet sintetik adalah deretan cincin-cincin *vortex* yang terbentuk secara berurutan. Pada aplikasi aerodinamika, jet sintetik ini memiliki keunggulan untuk memodifikasi lapisan batas dalam upaya mengurangi gaya hambatan (*drag*) aerodinamika. Gb. 2.8 menunjukkan sketsa konseptual sebuah jet sintetik yang dihasilkan sebuah aktuator.

Untuk menggambarkan kecepatan aliran fluida pada *cavity*, pertama-tama diasumsikan bahwa pergerakan fluida pada *cavity* adalah sama dengan pergerakan getaran membran yang mengikuti persamaan gelombang sinusoidal:

$$y(t) = A \sin(\omega t) \quad (2.6)$$

dimana y adalah simpangan, A adalah simpangan maksimum, ω adalah kecepatan sudut, dan f adalah frekuensi dari gelombang. Dengan demikian dapat didefinisikan

bahwa kecepatan fluida pada *cavity* adalah sama dengan kecepatan partikel pada membran, yaitu :

$$U(t) = \frac{d}{dt}y(t) \quad (2.7)$$

Maka persamaan (2.5), menjadi :

$$U(t) = \omega A \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

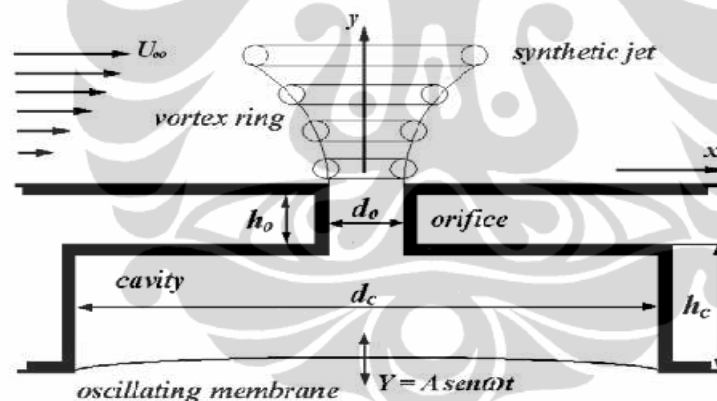
atau :

$$U(t) = U_{maks} \cos(2\pi f t) \quad (2.9)$$

dimana :

$$U_{maks} = U_{rata-rata} / \sqrt{2} \quad (2.10)$$

dengan $U_{rata-rata}$ adalah kecepatan rata-rata.



Gambar 2.8 Sketsa jet sintetik yang dibentuk oleh aktuator dalam *cavity* dengan saluran keluar orifis (Mello, 2004)

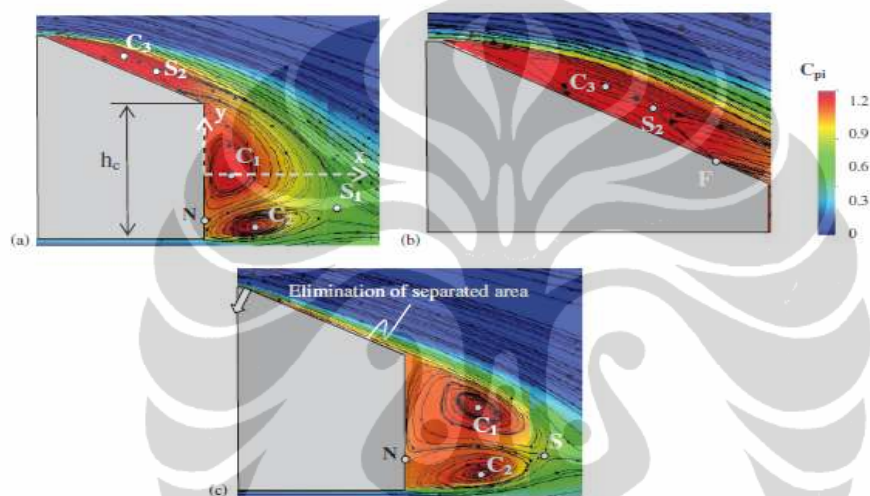
2.7 Arah Perkembangan dan *State of the Art* Riset Kontrol Aktif Separasi Aliran pada Aplikasi Otomotif

Hasil-hasil awal kajian dasar sistem kontrol aktif separasi aliran turbulen dengan teknik-teknik tiupan/hisapan yang semula difokuskan untuk keperluan aplikasi dirantara mengindikasikan bahwa pemanfaatannya di dunia otomotif dapat meningkatkan secara dramatis kinerja aerodinamika dan aeroakustika dari kendaraan

yang bergerak dengan dampak yang dapat diabaikan terhadap geometri dan disain kendaraan. Banyak kajian yang menunjukkan kontrol aktif separasi aliran turbulen memberikan alternatif yang prospeknya sangat baik untuk mengurangi hambatan aerodinamika pada kendaraan otomotif. Kontrol secara aktif memerlukan sumber energi luar untuk mengontrol aliran di sekitar kendaraan tanpa perlu mengganggu bentuknya. Misalnya perangkat tiupan yang dipasang pada sebuah profil ONERA D mampu menggeser atau bahkan menghilangkan separasi aliran (Ivanic & Gilliron, 2004). Dalam penelitian lainnya, kombinasi tiupan dan hisapan yang diterapkan pada bagian belakang suatu model penumpang dengan memodifikasi aliran sirkulasi di belakang *body* mobil (*coanda effect*) dapat meningkatkan tekanan dasar sampai 50% dan mengurangi drag sampai 10% (Gerrop & Odhental, 2000).

Brunn A. et al (2007) melakukan penelitian secara numerik dan eksperimental tentang kontrol aktif *drag* pada model kendaraan generik (*generic car model*) dengan tujuan untuk mengurangi *drag* aerodinamika total dari model tersebut. Pada penelitian ini, model kendaraan generik menggunakan disain dasar *Ahmed model* yang mempunyai ukuran $\frac{1}{4}$ dari geometri *Ahmed body* original. Dua *Ahmed model* yang berbentuk 3D yang diinvestigasi, mempunyai sudut kemiringan pada bagian belakang 25° dan 35° . Bilangan Reynolds berdasarkan kecepatan *upstream* dan panjang model diset pada 0.5×10^6 untuk eksperimen dan simulasi numerik. Untuk kajian eksperimental dilakukan pada terowongan angin (*wind tunnel*) untuk menginvestigasi medan aliran dan olakan pada *Ahmed body* menggunakan metode PIV dan visualiasi aliran. *Force balance* pada terowongan angin kecepatan rendah (*low speed wind tunnel*) dimana sensor *strain gage* diletakkan di bawah *test section* untuk mengukur pengaruh kontrol aktif terhadap *drag* total dari *Ahmed body*. Kajian numerik pada penelitian ini menggunakan model turbulensi LES. Untuk sudut kemiringan 35° , aktuator yang menghasilkan gangguan periodik digunakan untuk merangsang lapisan geser berpisah dari bagian belakang yang miring dari model kendaraan dimana *spanwise vortex structures* dominan pada daerah olakan. Pendekatan kontrol ini mencapai pengurangan daerah aliran balik untuk rentang *forced frequency* $0.1 \leq StH \leq 0.9$. Untuk sudut kemiringan 25° , *constant blowing* yang diletakkan di dekat permukaan yang miring diinvestigasi untuk mengontrol vortisitas longitudinal yang berasal dari permukaan miring tersebut. Pendekatan secara eksperimental dan numerik dengan menggunakan

constant blowing menunjukkan bahwa vortisitas tersebut menjadi lemah. Namun, secara keseluruhan perubahan *drag* total yang diperoleh sangat kecil sekitar 2.5% karena melemahnya vortisitas dan hilang dengan bertambahnya daerah aliran separasi pada bagian yang miring dari *Ahmed model*, dimana hal tersebut merupakan efek positif dari *drag*. Sementara itu, simulasi numerik 3D berdasarkan metoda Lattice Boltzman pada sebuah model kendaraan (*Ahmed body*), hasilnya dapat digunakan untuk mengembangkan dan menentukan parameter-parameter kontrol aktif yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja aerodinamika kendaraan (Roumeas et al, 2008).



Gambar 2.9 Medan koefisien total tekanan jatuh pada bidang tengah longitudinal :
 a. tanpa kontrol aliran; b. sisi miring tanpa kontrol aliran;
 c. dengan kontrol aliran (Roumeas et al, 2009).

Roumeas et al (2009), juga melakukan penelitian secara numerik tentang pengurangan *drag* dengan mengontrol separasi aliran pada bagian belakang kendaraan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan metode *Lattice Boltzmann* 3D dengan model turbulensi *k-epsilon RNG*. Model uji yang digunakan adalah *Ahmed model* dengan sudut kemiringan 25° terhadap bidang horizontal. Bilangan Reynolds yang digunakan berdasarkan panjang model adalah 2.8×10^6 . Kecepatan *suction* diset pada 24 m/s ($0.6 V_0$), dimana kecepatan *upstream* V_0 adalah 40 m/s. Kontrol aliran yang digunakan adalah *continuous suction* yang ditempatkan pada sisi miring bagian belakang dari mobil *fatsback*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pengaruh dari *suction* (hisapan) memberikan efek *reattachment* pada aliran yang terseparasi pada dinding

bidang miring *Ahmed body*, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 2.9. Dengan adanya *reattachment* mengakibatkan efek positif dalam pengurangan *drag*. Hal tersebut terjadi karena berkurangnya total tekanan jatuh pada daerah olakan, berkurangnya region olakan pada *downstream*, dan meningkatnya tekanan statik pada dinding belakang model *Ahmed body*. Penelitian yang dilakukan oleh Roumeas et al (2009) memperoleh pengurangan *drag* hingga 17% pada kecepatan *suction* $0.6V_o$ dan peningkatan kecepatan *suction* lebih dari nilai $0.6V_o$ tidak membawa dampak yang signifikan pada pengurangan *drag*. Pada tahun yang sama, Roumeas et al (2009) juga melakukan penelitian secara numerik tentang analisis dan kontrol olakan aliran yang melalui *square-back geometry*. Simulasi numerik 3D dilakukan berdasarkan metode *Lattice Boltzmann*. Kontrol aktif aliran berupa *continous blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang dari *generic squareback bluff body*. Kecepatan *blowing* diset pada $0.5U_o$, dimana kecepatan upstream U_o adalah 40 m/s. Bilangan Reynolds yang digunakan yaitu 2.8×10^6 berdasarkan panjang model. Efek *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang model adalah mampu mengurangi *total pressure loss* dan meningkatkan tekanan statik pada bagian belakang model. Pengurangan *drag* yang diperoleh sebesar 20%.

Penelitian secara komputasi 2D dan 3D tentang prosedur aktif untuk mengontrol aliran yang melewati *Ahmed body* telah dilakukan Bruneau C.H. et al (2009). *Ahmed body* yang digunakan pada penelitian ini mempunyai sudut kemiringan 25° pada bagian belakang. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah 30,000 berdasarkan panjang model $L= 3.625H$, dimana H adalah tinggi *body*. Kontrol aktif aliran yang digunakan adalah tiga kombinasi penempatan *suction* dan *blowing* pada bagian belakang dari *Ahmed model*. Pengurangan *drag* terbaik dari 3 kombinasi penempatan *suction* dan *blowing* adalah sebesar 13%.

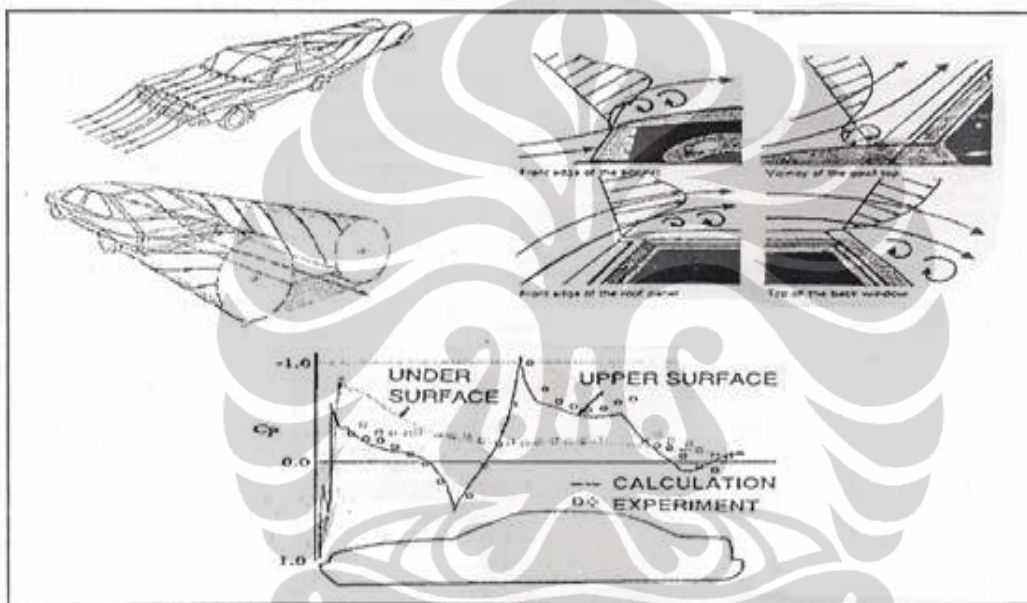
Bruneau C.H. (2010), melakukan suatu penelitian dengan mengkombinasikan teknik kontrol aktif dan pasif untuk mereduksi koefisien *drag* pada bagian belakang dari *square back Ahmed body*, dimana pengurangan *drag* yang diperoleh 30%. Krentel D. et al (2010), juga melakukan penelitian tentang aplikasi kontrol aktif aliran pada model 3D mobil generik. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan *Ahmed model* dengan sudut kemiringan 25° dan 90° . Kontrol aktif yang digunakan adalah *blowing* (tiupan) yang ditempatkan pada tepi atas bagian belakang dari *Ahmed*

model. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan PIV. Pengurangan *drag* yang diperoleh sebesar 5.7% untuk model uji dengan sudut 25° dan 2.2% untuk model uji dengan sudut 90° . Penelitian secara numerik dengan pendekatan kontrol aktif aliran untuk mereduksi *drag* aerodinamika pada kendaraan *generic square-back* juga telah dilakukan Wassen E. et al (2010). *Ahmed model* dengan sudut kemiringan 90° digunakan pada penelitian ini dengan menggunakan LES. Untuk memodifikasi olakan dan mengurangi *drag* tekanan, digunakan kontrol aktif aliran *steady blowing* dengan kecepatan $1.5U_0$ melalui celah kecil yang ditempatkan pada sepanjang tepi bagian belakang dari model uji. Bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini adalah 500000. Dengan bervariasi sudut *blowing*, pengurangan *drag* aerodinamika maksimum yang diperoleh sebesar 11.1% pada sudut *blowing* 45° .

Krajnović S. & Fernandes J (2011), melakukan suatu penelitian tentang simulasi numerik terhadap aliran di sekitar model kendaraan yang disederhanakan dengan menggunakan kontrol aktif aliran. LES (*large eddy simulation*) digunakan untuk mempelajari pengaruh dan mekanisme aliran yang dihasilkan dengan menggunakan kontrol aktif aliran yang diaplikasikan pada geometri kendaraan (*Ahmed body*) dua dimensi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa adanya peningkatan tekanan dasar dan pengurangan *drag* sekitar 11% yang diperoleh dengan adanya kontrol aktif aliran yang ditempatkan pada tepi bagian belakang model kendaraan. Penelitian tentang analisis komputasi kontrol aktif aliran untuk mereduksi *drag* aerodinamika terhadap van model telah dilakukan Harinaldi et al (2011). Pada penelitian ini, model uji yang digunakan adalah modifikasi Ahmed model (*modified/reversed Ahmed model*) dengan ukuran $\frac{1}{4}$ dari *Ahmed model* original. Bagian depan dari model mempunyai kemiringan 35° terhadap bidang horizontal. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah 2.98×10^5 berdasarkan panjang model $L = 0.261$ m dan kecepatan *upstream* $U_0 = 16.7$ m/s. *Blowing* dan *suction* merupakan kontrol aktif yang diaplikasikan pada penelitian ini yang ditempatkan pada bagian belakang dari model. Kecepatan *blowing* dan *suction* masing-masing diset pada 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s dan 15 m/s. Penyelesaian secara numerik menggunakan *Fluent* dengan model turbulensi *k-epsilon standar*. Pengurangan *drag* yang diperoleh masing-masing 15.83% untuk *suction* dan 14.38% untuk *blowing*.

Meskipun demikian, implementasi kontrol aktif separasi aliran pada kendaraan otomotif masih memerlukan pemahaman yang lebih baik untuk sampai ke tahapan

aplikasi praktis. Hal ini disebabkan oleh karakteristik aliran yang berkembang di sekitar kendaraan sangat turbulen dan tiga dimensi. Separasi aliran yang terjadi di gril radiator, di bagian bawah dan atas pilar A, di bagian bawah *body*, di sekitar roda yang berputar, pada dinding samping, pada tepi atas dan samping kaca belakang, seluruhnya berinteraksi dan berkontribusi pada kompleksitas aliran di sekitar olakan. Lebih lanjut lagi, aliran-aliran internal sekunder, yang terjadi di dalam ruang mesin dan bagian bawah *body*, juga mempengaruhi gaya-gaya aerodinamika yang bekerja pada kendaraan. Gb. 2.10 mengilustrasikan kondisi medan aliran yang diuraikan di atas.



Gambar 2.10 Karakteristik aliran yang berkembang di sekitar kendaraan

2.8 Efisiensi Energi Kontrol Aktif Aliran

Aplikasi kontrol aktif aliran memanfaatkan sumber energi eksternal, sehingga perlu diperhitungkan efisiensi sistem kontrol aktif itu sendiri. Sistem akan efisien jika energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan kontrol aktif lebih kecil dibandingkan dengan energi yang dihemat (*saving*) melalui pengurangan *drag* aerodinamika. Besaran efisiensi sistem kontrol aktif (ζ) dinyatakan pada pers. (2.11) (Roumeas, M., Gillieron, P. & Kourta, A., 2009).

$$\zeta = P_{ec}/P_c \quad (2.11)$$

dimana :

$$P_{ec} = \Delta F_x \cdot U_0 \quad (2.12)$$

$$P_c = K * 0.5 * (\rho \cdot U_{AC}^3 \cdot S_{AC}) \quad (2.13)$$

P_{ec} dan P_c adalah energi yang dihemat melalui pengurangan *drag* dan energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan kontrol aktif. S_{AC} adalah luas penampang kontrol aktif dan ΔF_x adalah selisih *drag* aerodinamika yang dihasilkan. U_0 adalah kecepatan *upstream* dan U_{AC} adalah kecepatan kontrol aktif. Sedangkan K adalah total rugi-rugi tekanan, yang merupakan penjumlahan dari rugi-rugi tekanan pada slot kontrol aktif (K_{slot}) dengan rugi-rugi tekanan pada bagian hulu (sumber penggerak) kontrol aktif (K_{sys}). Untuk aliran yang kontinyu $K_{slot} = 1.5$ dan untuk $K_{sys} = 3.5$, sehingga total rugi-rugi tekanan sistem = 5 (Roumeas, M., Gillieron, P. & Kourta, A., 2009).

2.9 Pemodelan Turbulensi

Aliran turbulen adalah salah satu fenomena fisik yang kompleks dan menarik minat banyak peneliti. Tennekes dan Lumley (1972) menyatakan bahwa aliran turbulen tidak dapat didefinisikan, tetapi dapat diidentifikasi berdasarkan sifat-sifat turbulensi. Beberapa sifat turbulensi tersebut adalah :

1. Tidak beraturan

Salah satu sifat aliran turbulen adalah tidak beraturan atau random.

2. *Dispersif*

Aliran turbulen akan cenderung menyebar (*dispersif*) sehingga menyebabkan aliran turbulen memiliki kemampuan yang tinggi dalam proses pencampuran (*mixing*), perpindahan panas, perpindahan momentum dan perpindahan massa.

3. *Disipatif*

Turbulen memiliki energi internal berupa pusaran besar (*large scale Eddy*) dan pusaran kecil (*small scale Eddy*). Energi pusaran besar didapat dari aliran utama (*free stream*) dan energi pusaran kecil ditransfer dari pusaran besar. Proses ini dikenal sebagai *energy cascade*. Energi yang dikandung di pusaran kecil akan melemah karena efek gesekan fluida akibat viskositas fluida.

4. Bilangan Reynolds yang tinggi

Aliran turbulen selalu memiliki bilangan Reynolds yang tinggi. Nilai absolut dari bilangan Reynolds untuk turbulen selalu relatif terhadap konfigurasi aliran. Misalnya aliran eksternal akan memiliki bilangan Reynolds yang lebih tinggi daripada aliran internal, tetapi nilai relatif bilangan Reynolds aliran turbulen selalu lebih tinggi daripada aliran laminar.

5. Vortisitas tiga dimensi

Aliran turbulen selalu memiliki vortisitas/pusaran tiga dimensi. Pembentukan lapisan batas antara aliran dan dinding selalu berawal pada kondisi laminar. Vortisitas aliran laminar bersifat dua dimensi dari dinding ke arah *free stream*. Semakin ke arah hilir (*downstream*) lapisan batas akan mengalami transisi dan berubah menjadi turbulen. Transisi dari laminar ke turbulen merupakan mekanisme kompleks yang mengubah vortisitas laminar (dua dimensi) menjadi vortisitas turbulen (tiga dimensi).

6. Kontinum

Aliran turbulen adalah bagian dari disiplin ilmu mekanika fluida. Dalam analisisnya, mekanika fluida selalu menggunakan pendekatan bahwa fluida sebagai kontinum, suatu ukuran fluida yang jauh lebih besar dari ukuran molekul, tetapi lebih kecil dari partikel. Karena itu *Eddy* yang terkecil dari turbulensi, ukurannya masih jauh lebih besar daripada ukuran molekul.

Turbulensi terjadi jika dalam aliran terdapat *Eddy*, baik yang berukuran besar dan kecil. Tiap ukuran *Eddy* memiliki karakteristik tertentu, sesuai dengan energi pusaran (kecepatan rotasi/*turbulent velocity scale* u) dan ukuran (radius rotasi/*turbulent length scale* l) yang dimilikinya. Model turbulensi dapat diklasifikasikan menurut cara pemodelan *large eddies* dan *small eddies* dalam aliran turbulen. Secara umum, pemodelan turbulensi dapat dibagi atas 3 jenis yakni *Direct Numeric Simulation (DNS)*, *Large Eddy Simulation (LES)* dan model turbulensi berdasarkan *Reynolds Averaged Equation*.

Salah satu bagian dari model turbulensi *Averaged Equation* adalah model turbulensi *Two-Equation*. Model turbulensi *k-epsilon standar*, *k-epsilon realizable*, *k-omega standar* dan *k-omega SST* merupakan model turbulensi *Two-Equation*. Model turbulensi *k-ε standar* (Fluent 6.3, 2006) merupakan model semi empiris yang dikembangkan oleh Launder dan Spalding. Model *k-epsilon standar* adalah model

turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulen velocity*) dan skala panjang (*length scales*) ditentukan secara independen. Kestabilan, ekonomis (dari sisi komputasi) dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model *k-epsilon standar* sering digunakan pada simulasi aliran fluida dan perpindahan kalor. Persamaan transport untuk model *k-epsilon standar* adalah :

a. Energi kinetik :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.14)$$

b. Laju disipasi :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.15)$$

dimana konstantanya adalah :

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

Model *k-epsilon realizable* (Fluent 6.3, 2006) merupakan pengembangan model yang relatif baru dan berbeda dengan model *k-epsilon standar* dalam dua hal, yaitu :

- Pada model *k-epsilon realizable* terdapat formulasi baru viskositas turbulen
- Sebuah persamaan untuk *epsilon* telah diturunkan dari persamaan untuk menghitung fluktuasi vortisitas rata-rata.

Kelebihan dari model *k-epsilon realizable* adalah lebih akurat untuk memprediksikan laju penyebaran fluida dari pancaran jet/nosel. Model ini juga memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi. Salah satu keterbatasan model *k-epsilon realizable* adalah memproduksi viskositas turbulen non fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (*multiple reference frame, sliding mesh*). Persamaan transport untuk model *k-epsilon realizable* adalah:

a. Energi kinetik :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.16)$$

b. Laju disipasi :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v\epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon \quad (2.17)$$

dimana konstantanya adalah :

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$$

Model *k-omega standard* (Fluent 6.3, 2006) merupakan model berdasarkan model *Wilcox k-omega* yang memasukkan beberapa modifikasi untuk menghitung efek aliran pada bilangan Reynolds rendah, kompresibilitas dan penyebaran aliran geser (*shear flow*). Model ini dapat diaplikasikan pada aliran dalam saluran maupun aliran bebas geser (*free shear flow*). Pada model *k-omega*, energi kinetik turbulen, k , dan laju disipasi spesifik, ω , diperoleh dari persamaan *transport* :

a. *Kinematic Eddy viscosity* :

$$v_T = \frac{k}{\omega} \quad (2.18)$$

b. Energi kinetik :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma^* v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.19)$$

c. Laju disipasi :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2.20)$$

dimana konstantanya adalah :

$$\alpha^*_\infty = 1, \alpha_\infty = 0.52, \alpha_0 = 1/9, \beta^*_\infty = 0.09, \beta_i = 0.072, R_\beta = 8 \\ R_k = 6, R_\omega = 2.95, \zeta^* = 1.5, M_{t0} = 0.25, \sigma_k = 2.0, \sigma_\omega = 2.0$$

Model *k-omega SST* (Fluent 6.3, 2006) dikembangkan oleh Menter untuk memadukan formulasi model *k-omega standard* yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model *k-epsilon* yang mempunyai kelebihan pada aliran *free stream*. Untuk mencapai hal tersebut, model *k-epsilon* diubah menjadi formulasi *k-omega SST*. Model *k-omega SST* mirip dengan model Model *k-omega standard*, tetapi dengan beberapa perbaikan :

1). Model *k-omega standard* dan model *k-epsilon* yang telah diubah dikalikan dengan suatu fungsi pencampuran dan kedua model digunakan bersama-sama, sehingga

lebih akurat untuk daerah di dekat dinding maupun aliran yang jauh dari dinding dan *free stream flow*.

- 2). Definisi viskositas turbulen dimodifikasi untuk menghitung *transport* dari tegangan geser turbulen.
- 3). Konstanta model berbeda dengan model *k-omega standard*.

Adapun persamaan dari model *k-omega SST* adalah :

- a. *Kinematic Eddy viscosity* :

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (2.21)$$

- b. Energi kinetik :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.22)$$

- c. Laju disipasi :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.23)$$

dimana konstantanya adalah :

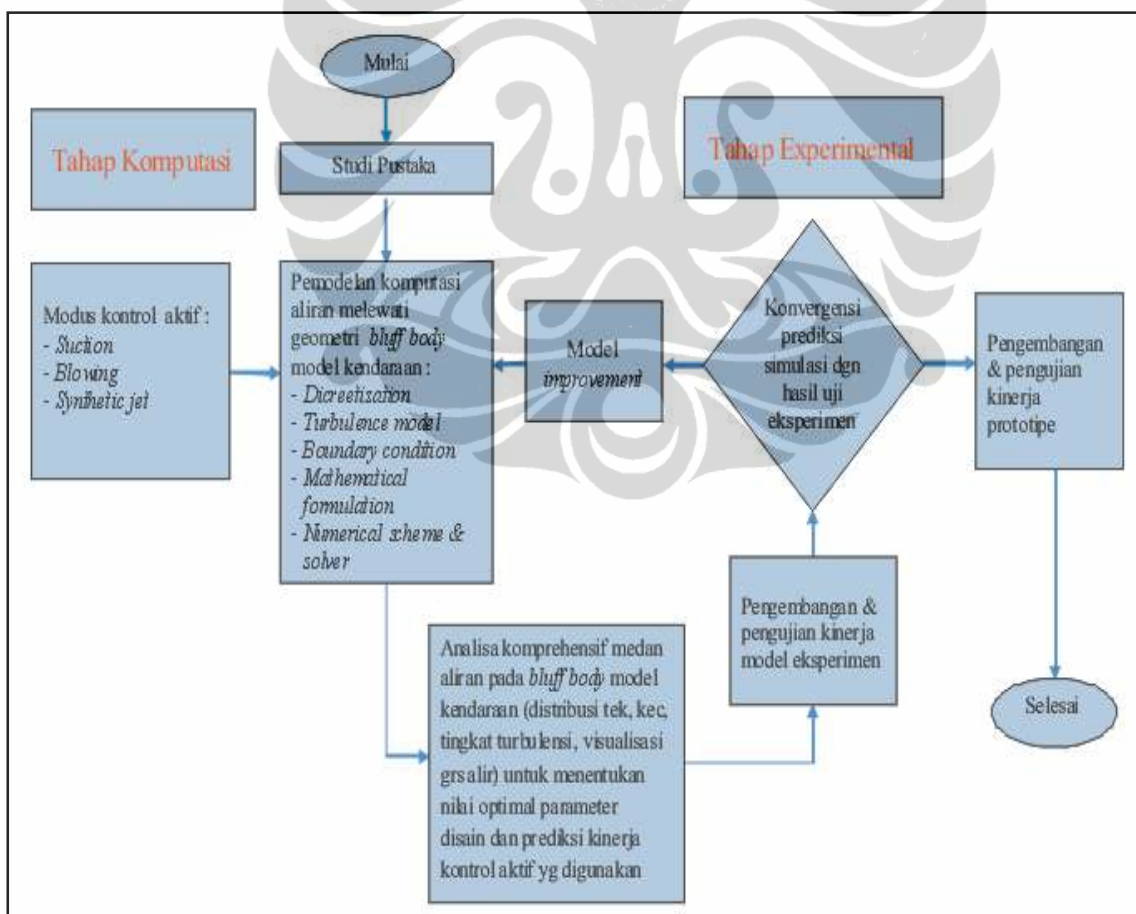
$$\begin{aligned} \sigma_{k,1} &= 1.176, \sigma_{\omega,1} = 2.0, \sigma_{k,2} = 1.0, \sigma_{\omega,2} = 1.168 \\ \alpha_1 &= 0.31, \beta_{i,1} = 0.075, \beta_{i,2} = 0.0828 \end{aligned}$$

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian komprehensif dengan komputasional dan eksperimental yang akan dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Untuk mendapatkan hasil-hasil yang *valid* dan *reliable* digunakan teknik simulasi aliran 3-D presisi tinggi serta uji laboratorium pada model eksperimental yang dilakukan pada fasilitas terowongan angin sub-sonik (*sub-sonic wind tunnel*). Untuk itu, penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan dengan aspek metodologi seperti yang akan diuraikan mengikuti diagram alir berikut pada Gb. 3.1



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Setelah tahap persiapan penelitian berupa pengumpulan informasi dan studi literatur untuk mendapatkan *state of the art* penelitian di bidang kontrol separasi aliran turbulen terutama di bidang aerodinamika kendaraan, penelitian akan masuk ke tahap pelaksanaan yang dibagi atas dua tahap.

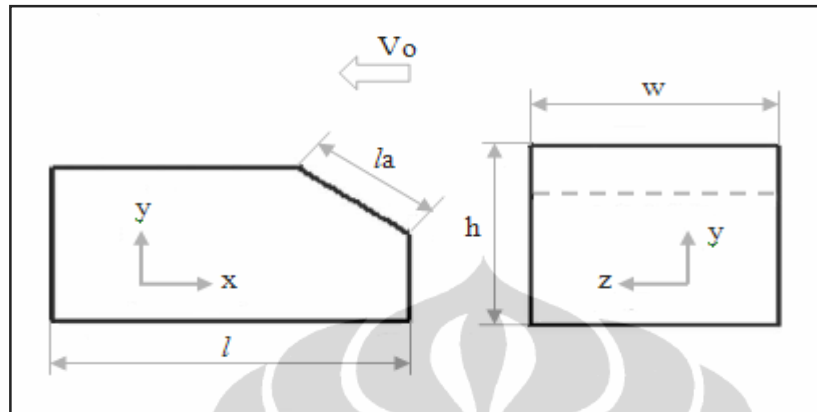
Pada tahap pertama penelitian berfokus pada upaya memantapkan pemahaman fundamental mengenai potensi terjadinya pengurangan hambatan aerodinamika akibat modifikasi zona resirkulasi (*recirculation zone*), lapisan geser (*shear layer*) dan lapisan batas berkembang kembali (*redeveloping boundary layer*) yang terbentuk dengan penempatan sistem kontrol aktif separasi aliran berupa teknik tiupan (*blowing*), hisapan (*suction*) dan jet sintetik (*synthetic jet*) dengan pendekatan komputasional. Dalam penelitian tahap pertama ini, simulasi 3D ditujukan untuk mendapatkan *tools* sehingga diperoleh suatu prediksi perubahan gradien tekanan statik yang mendukung pengurangan hambatan aerodinamika. Hasil dari investigasi komputasi dalam tahap pertama diharapkan dapat mereduksi kompleksitas kegiatan dalam mengembangkan model eksperimental yang akan diuji.

Pada tahap kedua, perolehan korelasi-korelasi dari penelitian tahap pertama menjadi bahan acuan dalam mengembangkan model eksperimen yang akan dibuat dan diuji pada tahap dua ini. Pengukuran dengan menggunakan teknik PIV (*particle image velocimetry*) dilakukan untuk memvalidasi medan aliran sekitar model uji baik tanpa kontrol aliran maupun dengan kontrol aliran yang diperoleh dari hasil komputasi. Pengukuran gaya *drag* dilakukan dengan menggunakan *load cell* untuk memvalidasi pengurangan *drag* yang diperoleh dari hasil komputasi.

3.2 Model Uji

Baik pada tahap komputasi/simulasi CFD maupun tahap uji eksperimental, model *bluff body* dari kendaraan keluarga (***family fan***) yang disederhanakan yang akan ditingkatkan kinerjanya dengan menggunakan kontrol aktif separasi aliran mempunyai disain dasar berupa *reversed Ahmed body* seperti yang ditunjukkan pada Gb.3.2. Geometri van model yang merupakan tipe *reversed Ahmed body* yang digunakan pada penelitian ini mempunyai rasio geometri 0.25 dari *Ahmed body* original. Oleh karena itu, model uji mempunyai dimensi panjang (l) = 0.261 m, lebar (w) = 0.09725 m, dan tinggi (h) = 0.072 m dengan sudut pada bagian depan (ϕ) = 35° . Pemilihan model ini

dilakukan dengan mempertimbangkan kemiripannya yang sangat dekat dengan disain dasar dari berbagai bentuk *body* kendaraan keluarga yang dewasa ini diproduksi di Indonesia.



Gambar 3.2 Model disain *body* Ahmed terbalik (*reversed Ahmed body*)

3.3 Tahapan Komputasional

Pendekatan komputasi/simulasi CFD yang dilakukan ditujukan pada pengembangan *numerical prediction tools* yang sesuai dengan mempertimbangkan berbagai aspek komputasi yang diperlukan seperti yang diuraikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Aspek komputasi CFD

No	Aspek Metodologi	Uraian
1	Formulasi Masalah	- Pengembangan skema komputasi (<i>computational scheme</i>) model aliran 3D pada geometri kendaraan keluarga yang disederhanakan yang dilengkapi kontrol aktif separasi aliran
2	Model Komputasi dan Formulasi Matematika	Model komputasional : - Aliran tiga dimensi melewati <i>reverse Ahmed Body</i> dengan <i>solid wall-boundary</i> Model turbulensi : k- ϵ standard

 Formulasi Matematika :

- Solusi numerik persamaan konservasi, persamaan *transport kinetic* (k) dan laju dissipasi (ϵ) turbulen, persamaan Navier-Stokes terata-rata waktu pada kondisi aliran tak-mampat

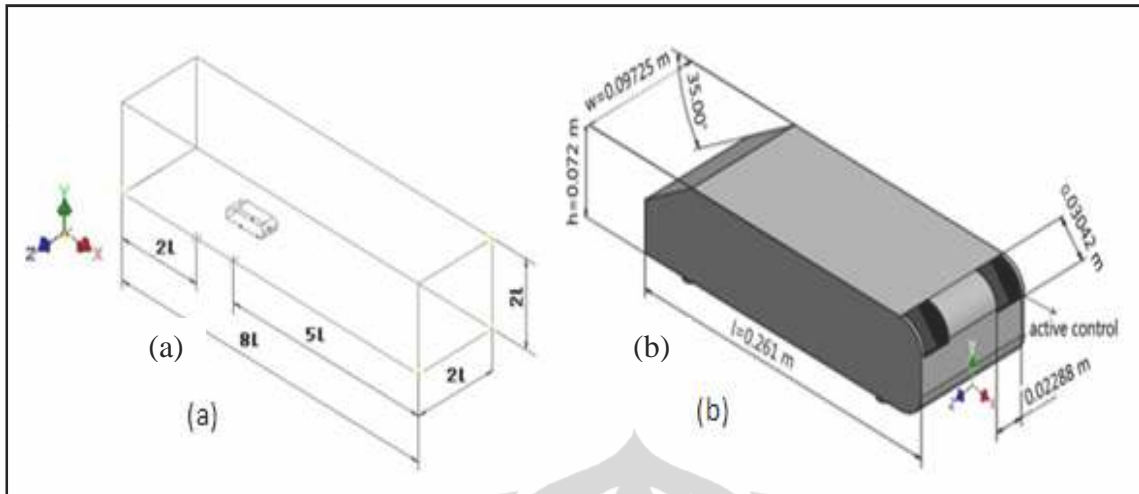
3	Prosedur Numerik dan Eksekusi	<ul style="list-style-type: none"> - Algoritma : SIMPLE, Diskritisasi : volume kontrol berdasar metode beda hingga dengan skema <i>power-law</i>, Grid : <i>non-uniform</i> - Eksekusi : simulasi tiga dimensi dengan aplikasi software CFD
4	Analisis Hasil dan Intrepetasi	<ul style="list-style-type: none"> - Komparasi, verifikasi dan validasi skema komputasi dengan data eksperimen

Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dengan menggunakan program CFD sebagai berikut :

a. Pre-processing

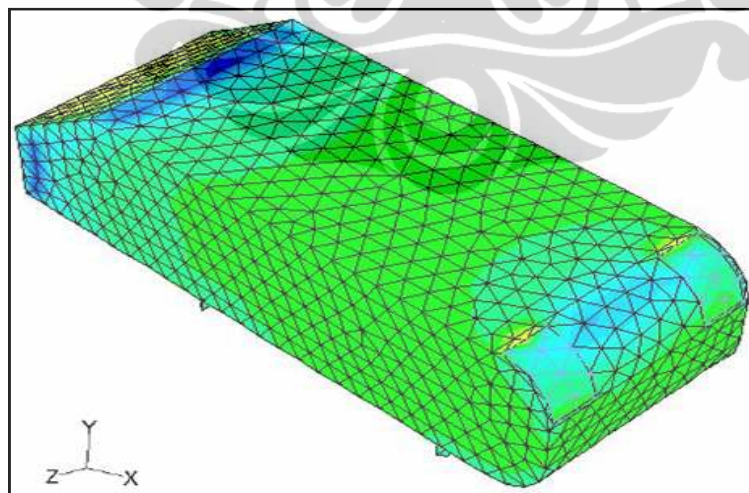
Pre-processing merupakan komponen input dari permasalahan yang akan disimulasikan ke dalam program CFD yang berupa pendefinisian geometri yang dikehendaki , komputasi domain, pembentukan *grid (meshing type)* pada setiap domain, dan penentuan kondisi batas (*boundary condition*) yang sesuai dengan keperluan.

Bentuk geometri dari *reversed Ahmed model* yang digunakan pada penelitian ini mempunyai ϕ (sudut kemiringan) 35° pada bagian depan. Gb. 3.3 memberikan penjelasan tentang komputasi domain dan geometri dari *reversed Ahmed model* yang berbentuk 3D yang digunakan pada penelitian ini. Dari Gambar 3.3, terlihat bahwa komputasi domain mempunyai panjang (L) = 8l, lebar (W) = 2l, and tinggi (H) = 2l (l = panjang model dalam arah-x).



Gambar 3.3 (a). Komputasi domain, (b). Geometri *reversed Ahmed model*

Gb. 3.4 menggambarkan tipe *meshing* yang digunakan pada masing-masing Ahmed model tanpa eksitasi dengan ϕ adalah 35° yaitu jenis elemen adalah *tet/hybrid* dengan type *hex core*, dimana jumlah mesh volume yang dihasilkan pada $\phi = 35^\circ$ adalah 1.7 juta. Pemilihan tipe *meshing* tersebut dilakukan dengan pertimbangan untuk mendapatkan hasil yang akurat, dimana model komputasional domain berbentuk 3D dengan pembagian diskritisasi yang menyeluruh diharapkan dapat menghasilkan hasil yang akurat.



Gambar 3.4 Type *meshing* pada *reversed Ahmed model* dengan $\phi = 35^\circ$

Adapun kondisi batas yang digunakan adalah kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, dimana pemilihan kecepatan tersebut didasarkan pada

asumsi-asumsi medan aliran yang dikaji adalah aliran tak mampu mampat (*incompressible flow*). Medan aliran bebas jauh di hulu (*mean free stream at far upstream region*), kendaraan juga diasumsikan dalam keadaan tunak (*steady state condition*) yang mengalir secara seragam. Bilangan Reynolds yang bersesuaian berdasarkan panjang model uji dan kecepatan *upstream* adalah 1.99×10^5 , 2.48×10^5 , 2.98×10^5 . Tekanan keluar yaitu -10 pa, -15.8 pa dan -20 pa dan fluida yang digunakan adalah udara dengan kerapatan 1.225 kg/m^3 dan viskositas $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$. Kecepatan *suction* dan *blowing* diset pada 0.5 m/s, 1.0 m/s dan 1.5 m/s. Sementara itu, untuk *synthetic jet* diset pada kecepatan 2 m/s. Detail kondisi komputasi diberikan pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3

Tabel 3.2 Kondisi komputasi untuk *suction* dan *blowing*

Kondisi komputasi		
Van model	3D, Steady state	
Fluida	Udara	
Sifat-sifat fluida	Kerapatan	1.225 kg/m^3
	Viskositas	$0.000017894 \text{ kg/m-s}$
Kondisi batas tanpa kontrol aliran	Van model	Dinding
	Tekanan keluar	Tekanan keluar
	Kecepatan masuk	Kecepatan masuk
	Dinding	Dinding
Kondisi batas dengan <i>suction/blowing</i>	Van model	Dinding
	Tekanan keluar	Tekanan keluar
	Kecepatan masuk	Kecepatan masuk
	Dinding	Dinding
	<i>Suction1/blowing1</i>	Kecepatan masuk
<i>Suction2/blowing2</i>	Kecepatan masuk	
Kecepatan <i>suction/blowing</i>	0.5 m/s , 1.0 m/s, dan 1.5 m/s	

Untuk menggambarkan eksitasi yang dihasilkan oleh *synthetic jet* pada *fluent*, pada *user definite function (UDF)* didefinisikan persamaan sesuai dengan persamaan (2.8). U_{maks} didapatkan dengan mengukur kecepatan rata-rata ($U_{rata-rata}$) eksitasi dari *synthetic jet* menggunakan sensor *hot-wire* pada nosel *synthetic jet* sebesar 2 m/s. Dengan menggunakan persamaan (2.9), diperoleh U_{maks} sebesar 2.8 m/s. Untuk menentukan frekuensi dari *synthetic jet*, dilakukan pengukuran sinyal elektrik yang

mengalir ke *synthetic jet* menggunakan *ocilloscope* dan didapatkan frekuensi sebesar 96 Hz. Dengan demikian, maka *UDF* dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$U(t) = 2.8 \cos (602*t) \quad (3.1)$$

Tabel 3.3 Kondisi komputasi untuk *synthetic jet*

Kondisi komputasi	
Van model	3D, Unsteady state
Fluida	Udara
Sifat-sifat fluida	Kerapatan 1.225 kg/m ³ Viskositas 0.000017894 kg/m-s
Kondisi batas tanpa kontrol aliran	Van model Dinding Tekanan keluar Tekanan keluar Kecepatan masuk Kecepatan masuk Dinding Dinding
Kondisi batas dengan <i>synthetic jet</i>	Van model Dinding Tekanan keluar Tekanan keluar Kecepatan masuk Kecepatan masuk Dinding Dinding Frekuensi 96 Hz <i>Synthetic jet 1 & 2</i> UDF
Kecepatan <i>synthetic jet</i>	2 m/s

b. Solver

Proses pemecahan persamaan-persamaan pengatur dalam kajian komputasi ini menggunakan pendekatan metode volume hingga (*finite volume*) dengan bantuan sebuah *solver* perangkat lunak komersial (*Fluent 6.3*). Secara ringkas proses ini memiliki tahapan-tahapan yaitu aproksimasi aliran yang tidak diketahui dilakukan dengan menggunakan fungsi sederhana, diskritisasi dengan mensubstitusi hasil aproksimasi kedalam persamaan aliran disertai dengan manipulasi matematik, dan penyelesaian persamaan aljabar. Pada proses ini dicari solusi numerik terhadap persamaan-persamaan atur yang meliputi persamaan kekekalan massa dan momentum.

c. Model Matematika

Dengan pertimbangan kompleksnya medan aliran yang diteliti, penelitian ini menggunakan model turbulensi aliran yang cukup luas penggunaannya dalam kajian dinamika fluida yaitu model *k-epsilon*. Model ini pada awalnya dikembangkan oleh Launder & Spalding. Pemodelan turbulensi dengan model ini memberikan keuntungan berupa efisiensi sumber daya komputasi, kestabilan perhitungan numerikal dan akurasi solusi yang dihasilkan.

d. Post-Processing

Untuk menganalisis lebih lanjut karakteristik medan aliran yang terbentuk, hasil yang diperoleh dari perhitungan secara komputasi kemudian ditampilkan dalam bentuk-bentuk *path line* dan grafik dari kecepatan, tekanan statik, intensitas turbulen dan gaya drag.

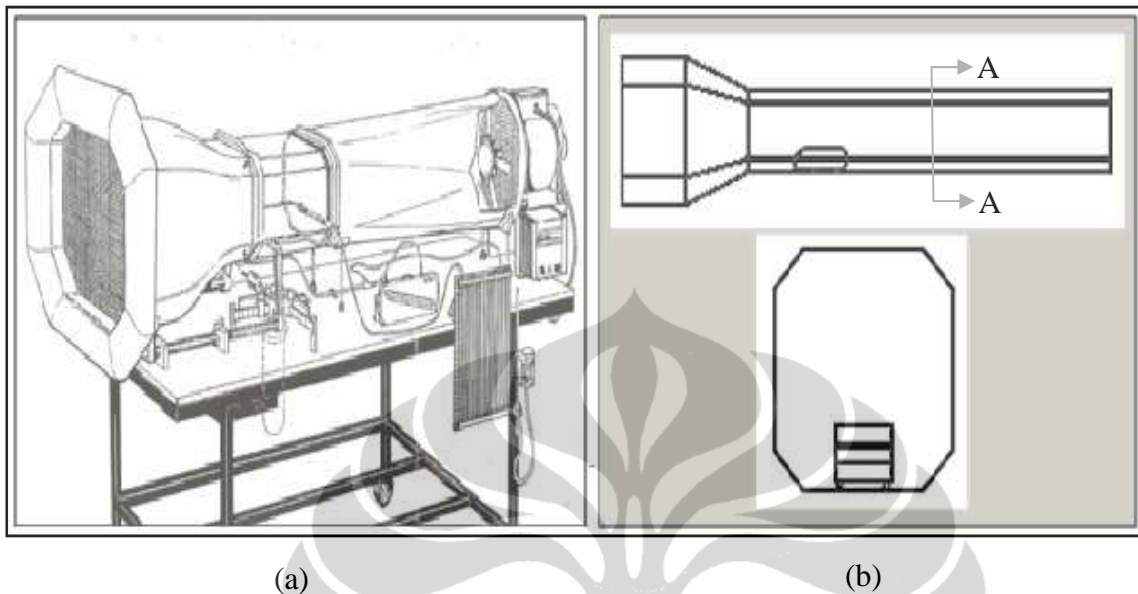
Hasil dari simulasi diharapkan dapat menjadi dasar analisis komprehensif medan aliran meliputi distribusi-distribusi tekanan, kecepatan, tingkat turbulensi dan visualisasi garis alir. Data dan informasi ini sangat diperlukan untuk menentukan nilai optimal parameter desain dan prediksi kinerja kontrol aktif yang dikembangkan. Validasi dan peningkatan model komputasi nantinya akan dilakukan setelah model eksperimen yang dikembangkan diuji dalam mencari kondisi desain optimum yang konvergen antara hasil simulasi komputasi dan eksperimen.

3.4 Tahapan Eksperimental

3.4.1 Terowongan Angin (*Wind Tunnel*)

Eksperimen yang akan dilakukan adalah uji model eksperimen di terowongan angin kecepatan rendah (*low speed wind tunnel*) yang terkontrol seperti yang tampak pada Gb. 3.5. Model uji dilengkapi dengan sistem kontrol aktif separasi turbulen yang diteliti berupa hisapan (*suction*), tiupan (*blowing*) dan jet sintetik (*synthetic jet*). Untuk masing-masing metode kontrol aktif akan dibuat sebuah model uji agar instalasi sistem peralatan kontrol aktif (*control active device*) dapat dilakukan dengan lebih mudah. Peralatan kontrol aktif ini ditanamkan pada body model yang penempatannya dilakukan

pada daerah-daerah separasi aliran yang potensial menimbulkan hambatan drag yang besar berdasarkan hasil kajian komputasional yang telah diperoleh sebelumnya.



Gambar 3.5 (a). Terowongan angin kecepatan rendah ; (b). Penempatan model uji

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 difuser 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.

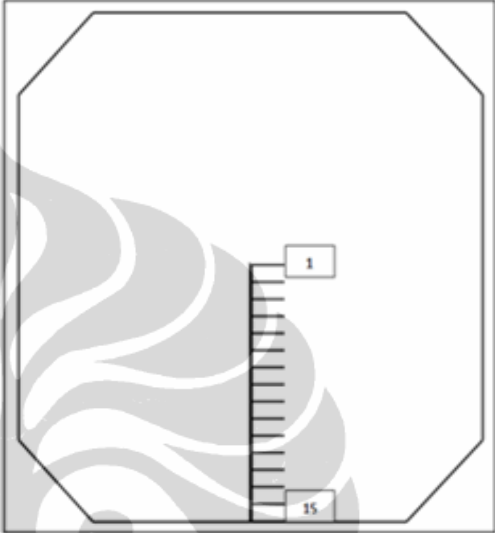
Untuk memastikan bahwa aliran pada terowongan angin berada dalam keadaan *steady* pada *free stream* maka dilakukan pengukuran terhadap nilai intensitas turbulensinya terlebih dahulu. Untuk mengukur intensitas turbulensi aliran pada seksi uji, dilakukan pengukuran kecepatan sepanjang garis tengah seksi uji dengan interval jarak 1 cm dan 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 rata-rata 0.55% (Tabel 3.4) dan menunjukkan bahwa terowongan angin memiliki aliran yang *steady* pada keadaan *free stream*.

Selain mengukur intensitas turbulensi pada keadaan *free stream*, kecepatan aliran pada seksi terowongan angin juga dikalibrasi dan disesuaikan dengan putaran

blower axial yang dikontrol dalam suatu unit panel (Gb. 3.6). Untuk mengukur kecepatan aliran digunakan instrumen *hot wire* (Gb. 3.7).

Tabel 3.4 Nilai intensitas turbulensi pada *free stream* dengan kecepatan *upstream*, U_0 16.7 m/s sepanjang garis tengah pada seksi uji terowongan angin subsonic

No	Posisi dari dasar (cm)	Intensitas turbulensi (%)
1	14.5	0.28
2	13.5	0.53
3	12.5	0.39
4	11.5	1.12
5	10.5	0.43
6	9.5	0.32
7	8.5	0.28
8	7.5	1.07
9	6.5	0.40
10	5.5	0.48
11	4.5	0.63
12	3.5	0.35
13	2.5	0.37
14	1.5	0.59
15	0.5	0.97




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

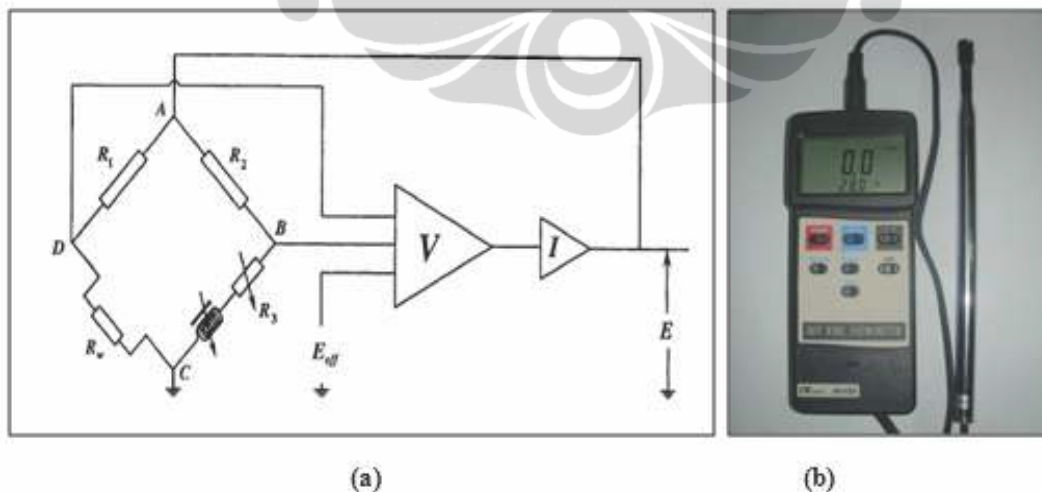
Prinsip pengukuran kecepatan aliran fluida pada *hot wire* berdasarkan prinsip bahwa perpindahan panas pada suatu bahan bergantung pada kecepatan aliran fluida yang mengalir di sekitar benda. *Hot wire* yang digunakan adalah produk dari Lutron dengan jenis *constant temperature anemometry* (CTA), dimana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



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

Spesifikasi dari *hot wire* (Gb. 3.8) 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



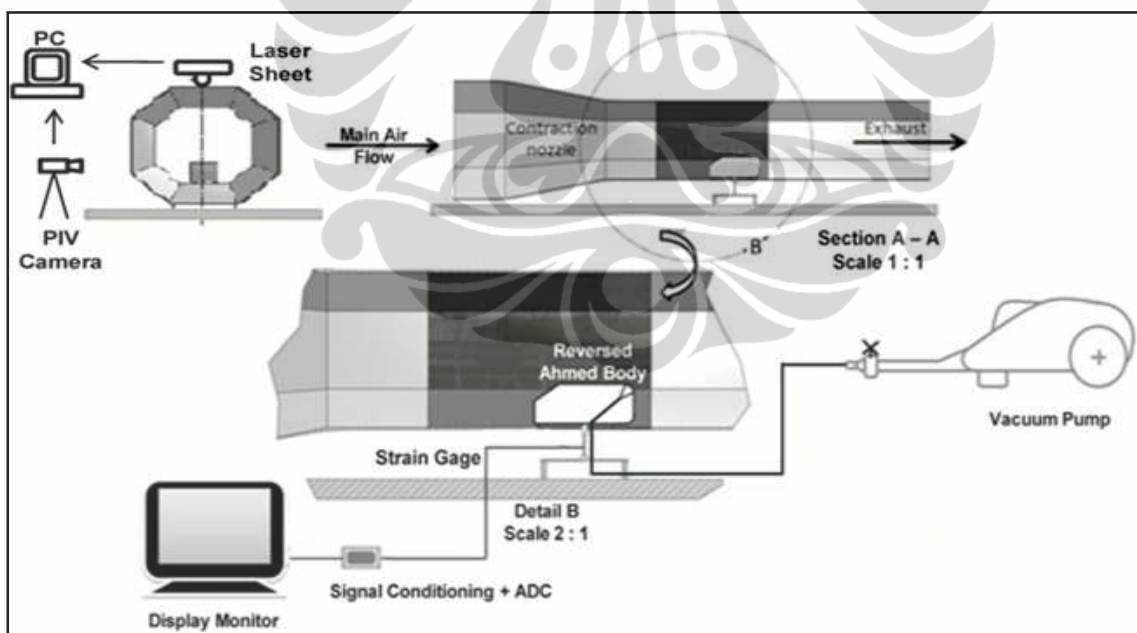
Gambar 3.8 (a). Skema elektrikal dari model *hot wire* tipe CTA ;
(b). *hot wire* AM-4204)

3.4.2 Peralatan Kontrol Aktif Aliran

Pada penelitian ini digunakan 3 (tiga) peralatan kontrol aktif aliran yang ditempatkan pada bagian belakang dari model uji berdasarkan hasil komputasi yang telah dilakukan. Adapun peralatan kontrol aktif aliran tersebut adalah hisapan (*suction*), tiupan (*blowing*) dan jet sintetis (*synthetic jet*).

Untuk sistem hisapan (*suction*), mekanisme penggerak menggunakan *vacuum pump* dengan daya hisapan maksimal terukur pada model uji adalah 1.5 m/s dengan menggunakan *hot wire*. Eksperimen setup diperlihatkan pada Gb. 3.9. Pada pendekatan eksperimen, kecepatan *suction* yang digunakan sama dengan yang dipakai pada pendekatan komputasi. Perbandingan kecepatan *suction* terhadap kecepatan *upstream* adalah :

- 1). Untuk kecepatan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s yaitu 0.05, 0.04 dan 0.03
- 2). Untuk kecepatan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s yaitu 0.09, 0.07 dan 0.06
- 3). Untuk kecepatan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s yaitu 0.14, 0.11 dan 0.09

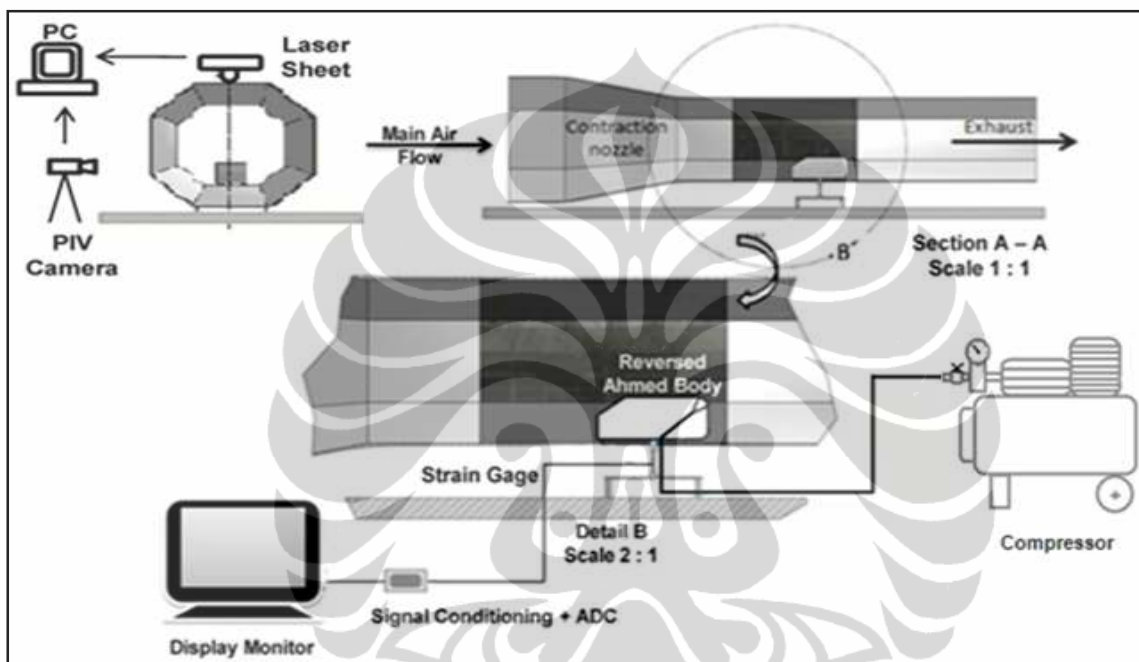


Gambar 3.9 Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif *suction*

Untuk sistem tiupan (*blowing*), mekanisme penggerak menggunakan kompresor dengan daya tiupan maksimal terukur pada model uji adalah 1.8 m/s dengan menggunakan *hot wire*. Eksperimen setup diperlihatkan pada Gb.3.10. Pada pendekatan

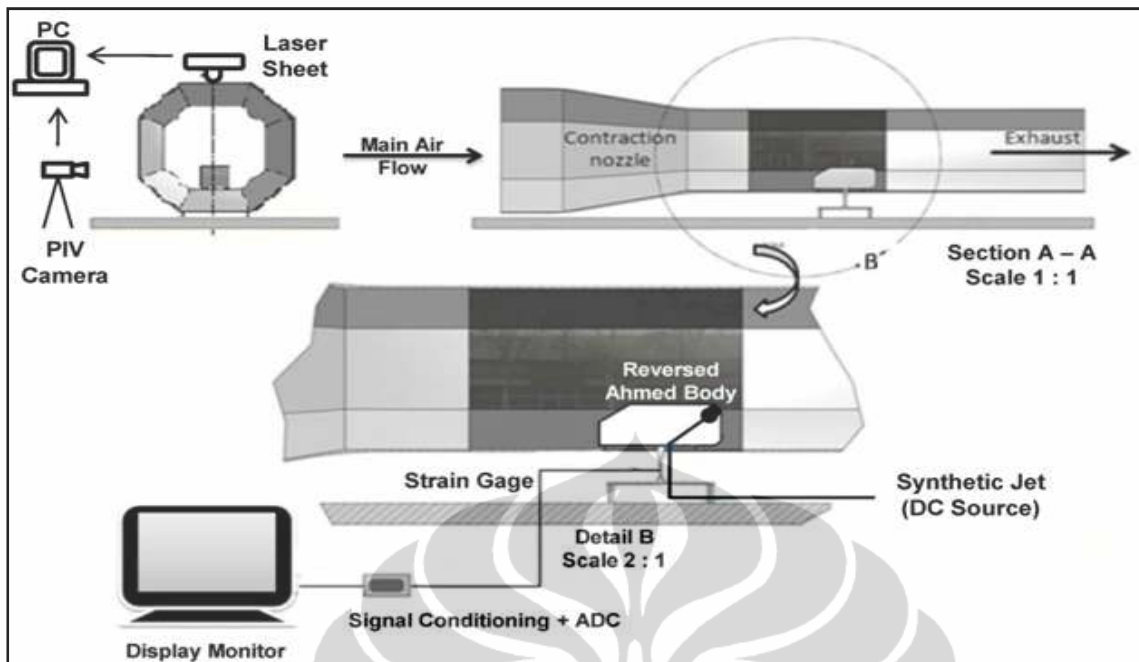
eksperimen, digunakan kecepatan *blowing* sama dengan yang dipakai pada pendekatan komputasi. Adapun perbandingan kecepatan *blowing* terhadap kecepatan *upstream* adalah :

- 1). Untuk kecepatan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s yaitu 0.05, 0.04 dan 0.03
- 2). Untuk kecepatan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s yaitu 0.09, 0.07 dan 0.06
- 3). Untuk kecepatan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s yaitu 0.14, 0.11 dan 0.09.



Gambar 3.10 Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif *blowing*

Untuk sistem *synthetic jet*, akan digunakan modul-modul aktuator *synthetic jet* yang digerakkan oleh sebuah *piezoelectric diaphragms* yang terbuat dari bahan dasar *lead zirconium titanate* (PZT). Aktuator ini dirancang untuk dapat bergerak dengan konsumsi energi listrik yang kecil. Pada penelitian ini, digunakan *synthetic jet* tipe *synjet xflow 30 cooler 40 watt* yang mempunyai frekuensi 96 Hz yang diukur menggunakan osiloskop dan kecepatan rata-rata yang terukur pada model uji adalah 2 m/s menggunakan *hot wire*. Eksperimen setup dan penempatan model uji dengan *synthetic jet* pada seksi uji terowongan angin seperti yang terlihat pada Gb. 3.11 dan 3.12. Kecepatan *upstream* (U_0) yang digunakan pada pendekatan eksperimental ini adalah sama dengan yang dipakai pada pendekatan komputasi yaitu 2 m/s. Perbandingan kecepatan *synthetic jet* terhadap kecepatan *upstream* yaitu 0.18, 0.14 dan 0.12.



Gambar 3.11 Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif *synthetic jet*



Gambar 3.12 Penempatan model uji dengan *synthetic jet* pada seksi uji terowongan angin

Adapun spesifikasi dari *synthetic jet* yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

- Model : Synjet ® XFlow 30 Cooler 40W
- Elektrikal:
 - VDC : +/- 5 VDC
 - I_{min} : 20 mA
 - I_{avg} : 200 mA

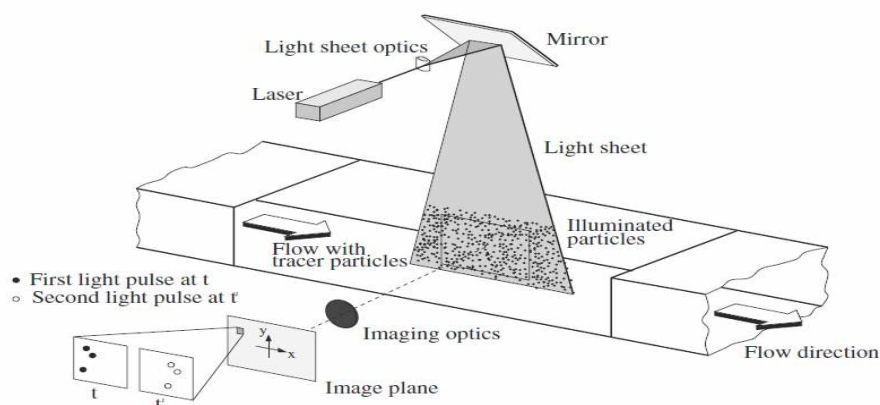
- Ipeak : 400 mA
- Pavg : 1.0 mW
- Lingkungan:
 - Operating temp. : min -40°C/ max 85°C
 - Storage temp. : min -40°C/ max 85°C
 - Storage altitude : 15000 m DPL
 - Operating Rh : 5-95 % (non-condensing)
 - Berat : 135 g

3.4.3 PIV (*Particle Image Velocimetry*)

PIV (*particle image velocimetry*) adalah metode optik untuk mendapatkan informasi vektor kecepatan aliran dengan menggunakan prinsip perpindahan partikel terhadap waktu yang sebelumnya sengaja ditambahkan pada aliran.

$$\text{kecepatan[m/s]} = \frac{\text{jarak[m]}}{\text{waktu[t]}} \quad (3.1)$$

Aliran yang telah ditambahkan, *seeding particle* akan disinari dengan laser untuk mendapatkan efek *freezing* (berhenti sesaat), 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 (antar *frame* jika menggunakan *cross correlation*) maka didapatkan informasi kecepatan. Gb. 3.13 memperlihatkan sistem PIV dalam *wind tunnel*.



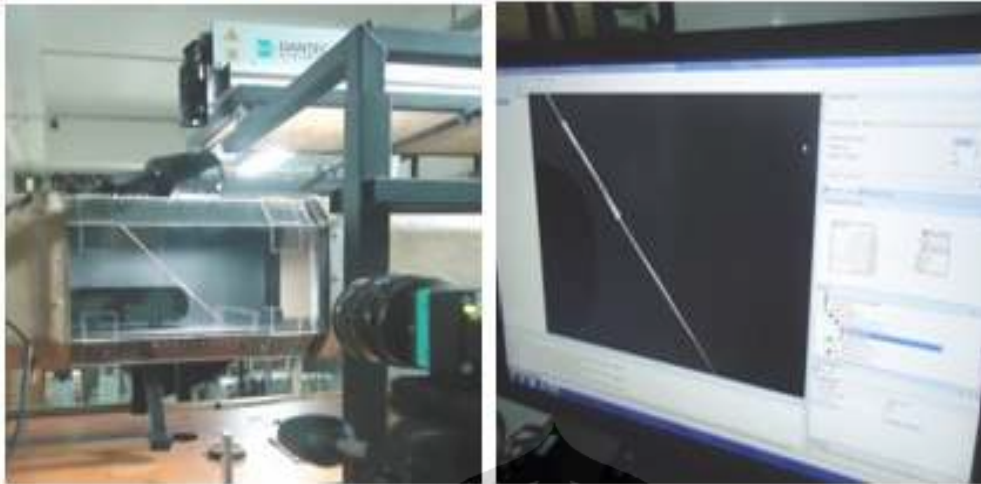
Gambar 3.13 Sistem PIV dalam *wind tunnel* (Raffel M. et.al., 2007)

Pengukuran dilakukan menggunakan sistem PIV Dantec yang terdiri dari sebuah *dual-head Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium aluminium garnet, $Nd:Y_3Al_5O_{12}$) laser*, sebuah CCD kamera dengan resolusi tinggi, sebuah *synchronizer* dan optik. *Nd:YAG laser* yang digunakan memiliki kemampuan *output energi* hingga 200 mJ dan keluaran panjang gelombang laser sebesar 532 nm per-pulse. CCD kamera memiliki resolusi *spatial* 1600 x 1200 pixel dengan maksimum *frame rate* 35 frame per detik dan dilengkapi oleh lensa dengan *focal length* sebesar 50 mm. *Nd: YAG laser* dan CCD kamera yang disinkronisasi menggunakan *Prosesor Dantec DynamicStudio v3.20*. Bidang pengukuran diterangi oleh lembar laser yang dihasilkan dari *Nd: YAG laser* sistem. Interval waktu antara pulsa adalah 100 μ s. Ketebalan lembar laser adalah sekitar 2 mm. Pada penelitian ini, jumlah *image* (N) yang ditangkap CCD kamera adalah 200 buah.



Gambar 3.14 Photo eksperimen setup menggunakan teknik PIV

Kalibrasi gambar dilakukan sebelum pengambilan data gambar dengan PIV. Tujuan dari kalibrasi adalah untuk mendapatkan faktor skala perbandingan antara satuan milimeter pada model uji terhadap satuan pixel gambar yang ditangkap oleh kamera. Kalibrasi dilakukan dengan mengambil gambar model uji 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 50 mm yang merupakan input untuk *absolute distance* pada fitur kalibrasi di dalam *software* PIV, sehingga didapatkan faktor skala milimeter terhadap *pixel*. Kalibrasi model uji diperlihatkan pada Gb. 3.15.



Gambar 3.15 Kalibrasi model uji

Perhitungan vektor kecepatan dilakukan dengan menggunakan teknik *adaptive correlation*. *Adaptive correlation* adalah teknik dalam mengkalkulasi vektor kecepatan dengan *initial interrogation area* (IA) sebesar N kali *final interrogation area* dan menggunakan hasil sementara sebagai informasi untuk *interrogation area* selanjutnya yang memiliki luas lebih kecil, dilakukan secara berulang sampai diperoleh *final interrogation area*.

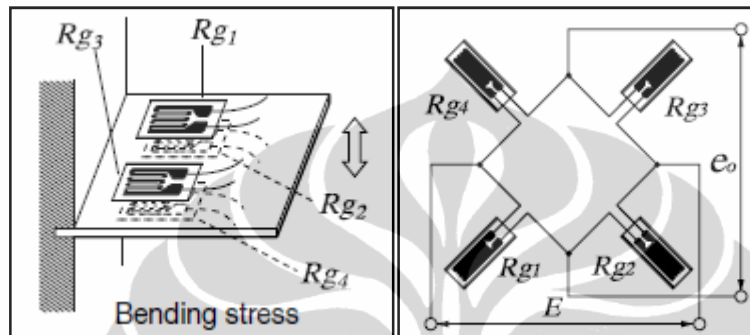
Dalam perhitungan vektor kecepatan menggunakan teknik *adaptive correlation* terkadang didapatkan vektor-vektor yang tidak sesuai, hal ini disebabkan oleh berbagai faktor, seperti: besar *seeding particle*, distribusi partikel yang tidak merata, *interrogation window area*, *noise optik* dan sebagainya. Untuk mendapatkan hasil yang baik, dalam penelitian ini digunakan model *reversed Ahmed body* dengan warna hitam pada seluruh bagiannya, hal ini untuk mengurangi *optik noise* yang terjadi akibat pantulan dari model *reversed Ahmed body* sendiri. Pada penelitian ini, ditetapkan dimensi *initial interrogation area* sebesar 256 x 256, dan *final interrogation area* sebesar 64 x 64 pixel dengan 50% *overlap* yang akan menghasilkan 1392 vektor kecepatan yang tersebar di seluruh area pandang.

Untuk menentukan vektor kecepatan rata-rata, dilakukan perhitungan menggunakan 200 vektor sesaat hasil dari N=200 gambar PIV yang diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$v_{rms} \equiv \langle v \rangle_{rms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [v_n(x, y) - \langle v(x, y) \rangle]^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

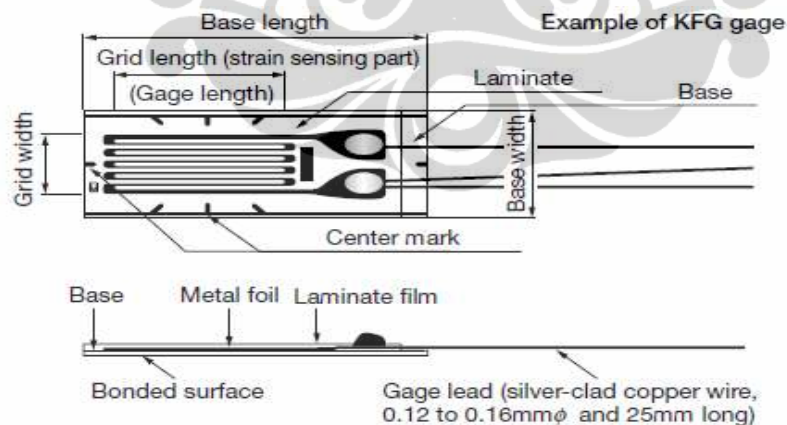
3.4.4 Strain Gage

Pada uji terowongan angin, parameter yang akan dikaji adalah gaya-gaya aerodinamika yang diambil dengan menggunakan *strain gage* yang ditempatkan pada sebuah plat dengan membentuk konfigurasi sistem 4 *gage* aktif. *Strain gage* yang berjumlah 4 buah yang kemudian dirangkai menjadi sebuah jembatan *wheatstone* penuh, seperti yang tampak pada Gb. 3.16.



Gambar 3.16 Konfigurasi 4 *gage* aktif untuk pengukuran bending

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 Gb. 3.17.



Gambar 3.17 Struktur pembentukan *strain gage* (*Strain Gage Bonding Manual*, Kyowa)

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

yang diukur dan kondisi operasi termasuk suhu. *Strain* menginisiasikan perubahan hambatan dengan sangat kecil. Oleh karena itu, untuk pengukuran *strain*, sebuah jembatan *Wheatstone* digunakan untuk mengkonversi perubahan hambatan menjadi perubahan tegangan.

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

Type : N11-FA-5-350-11
 Gauge length (mm) : 5
 Temp. Comp. : steel / 11 ppm/°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*, seperti yang terlihat pada Gb. 3.18 dengan spesifikasi sebagai 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 °C ; $\leq 90\%$ RH



Gambar 3.18 Monitor dan pengkondisian sinyal tipe A12 (*Excellent Scale*)

Alat ukur seperti yang tampak pada Gb. 3.18 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) Memposisikan *strain gage* pada *marking* yang telah dibuat.
- 5) Memberikan lem pada bagian bawah *strain gage* dan permukaan benda uji.
- 6) Menempelkan *strain gage* ke benda uji 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.

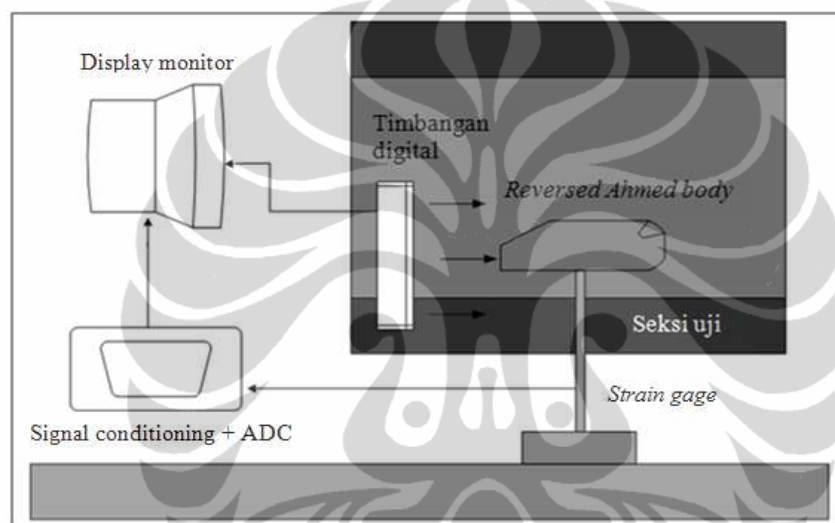


Gambar 3.19 *Strain gage* yang telah ditempelkan pada plat *stainless steell*

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 depan model *reversed Ahmed body* yang telah dipasang *load cell*. Selanjutnya timbangan akan didorong dan menyentuh model sehingga besar gaya dorong tersebut akan ditampilkan dalam display timbangan. Besar gaya yang terbaca pada *display* timbangan kemudian dimasukkan ke dalam *input load* pada monitor. Sketsa kalibrasi model uji pada *load cell* ditunjukkan pada Gb. 3.20.



Gambar 3.20 Sketsa kalibrasi model uji pada *load cell*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Ukuran Grid dan Model Turbulensi

Perlu dijelaskan bahwa investigasi awal dilakukan terhadap ukuran *grid* dan model turbulensi yang akan digunakan pada pendekatan komputasional selanjutnya. Perlu ditekankan hal ini penting dilakukan terlebih dahulu sebelum ukuran *grid* dan model turbulensi yang akan digunakan pada investigasi selanjutnya adalah yang memberi hasil yang paling mendekati hasil eksperimental.

Pada kajian *grid independency* digunakan 4 ukuran *grid* yaitu *mesh A* = 8, *mesh B* = 9, *mesh C* = 10 dan *mesh D* = 11. Untuk kajian model turbulensi digunakan 4 model turbulensi yaitu *k-epsilon standard*, *k-epsilon realizable*, *k-omega standard* dan *k-omega SST*. Kajian komputasi numerik yang dilakukan ini menggunakan aplikasi *Software CFD Fluent 6.3*. Kondisi batas yang digunakan adalah kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan kecepatan *blowing* 1.0 m/s.

Hasil analisa *grid independency* ditampilkan pada Tabel 4.1. Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa *mesh C* dengan ukuran *grid* 10 memberikan hasil yang paling mendekati hasil eksperimen dengan perbedaan 0.31%, sedangkan untuk *mesh A*, *mesh B* dan *mesh D* adalah masing-masing 5.06%, 5.15% dan 3.74% (tanda (-) menandakan hasil eksperimen lebih besar dari komputasi). Maka untuk kajian komputasi selanjutnya akan digunakan ukuran *grid* 10.

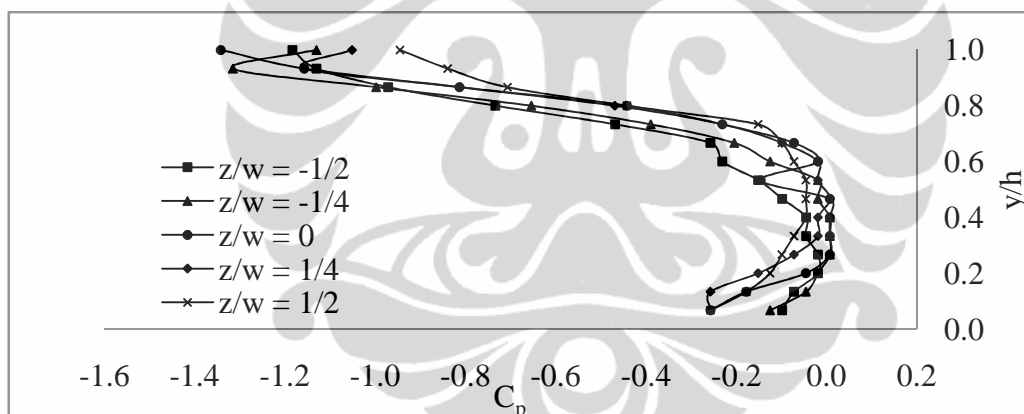
Tabel 4.1 Analisa *grid independency*.

No	Model	Cells	Faces	Nodes	Iterasi	Drag reduction (%)	Perbedaan (%)
1	<i>Mesh A (Size = 8)</i>	2,133,966	5,226,078	1,097,948	118	8.33	-5.06
2	<i>Mesh B (Size = 9)</i>	1,836,887	4,613,847	1,038,427	130	8.24	-5.15
3	<i>Mesh C (Size = 10)</i>	1,712,923	4,352,503	1,010,859	119	13.70	0.31
4	<i>Mesh D (Size = 11)</i>	623,352	1,383,597	196,560	133	9.65	-3.74
5	Eksperimen					13.39	

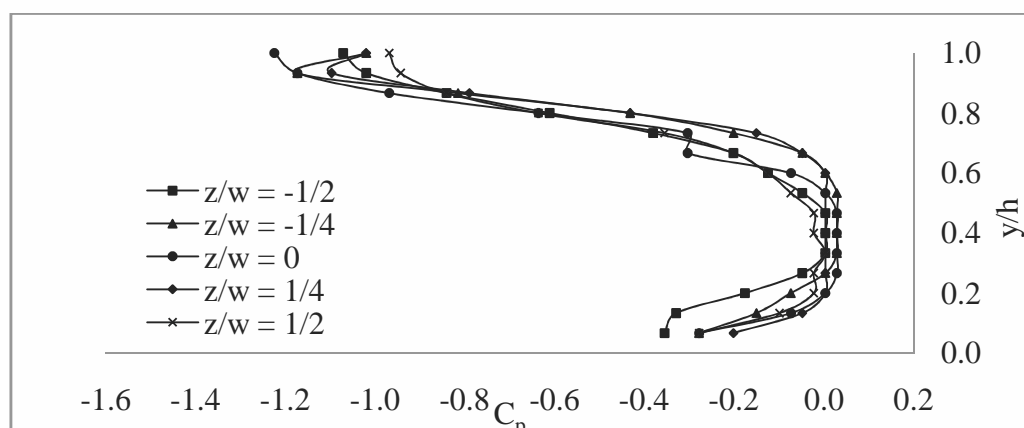
Untuk melihat pengaruh model turbulensi pada analisis komputasi kontrol aktif aliran terhadap drag aerodinamika *reversed Ahmed body*, maka pembahasan difokuskan pada distribusi tekanan, intensitas turbulensi dan pengurangan gaya drag aerodinamika. Data diambil pada kecepatan *upstream* $U_o=13.9$ m/s dengan kondisi tanpa kontrol aliran dan dengan kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan, $U_{bl}=1.0$ m/s.

4.1.1 Medan Tekanan

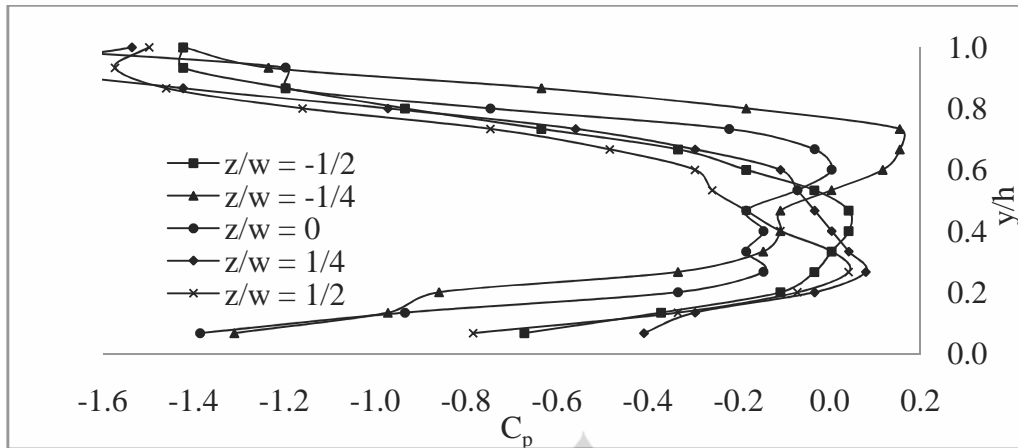
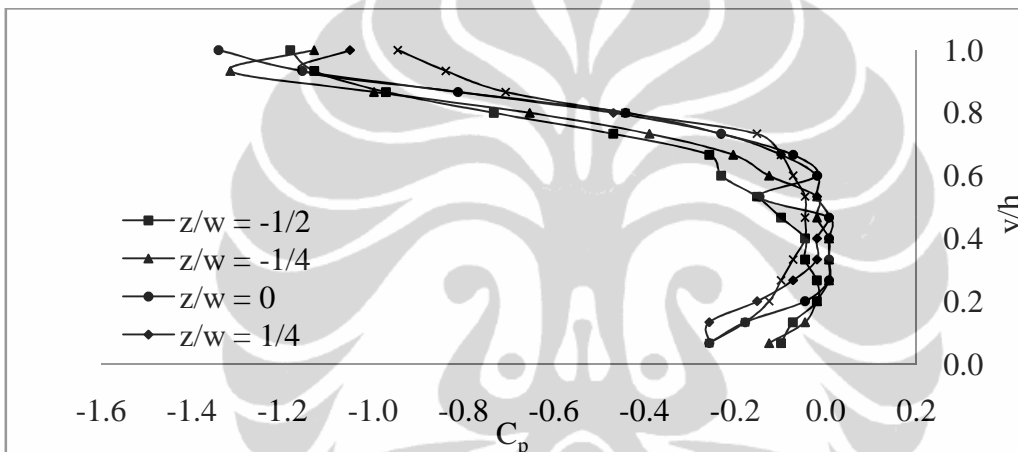
Distribusi tekanan yang ditampilkan adalah distribusi tekanan yang terjadi pada bagian belakang model *reversed Ahmed body*. Pola ditampilkan dalam bentuk grafik y/h terhadap C_p . y/h adalah perbandingan antara tinggi grid dengan tinggi model sedangkan C_p adalah koefisien tekanan. Dalam grafik juga ditampilkan garis pola distribusi tekanan dalam arah z/w , dimana z/w adalah perbandingan antara lebar grid dengan lebar model. Gb. 4.1(a-d) menunjukkan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada model *reversed Ahmed body* (*rear side*) dengan kecepatan *upstream* ($U_o=13.9$ m/s) tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model turbulensi.



(a). *k-epsilon standard*



(b). *k-epsilon realizable*

(c). *k-omega standard*(d). *k-omega SST*

Gambar 4.1 Distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran

Pada Gb. 4.1(a-d), diperoleh bahwa nilai koefisien tekanan cenderung mengalami penurunan pada $y/h=0.6$ hingga $y/h=1$ pada setiap model turbulensi, hal ini menunjukkan bahwa pada sisi atas bagian belakang model nilai koefisien tekanan bernilai minimal. Nilai minimum distribusi tekanan tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model turbulensi dinyatakan dalam Tabel 4.2.

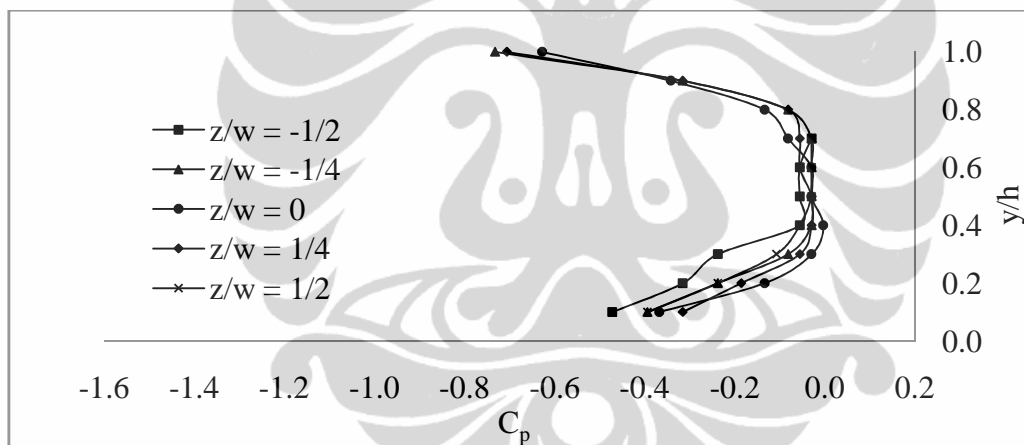
Pada setiap model turbulensi, nilai minimum koefisien tekanan terletak pada posisi $y/h=1$, posisi ini adalah tepi atas dari sisi belakang model uji. Untuk menggambarkan distribusi tekanan statik pada sisi belakang (*rear side*) model uji dengan kontrol *blowing*, maka bidang tinjauan dibagi ke dalam 9 kolom dan 10 baris sesuai dengan posisi grid yang bersesuaian. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dengan

pola grid dengan model uji tanpa kontrol aliran, sehingga pada Gb. 4.2(a-d) tampak bahwa garis grafik tidak sepadat pada Gb. 4.1(a-d).

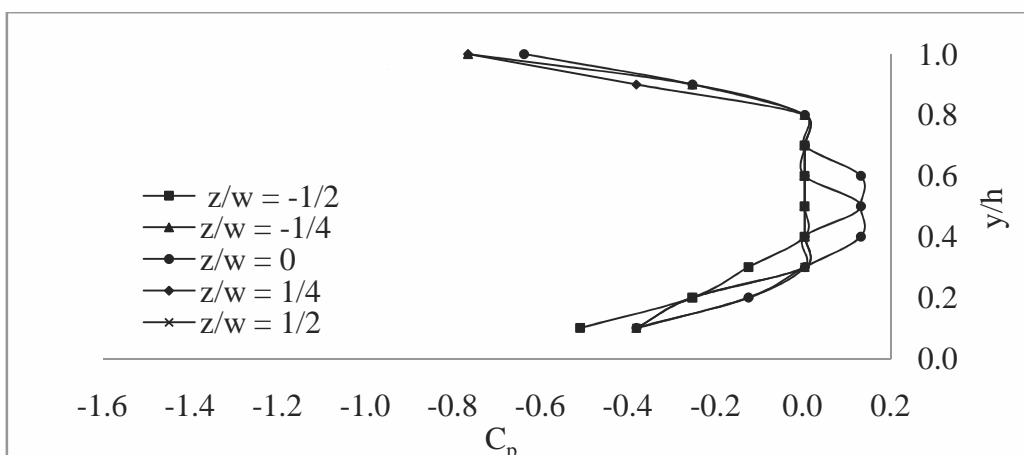
Tabel 4.2 Nilai minimum distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran

Model turbulensi	Koefisien tekanan (C_p)	y/h	z/w
<i>k-epsilon standard</i>	-1.3420	1	0
<i>k-epsilon realizable</i>	-1.2246	1	0
<i>k-omega standard</i>	-1.8362	1	0
<i>k-omega SST</i>	-1.5243	1	0

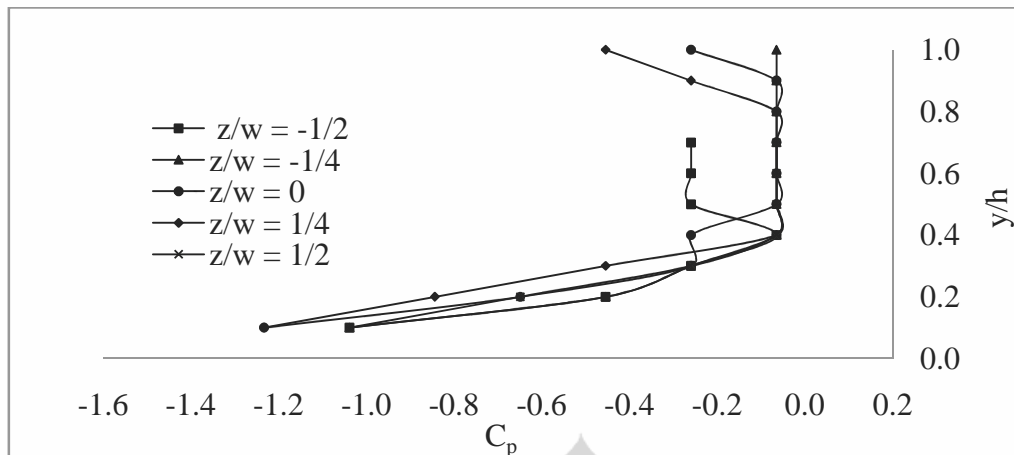
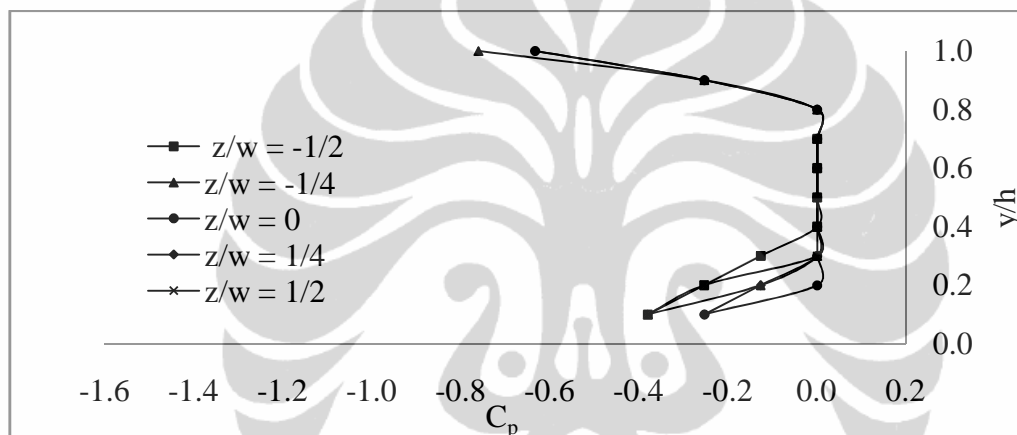
Gb. 4.2(a-d) menunjukkan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada model *reversed Ahmed body (rear side)* dengan kecepatan *upstream* ($U_o=13.9\text{m/s}$) dan kontrol *blowing* dengan kecepatan ($U_{bl}=1.0\text{m/s}$) pada setiap model turbulensi.



(a). *k-epsilon standard*



(b). *k-epsilon realizable*

(c). *k-omega standard*(d). *k-omega SST*

Gambar 4.2 Distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s)

Pada Gb. 4.2(a-d) diperlihatkan bahwa nilai koefisien tekanan cenderung mengalami kenaikan atau bergeser ke arah positif pada setiap model turbulensi. Nilai minimum distribusi koefisien tekanan dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s) pada setiap model turbulensi dinyatakan dalam Tabel 4.3.

Pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 terlihat bahwa penempatan kontrol *blowing* dengan $U_{bl}=1.0$ m/s mengakibatkan terjadinya peningkatan nilai koefisien tekanan. Peningkatan terbesar terjadi pada model turbulensi *k-omega SST* yakni sebesar 50.12%. Sedangkan peningkatan nilai koefisien tekanan untuk model turbulensi *k-epsilon standar*, *k-epsilon realizable* dan *k-omega standar* sebesar masing-masing 45.44%, 37.52% dan 32.80%. Hal ini menunjukkan bahwa *blowing* mampu mengurangi *total*

pressure loss dan meningkatkan tekanan statik di permukaan benda atau model. Hal tersebut sejalan juga dengan penelitian yang dilakukan Roumeas, et al (2009), dimana efek *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang model adalah mampu mengurangi *total pressure loss* dan meningkatkan tekanan statik pada bagian belakang *generic squareback bluff body*.

Tabel 4.3 Nilai minimum distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s)

Model turbulensi	Koefisien tekanan (C_p)	y/h	z/w
<i>k-epsilon standard</i>	-0.7322	1	-1/4
<i>k-epsilon realizable</i>	-0.7651	1	-1/4 dan 1/4
<i>k-omega standard</i>	-1.2340	0.1	0 dan 1/4
<i>k-omega SST</i>	-0.7603	1	-1/4

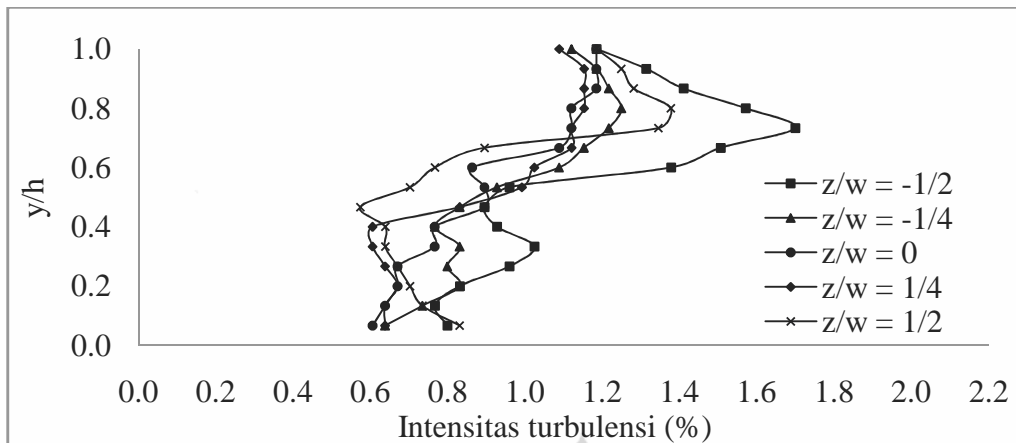
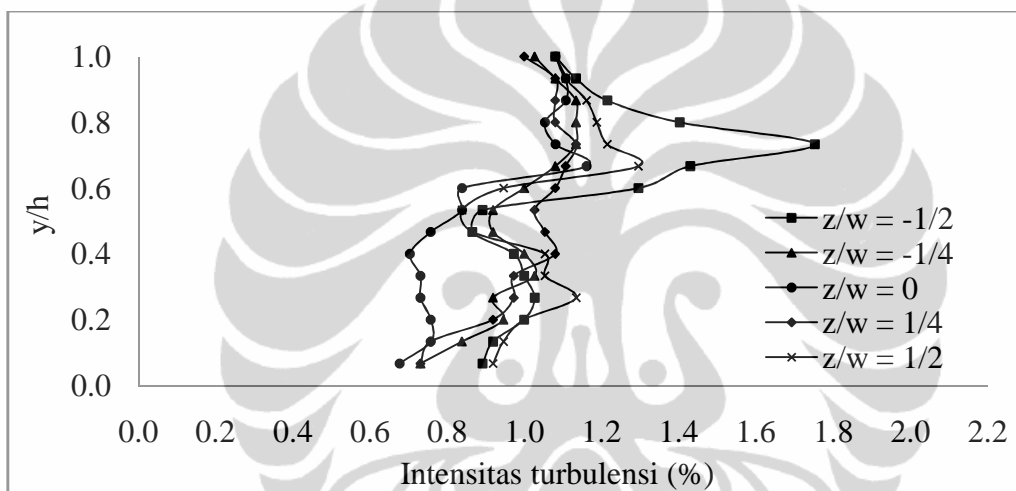
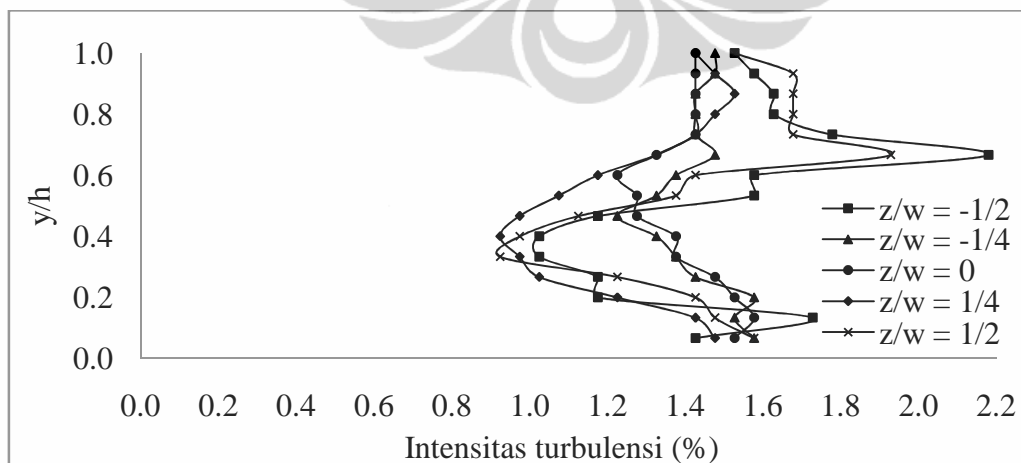
4.1.2 Intensitas Turbulensi

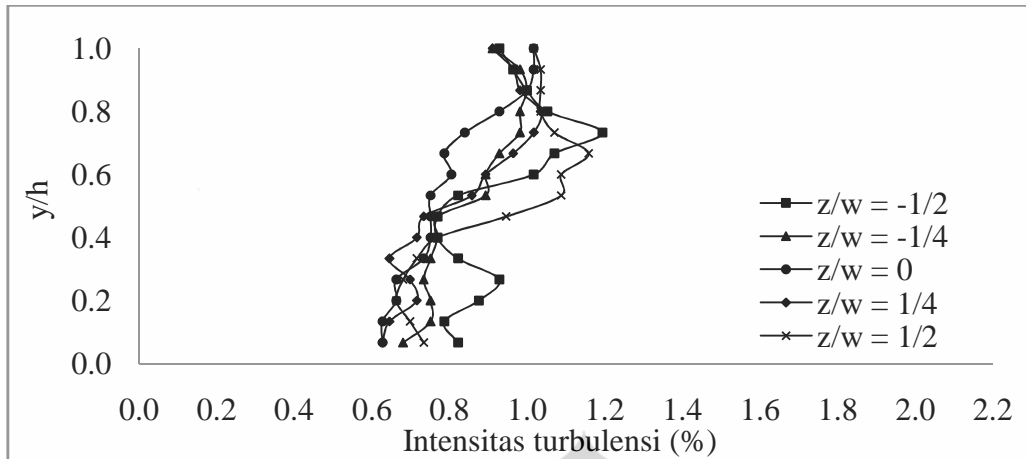
Intensitas turbulensi yang ditampilkan adalah intensitas turbulensi yang terjadi pada bagian belakang model *reversed Ahmed Body*. Pola ditampilkan dalam bentuk grafik y/h terhadap intensitas turbulensi (%). y/h adalah perbandingan antara tinggi grid dengan tinggi model. Gb. 4.3(a-d) menunjukkan intensitas turbulensi pada model uji dengan kecepatan *upstream* ($U_o=13.9$ m/s) tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model turbulensi.

Pada Gb. 4.3 diketahui bahwa nilai intensitas turbulensi maksimum berada pada $0.6 < y/h < 0.8$ dan $z/w = -1/2$ untuk setiap model turbulensi. Nilai maksimum intensitas turbulensi tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model turbulensi dinyatakan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai maksimum intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran.

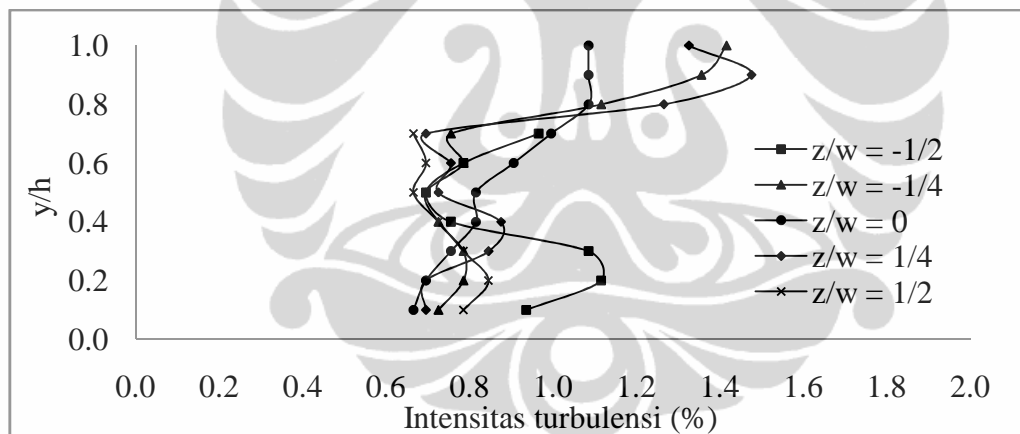
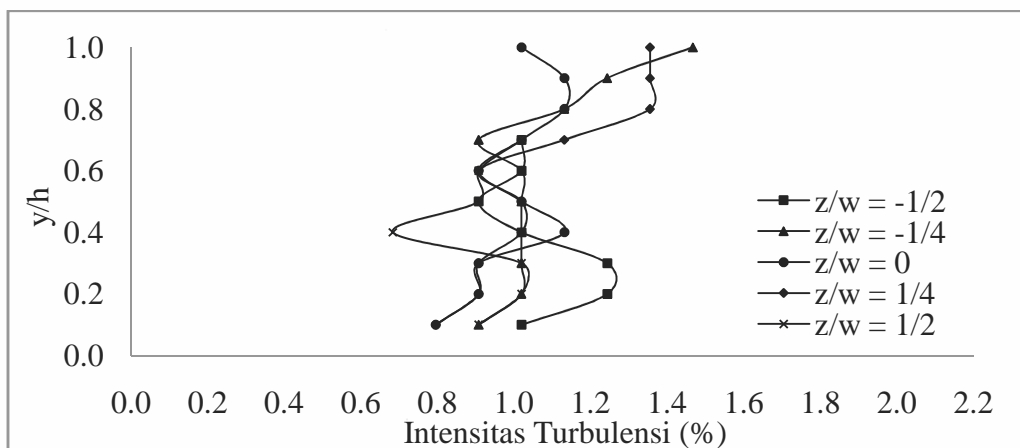
Model turbulensi	Intensitas turbulensi (%)	y/h	z/w
<i>k-epsilon standard</i>	1.70	0.73	-1/2
<i>k-epsilon realizable</i>	1.75	0.73	-1/2
<i>k-omega standard</i>	2.18	0.67	-1/2
<i>k-omega SST</i>	1.19	0.73	-1/2

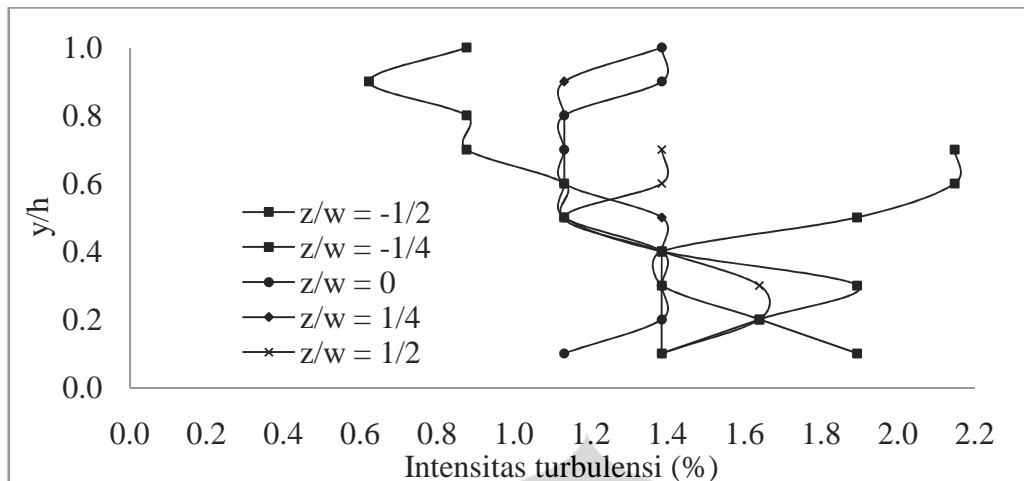
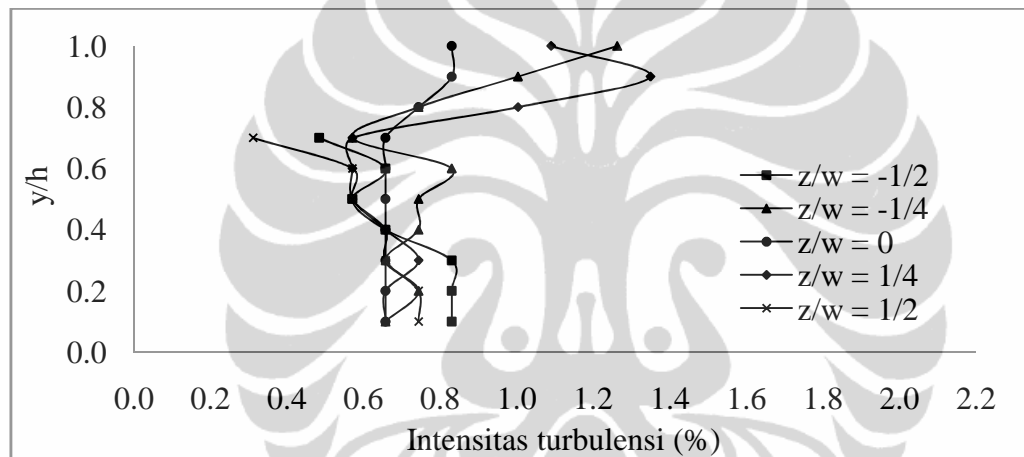
(a). *k-epsilon standard*(b). *k-epsilon realizable*(c). *k-omega Standard*

(d). *k-omega SST*

Gambar 4.3 Intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran

Gb. 4.4(a-d) menunjukkan intensitas turbulensi pada model *reversed Ahmed body (rear side)* dengan kecepatan *upstream* ($U_o=13.9$ m/s) dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s) pada setiap model turbulensi.

(a). *k-epsilon standard*(b). *k-epsilon realizable*

(c). *k-omega standard*(d). *k-omega SST*

Gambar 4.4 Intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s)

Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s) pada setiap model turbulensi dinyatakan dalam Tabel 4.5. Pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 terlihat bahwa penambahan kontrol aktif berupa *blowing* mengakibatkan terjadinya pengurangan nilai intensitas turbulensi sebesar 13.19%, 16.24% dan 1.48% pada model turbulensi *k-epsilon standard*, dan *k-epsilon realizable*. Namun pada model *k-omega SST* intensitas turbulensi maksimum naik sebesar 12.98%. Pengurangan intensitas turbulensi ini karena kontrol aliran berupa *blowing* mampu mengurangi olakan (*wake*) yang terjadi di belakang model *reversed Ahmed Body*.

Tabel.4.5 Nilai maksimum intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s)

Model turbulensi	Intensitas turbulensi (%)	y/h	z/w
<i>k-epsilon standard</i>	1.475	0.9	1/4
<i>k-epsilon realizable</i>	1.467	1	-1/4
<i>k-omega standard</i>	2.147	0.7	-1/2
<i>k-omega SST</i>	1.348	0.9	1/4

4.1.3 Drag Aerodinamika

Besarnya total gaya *drag* dan *drag reduction* yang diperoleh pada setiap model turbulensi besarnya berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh perbedaan besaran distribusi tekanan yang terjadi di permukaan model uji. Besarnya total gaya *drag* dan *drag reduction* pada setiap model turbulensi dinyatakan pada Table 4.6.

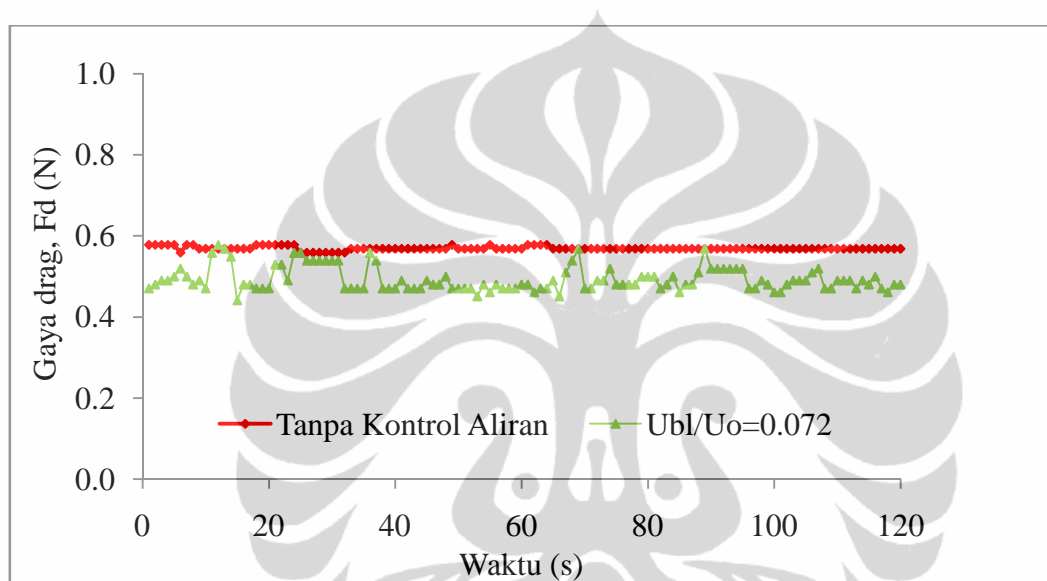
Tabel 4.6 Total gaya *drag* dan *drag reduction* pada setiap model turbulensi

Model Turbulensi	Koefisien drag, C_d		Pengurangan <i>drag</i> (%)
	Tanpa kontrol aktif	Kontrol aktif <i>blowing</i> 1.0 m/s	
<i>k-epsilon standard</i>	1.781	1.537	13.70
<i>k-epsilon realizable</i>	1.622	1.455	10.27
<i>k-omega standard</i>	3.209	2.832	11.75
<i>k-omega SST</i>	1.774	1.354	23.65

Pada Tabel 4.6 nampak bahwa *drag reduction* terbesar diperoleh dengan menggunakan model turbulensi *k-omega SST* yaitu sebesar 23.65%. Hal ini bersesuaian dengan peningkatan koefisien tekanan yang diperoleh juga terbesar yakni sebesar 50.12%, namun intensitas turbulensi maksimum justru mengalami kenaikan sebesar 12.98%. Sedangkan pada 3 model turbulensi lainnya yaitu *k-epsilon standar*, *k-epsilon realizable* dan *k-omega standar* terdapat kecenderungan terjadi pengurangan intensitas turbulensi dan *drag reduction* jika terjadi peningkatan koefisien tekanan sebagai akibat adanya penempatan *blowing* pada bagian belakang model uji.

4.1.4 Validasi Hasil Komputasi

Hasil komputasi numerik untuk *drag* aerodinamika yang telah diperoleh divalidasi secara eksperimental dengan menggunakan *load cell*. Data gaya *drag* yang diambil adalah sebanyak 120 buah untuk perbandingan kecepatan *blowing* dengan kecepatan *upstream* dengan interval waktu pengambilan data adalah 120 detik. Data yang diperoleh berfluktuasi, seperti diperlihatkan pada Gb. 4.5 untuk kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s.



Gambar 4.5 Fluktuasi data gaya *drag* dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s, *blowing*

Nilai koefisien drag dan pengurangan *drag* yang diperoleh secara eksperimen dirangkum dalam Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag blowing*, Eksperimen

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien <i>drag</i> , C_d		Pengurangan <i>drag</i>
		Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.0$ m/s	
1	13.9	1.231	1.066	13.39

Pada Tabel 4.7 terlihat bahwa dengan adanya penambahan kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s memberikan pengaruh terhadap pengurangan drag aerodinamika pada model uji sebesar 13.39%. Hasil validasi eksperimen terhadap hasil komputasi untuk pengurangan drag, nampak bahwa yang paling mendekati hasil eksperimen adalah model turbulensi *k-epsilon standard*, dimana perbedaan nilai pengurangan drag yang diperoleh sekitar 0.30%. Sementara, untuk model turbulensi yang lain *k-epsilon realizable*, *k-omega standar* dan *k-omega SST* adalah masing-masing -3.13%, -1.65% dan 10.25% (tanda (-) menandakan bahwa hasil eksperimen lebih besar dibanding hasil komputasi).

Model *k-epsilon standard* adalah model turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scales*) ditentukan secara independen. Kestabilan, ekonomis (dari sisi komputasi) dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model *k-ε standar* sering digunakan pada simulasi aliran fluida.

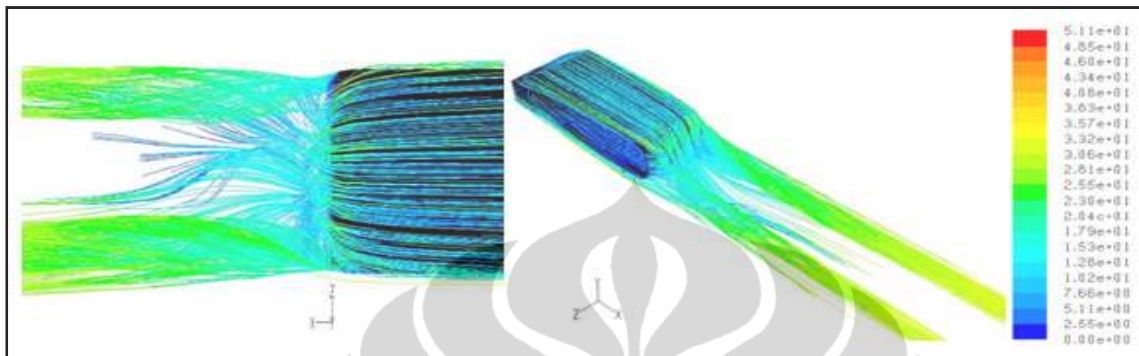
4.2 Karakteristik Perubahan Medan Aliran – Hasil-hasil Komputasi

4.2.1 Medan Kecepatan

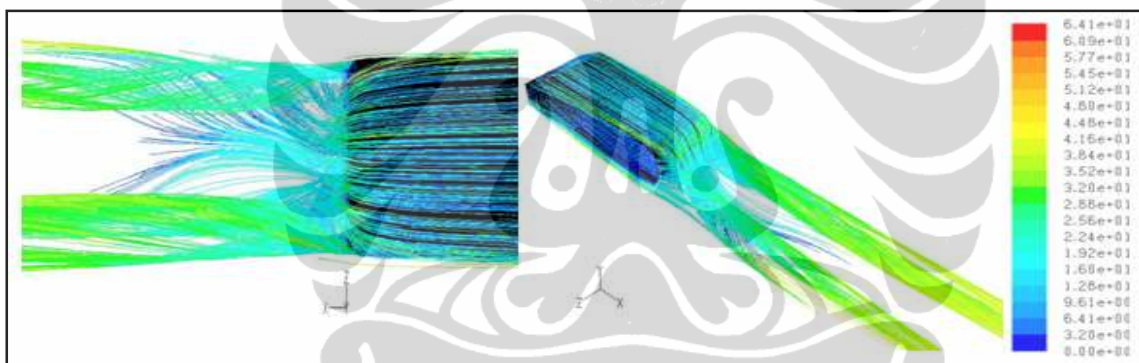
a. Tanpa Kontrol Aliran

Pengaruh variasi kecepatan *upstream* terhadap pola aliran yang terbentuk pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran diperlihatkan pada Gb. 4.6. Adapun kecepatan *upstream* yang diberikan adalah 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Gb. 4.6(a-c) memperlihatkan bahwa separasi aliran terjadi pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dan mengakibatkan adanya aliran balik sehingga olakan (*wake*) terbentuk. Separasi aliran terjadi karena fluida tidak dapat mengalir mengikuti bentuk permukaan dari *reversed Ahmed model*. Struktur olakan yang terbentuk pada bagian belakang *reversed Ahmed body*, selain disebabkan oleh separasi aliran juga dipengaruhi oleh adanya *vortex longitudinal* yang muncul pada dari bagian tepi samping, sisi belakang pada model *reversed Ahmed body* yang disebabkan karena adanya perbedaan kecepatan aliran antara daerah olakan dan daerah samping. Dari definisi *drag* yang diberikan oleh Onorato et al (1984) bahwa terbentuknya *drag* aerodinamika pada kendaraan selain disebabkan oleh aliran terseparasi dan tekanan

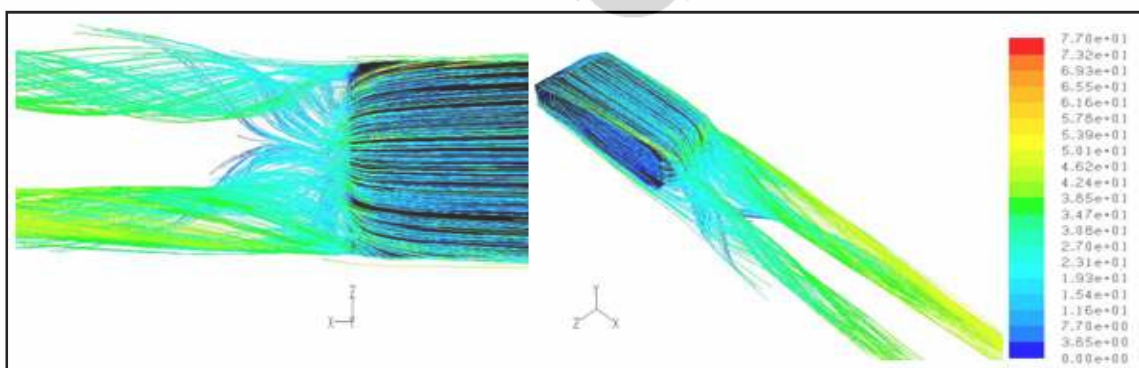
jatuh, juga merupakan efek dari interaksi *vortex* longitudinal maka daerah eksitasi aliran ditempatkan pada sisi belakang dekat tepi samping dimana *vortex* longitudinal terbentuk dengan tujuan mengurangi struktur *vortex* yang terbentuk, mengurangi luasan area olakan dan mengurangi total tekanan jatuh.



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



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

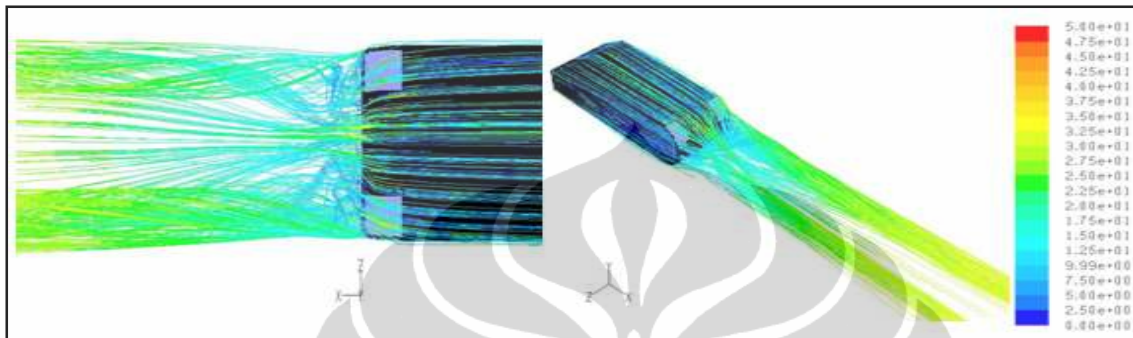


(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

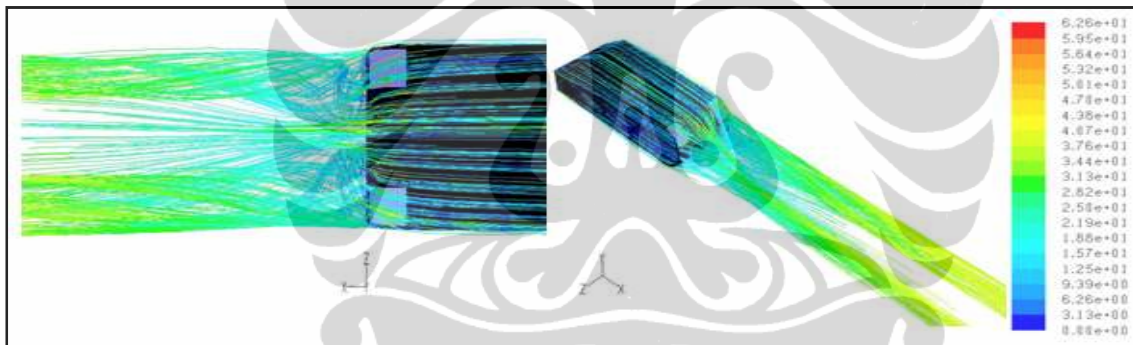
Gambar 4.6 *Pathline* kecepatan tanpa kontrol aliran

b. Dengan kontrol aliran *suction*

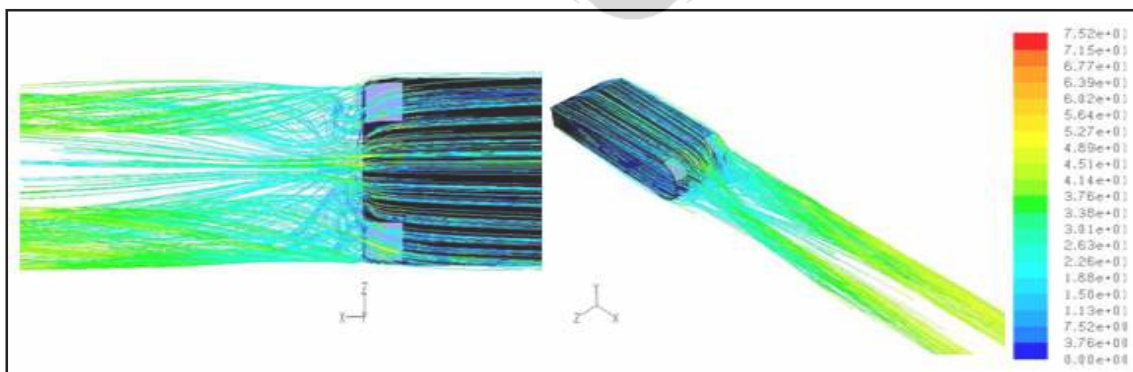
Gb. 4.7 memperlihatkan pengaruh penambahan kontrol aliran berupa *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s terhadap pola aliran yang terjadi pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan 3 (tiga) tingkat kecepatan pada bagian *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s.



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



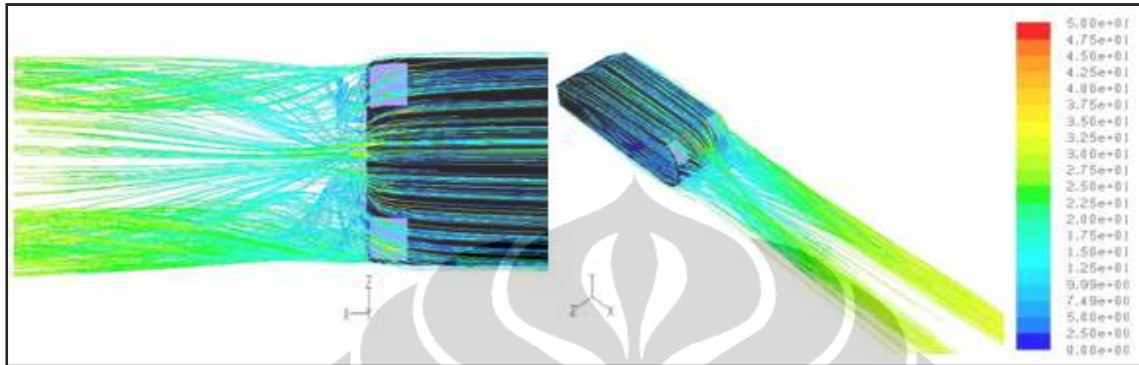
(b). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9$ m/s



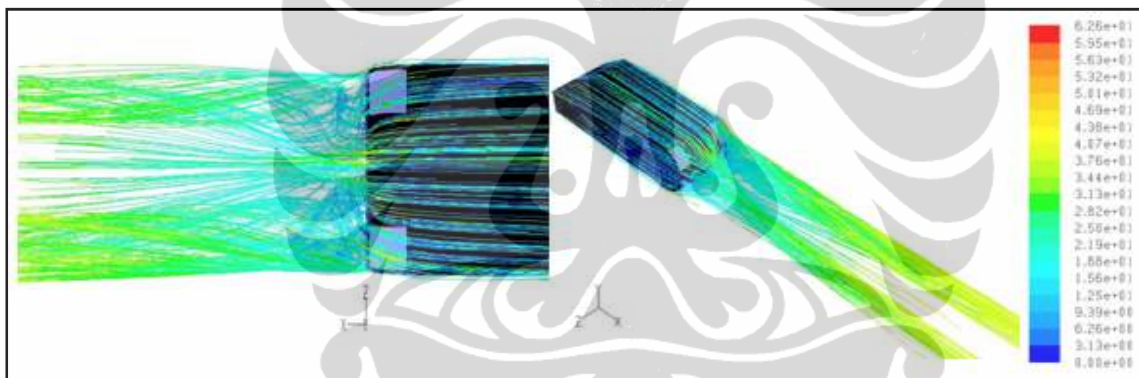
(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.7 *Pathline* kecepatan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s

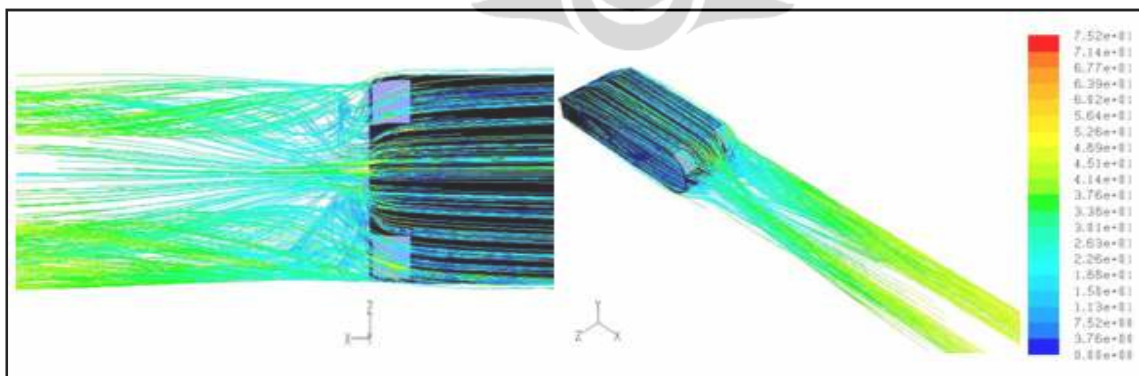
Penambahan kontrol aliran berupa *suction* dengan kecepatan 1.0 m/s yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap pola aliran yang terbentuk dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang tampak pada Gb. 4.8.



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



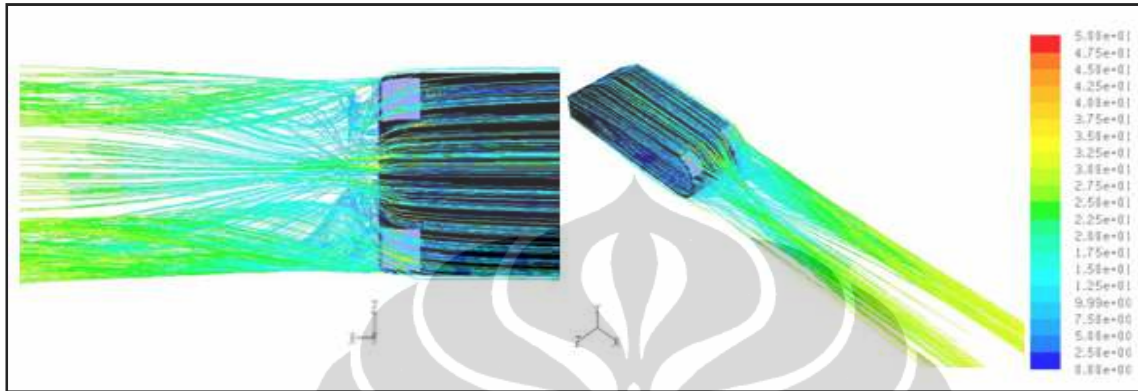
(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s



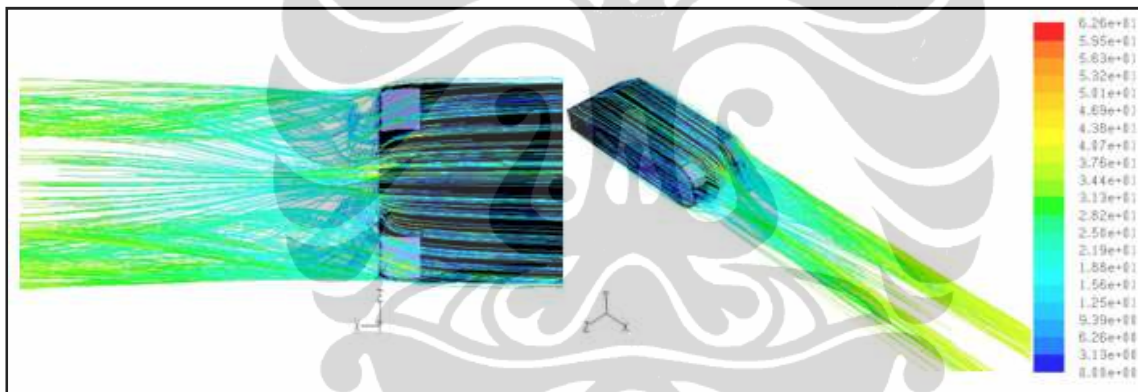
(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.8 *Pathline* kecepatan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s

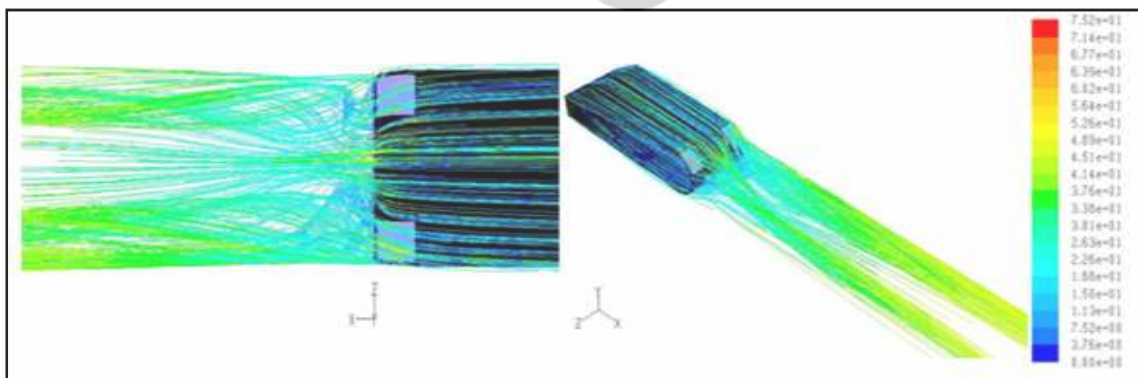
Kontrol aliran berupa *suction* dengan kecepatan 0.5 m/s yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap pola aliran yang terbentuk dengan 3 kecepatan yang berbeda yang diberikan pada bagian upstream yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang diperlihatkan pada Gb. 4.9.



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



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



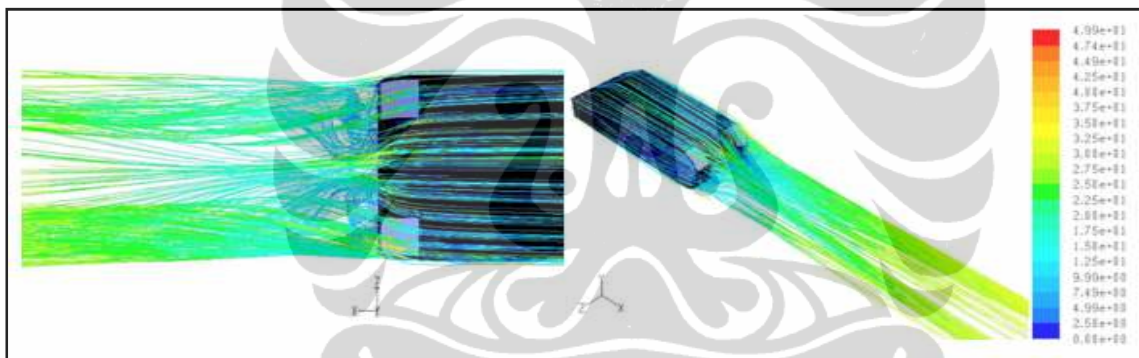
(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.9 *Pathline* kecepatan dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s

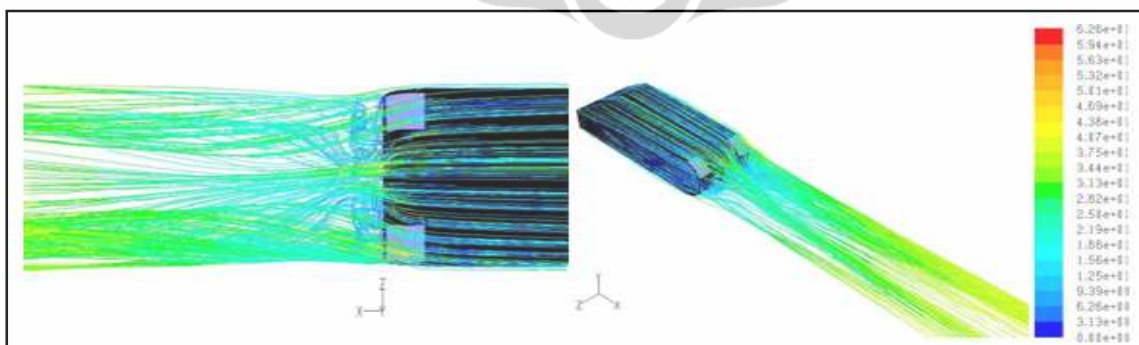
Pada Gb. 4.7(a-c), 4.8(a-c) dan 4.9(a-c) terlihat pengaruh dari penempatan kontrol aliran berupa *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s, 1.0 m/s dan 0.5 m/s pada kedua sisi samping bagian belakang *reversed Ahmed body* dimana daerah olakan dan *vortex* yang terbentuk berkurang. Dengan kecepatan *suction* yang semakin besar, nampak bahwa luasan daerah olakan semakin berkurang dan pola yang terbentuk ini, terlihat pada setiap kecepatan *upstream* yang diujikan yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s.

c. Dengan kontrol aliran *blowing*

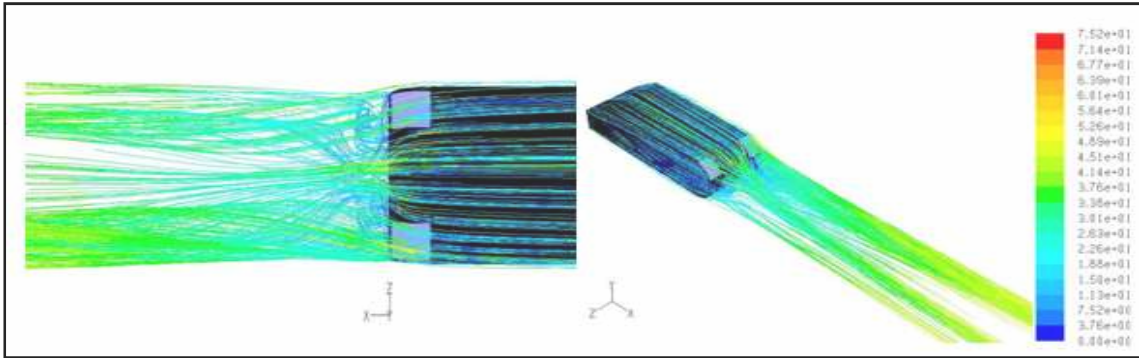
Gb. 4.10 memperlihatkan pengaruh kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 1.5 m/s terhadap pola aliran yang terbentuk pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan kecepatan *upstream* diberikan sebesar 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s.



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



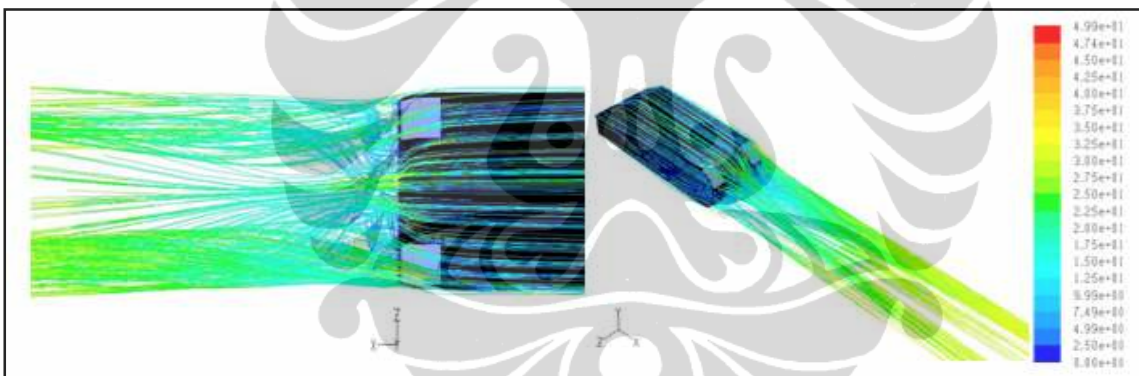
(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s



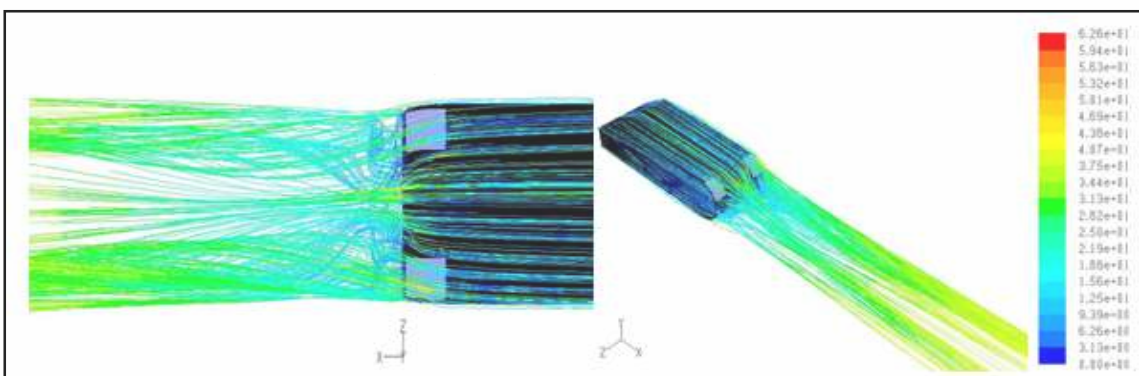
(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.10 *Pathline* kecepatan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s

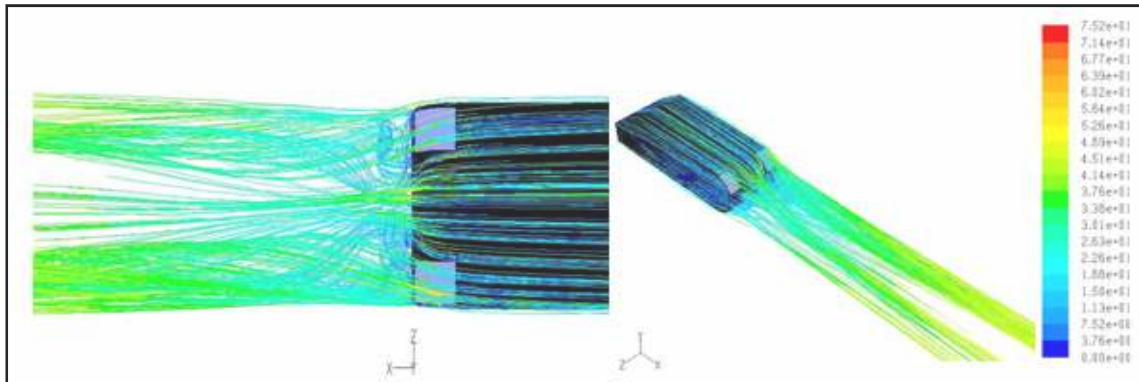
Penempatan kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 1 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap pola aliran yang terbentuk dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang tampak pada Gb. 4.11.



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



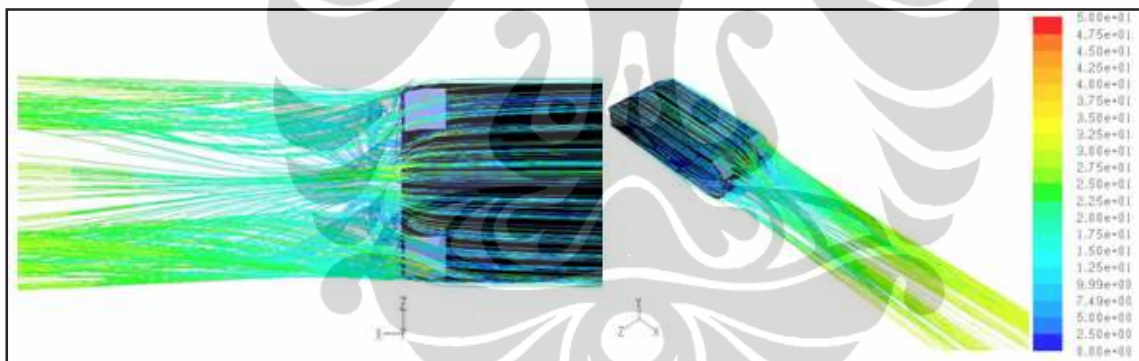
(b). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9$ m/s



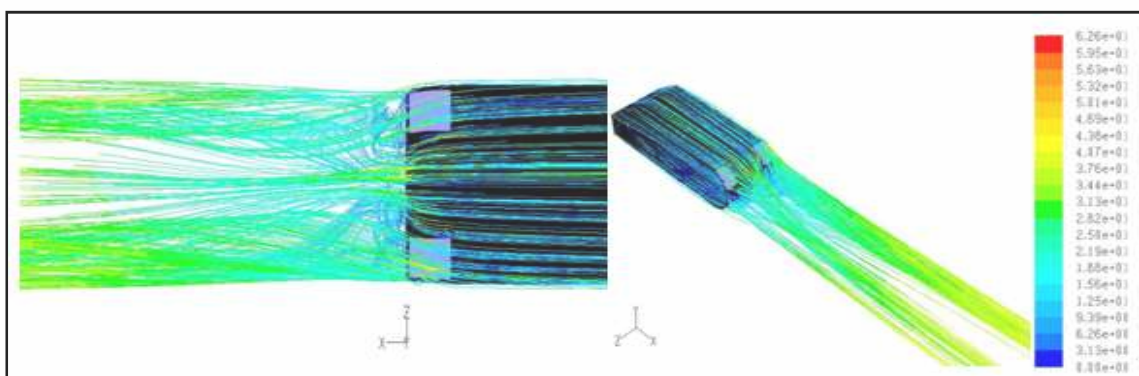
(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.11 *Pathline* kecepatan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1$ m/s

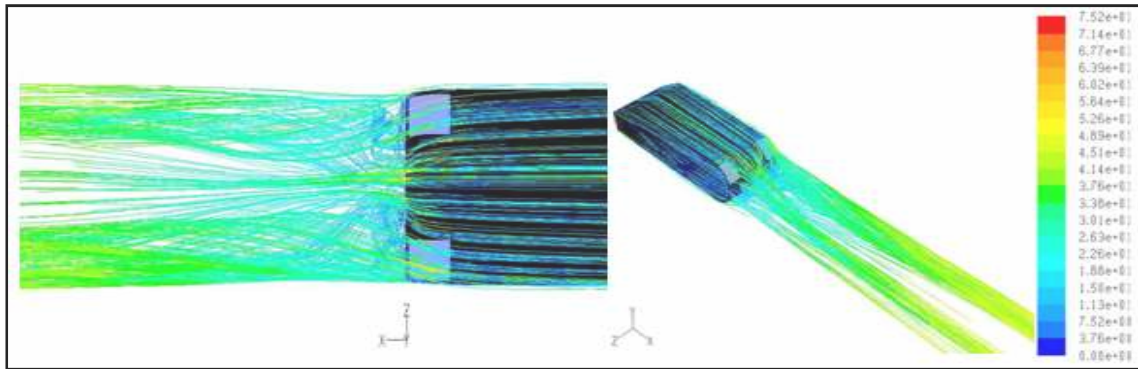
Kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 0.5 m/s yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap pola aliran yang terbentuk dengan variasi kecepatan *upstream* yaitu .1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 4.12.



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



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



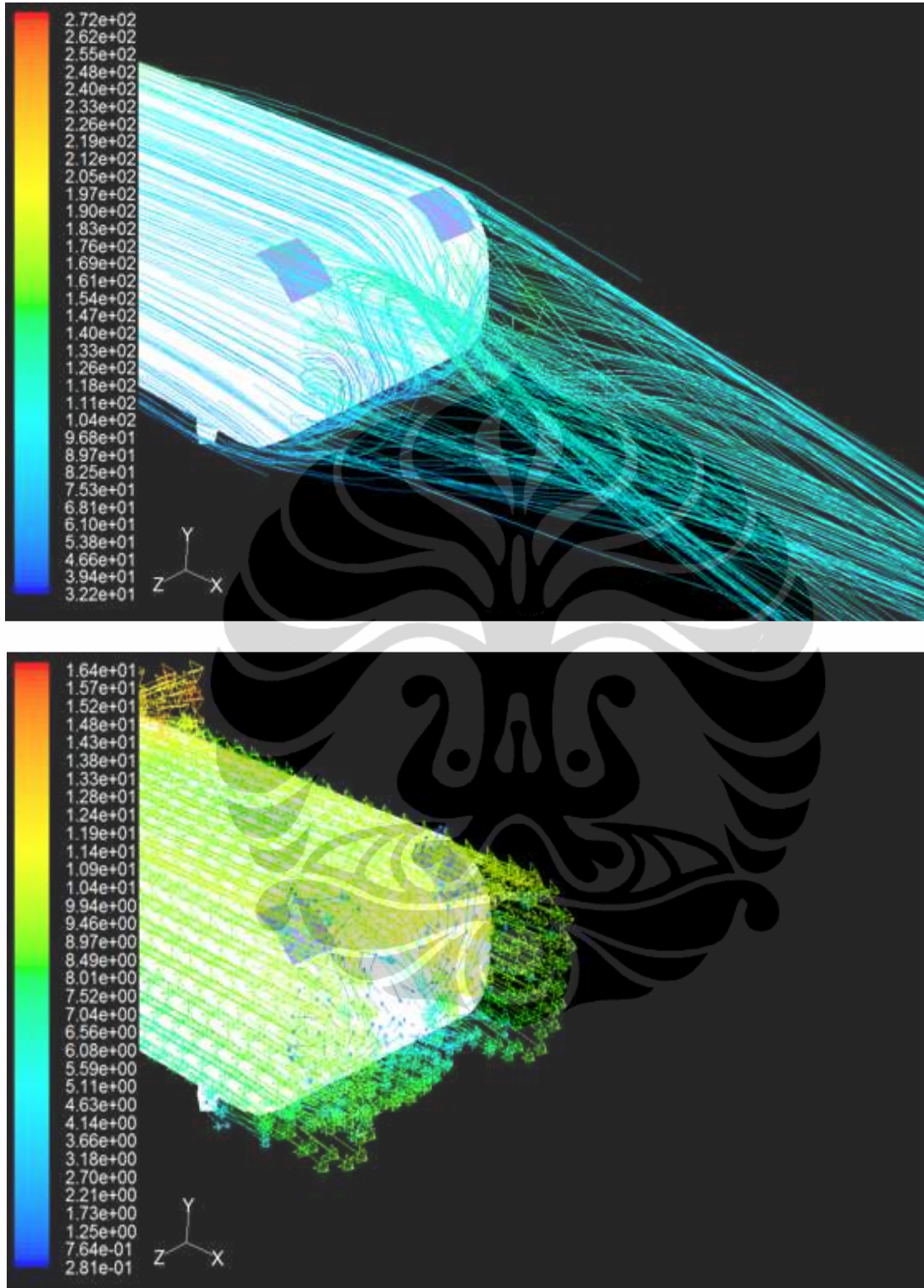
(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.12 *Pathline* kecepatan dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s

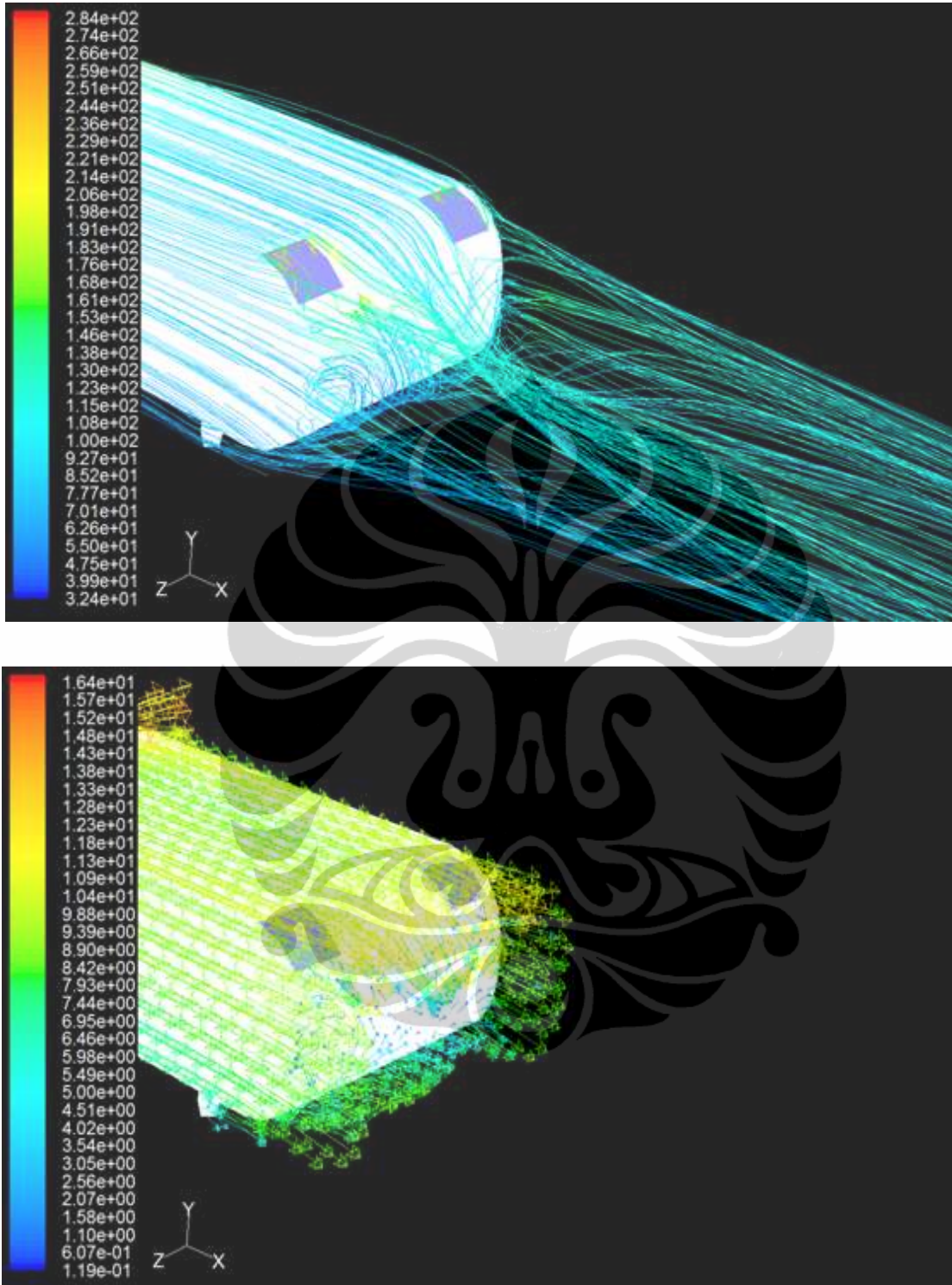
Pengaruh penambahan kontrol aliran berupa *blowing* terhadap medan kecepatan dari *reversed Ahmed Body* yang ditempatkan pada posisi yang sama untuk kontrol aliran *suction*, seperti yang terlihat pada Gb. 4.10(a-c), 4.11(a-c) dan 4.12(a-c) dimana dengan adanya *blowing*, olakan (*wake*) dan *vortex* pada model *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran juga dapat dikurangi. Hal tersebut terjadi karena adanya tambahan energi berupa aliran fluida dari *blowing* yang menyebabkan olakan (*wake*) menjadi berkurang. Dengan kecepatan *blowing* yang semakin besar, nampak bahwa luasan daerah olakan semakin berkurang dan pola yang terbentuk ini, terlihat pada setiap kecepatan *upstream* yang diujikan yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s.

d. Dengan kontrol aliran *synthetic jet*

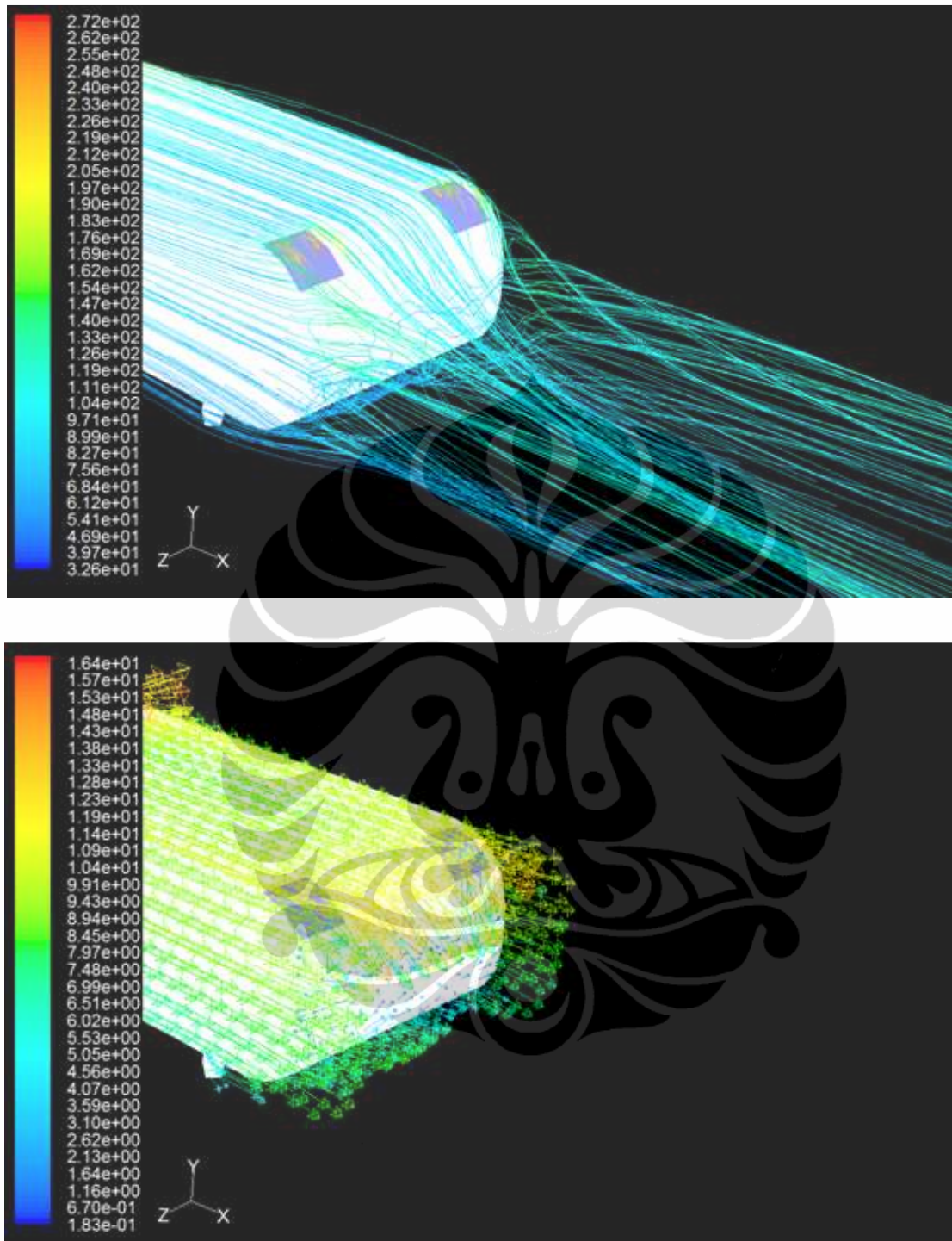
Mengingat aliran *synthetic jet* adalah aliran yang bersifat periodik maka hasil komputasi akan ditampilkan dalam bentuk *pathline* dan vektor kecepatan pada 4 fase, yaitu fase permulaan *suction* ($t=1/4 T$), fase *suction* maksimum ($t = 1/2 T$), fase permulaan *blowing* ($t = 3/4 T$), fase *blowing* maksimum ($t = T$), dan fase permulaan *suction* ke-2 ($t=1 1/4 T$). Gb. 4.13, Gb. 4.14 dan Gb. 4.15 memperlihatkan *pathline* dan vektor kecepatan dengan kecepatan *synthetic jet* 2 m/s dan masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.9 m/s.



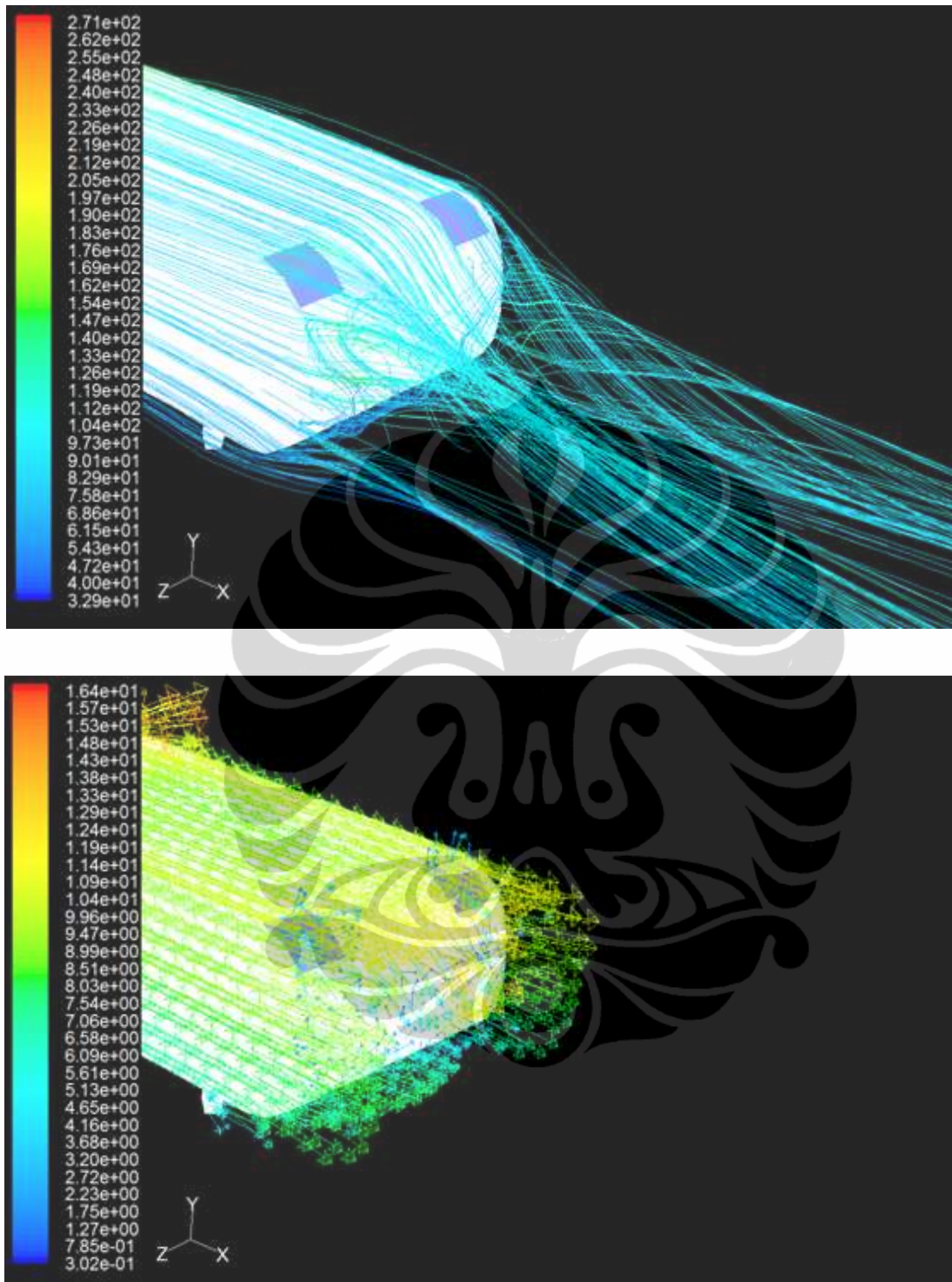
(a). Fase permulaan *suction*, $t = \frac{1}{4} T$



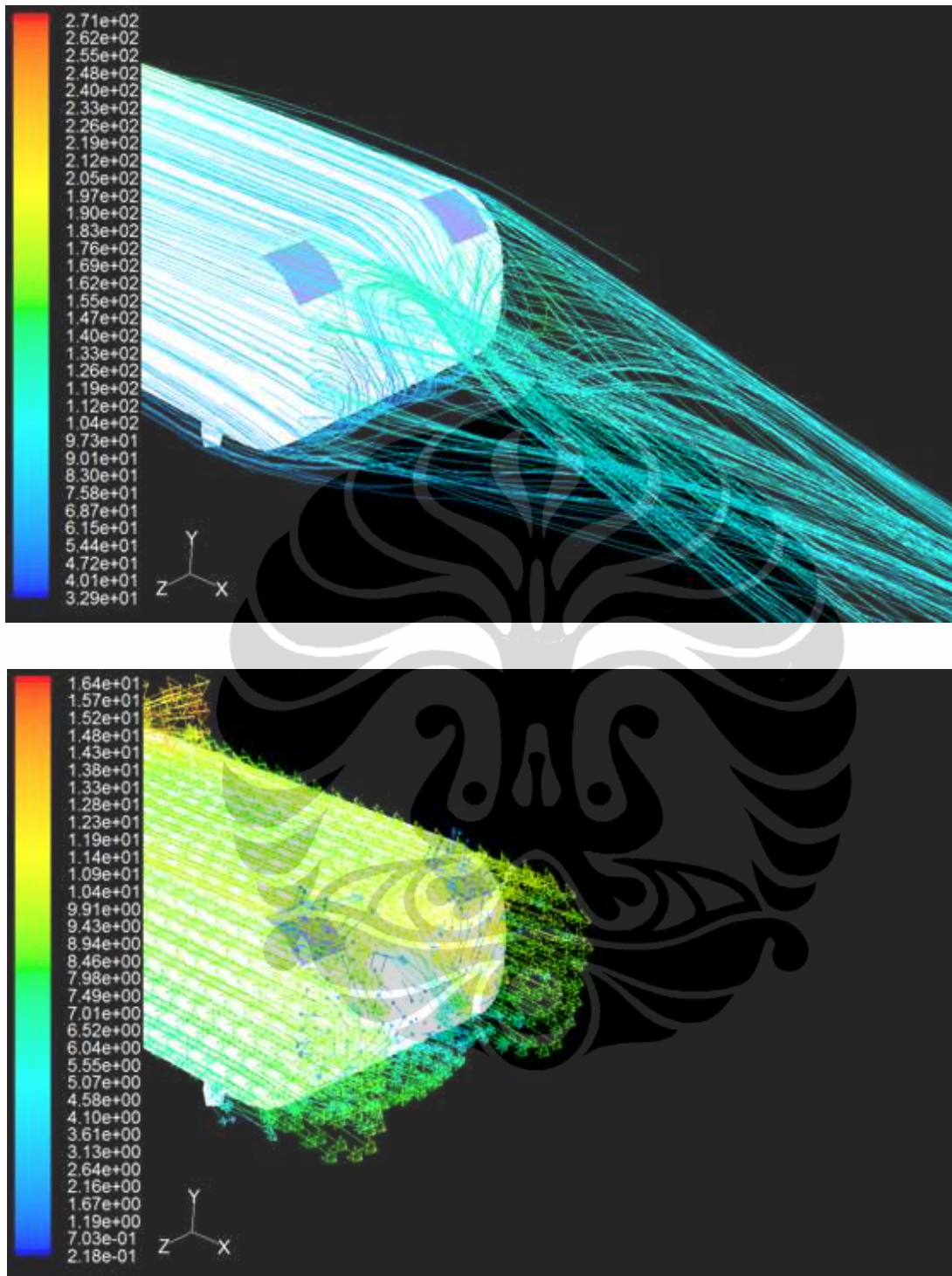
(b). Fase *suction* maksimum, $t = \frac{1}{2} T$



(c). Fase permulaan *blowing*, $t = \frac{3}{4} T$

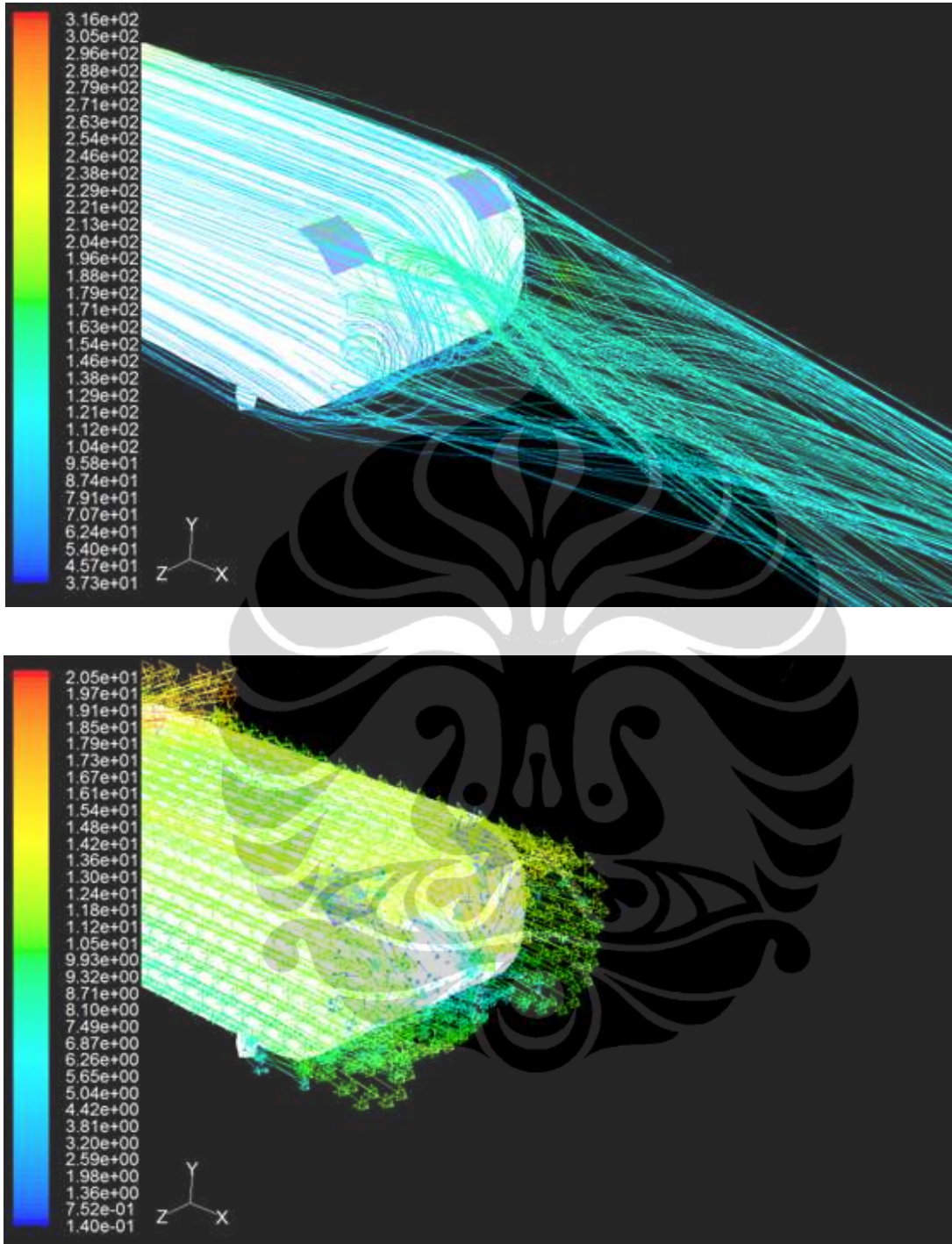


(d). Fase *blowing* maksimum, $t = T$

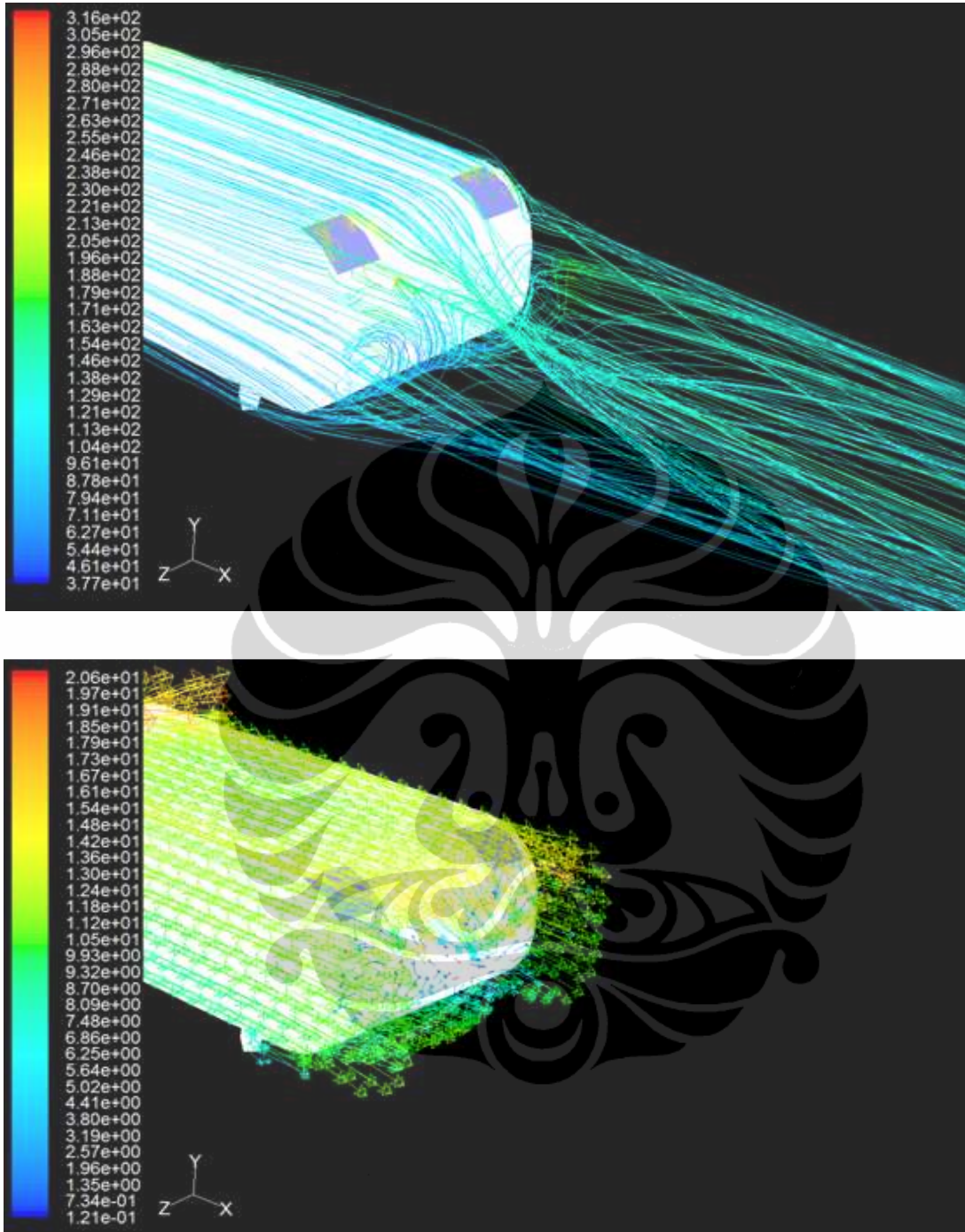


(e). Fase permulaan *suction*, $t = 1 \frac{1}{4} T$

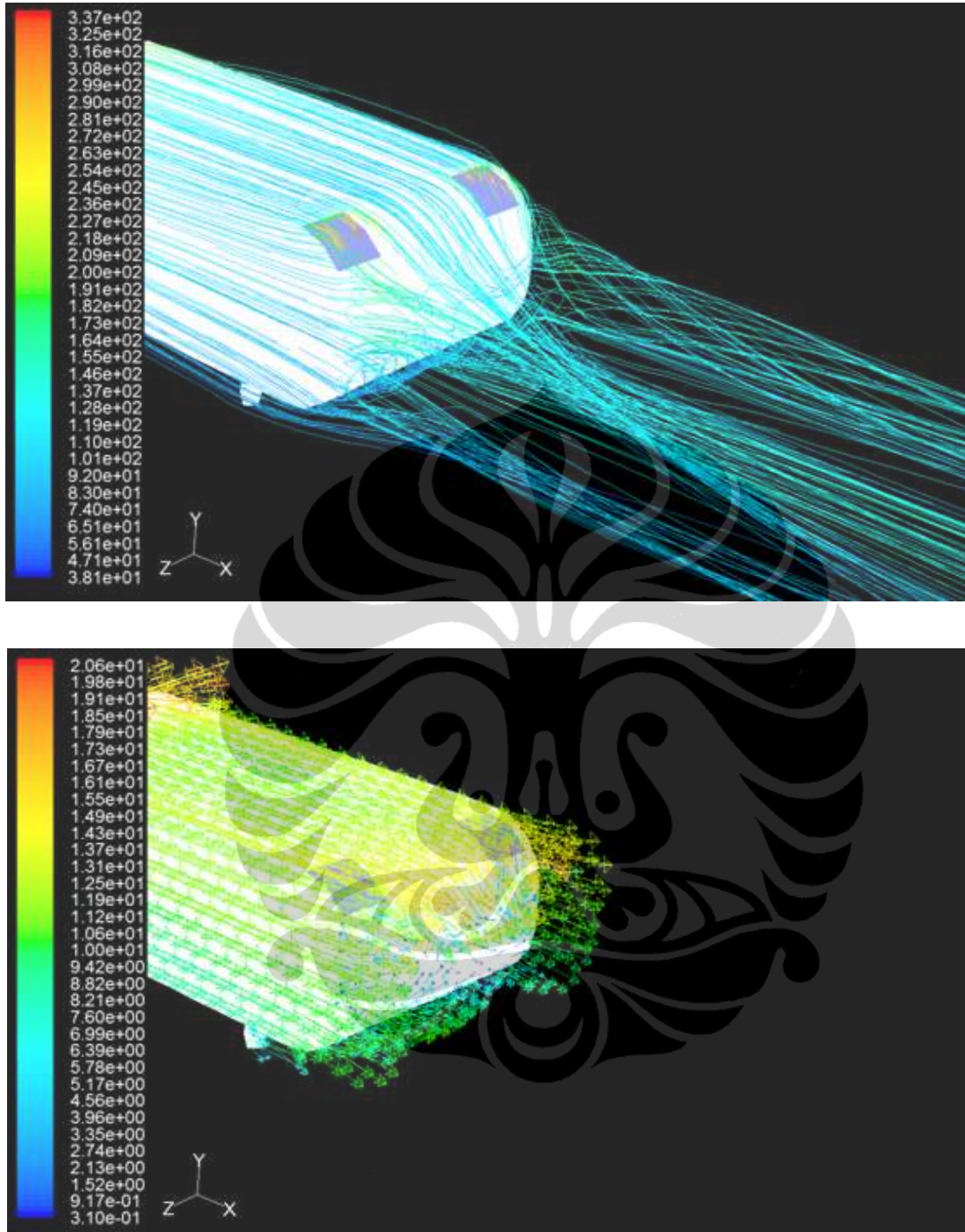
Gambar 4.13 *Pathline* dan vektor kecepatan dengan kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1 \text{ m/s}$ dan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2 \text{ m/s}$



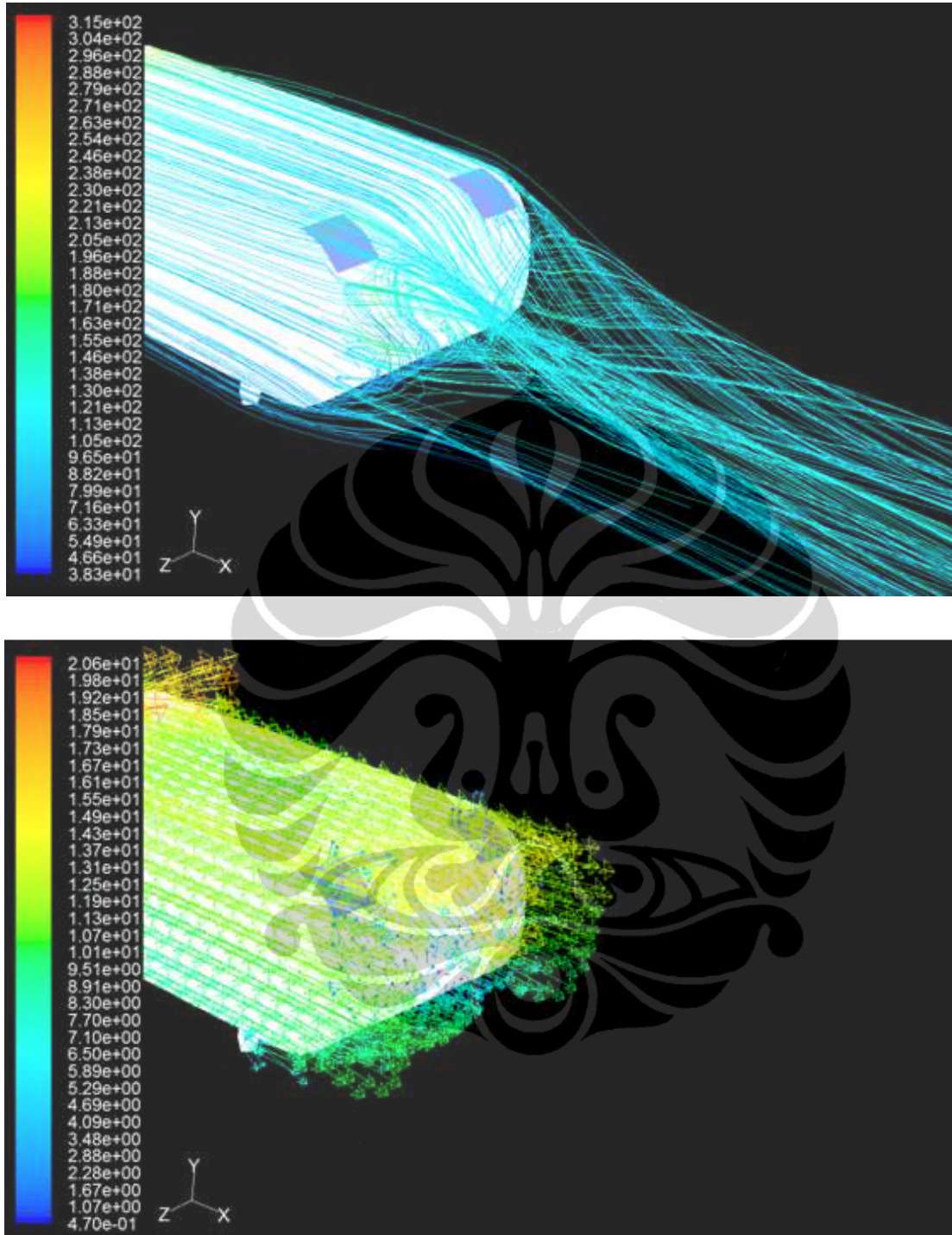
(a). Fase permulaan *suction*, $t = \frac{1}{4} T$



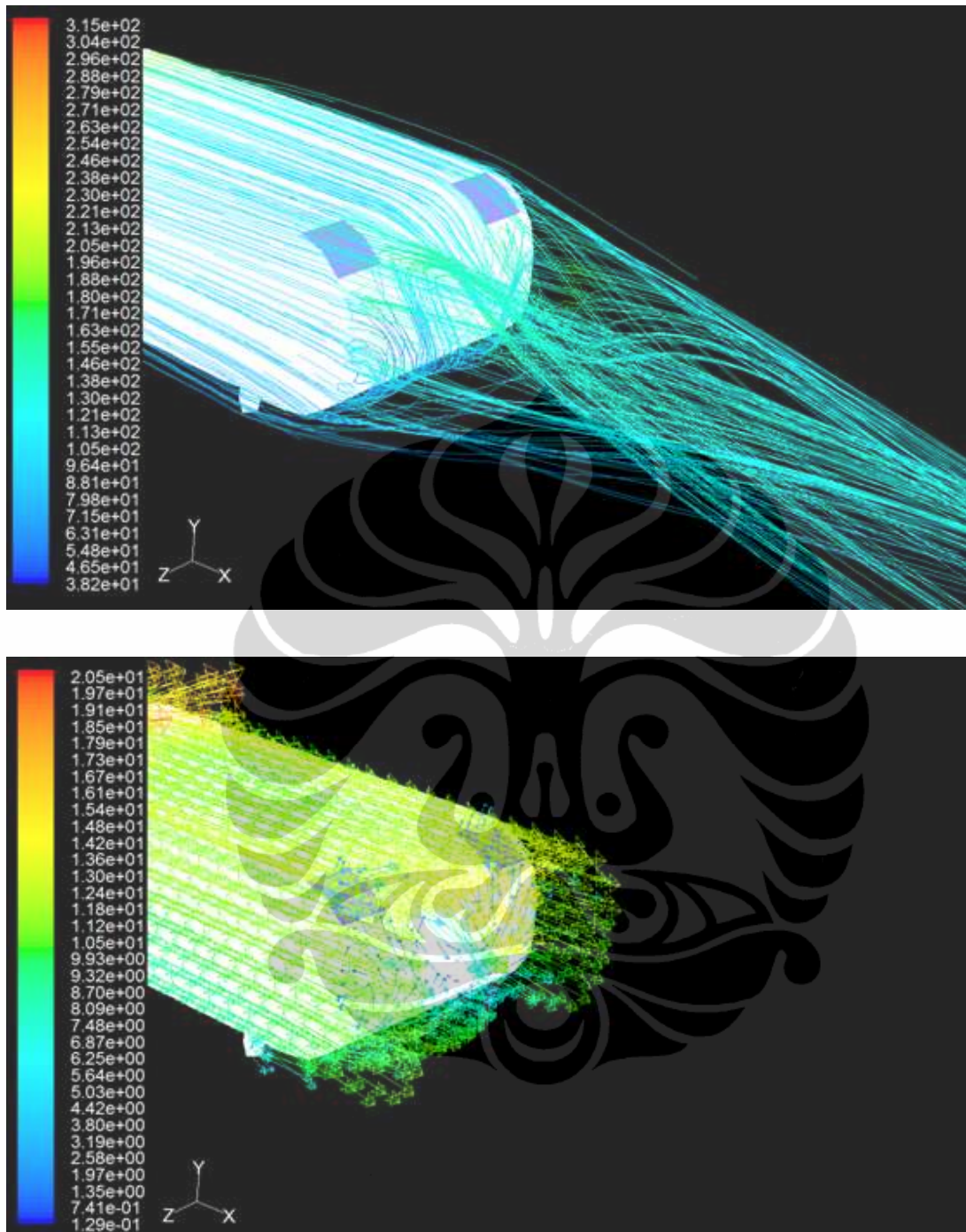
(b). Fase *suction* maksimum, $t = \frac{1}{2} T$



(c). Fase permulaan *blowing*, $t = \frac{3}{4} T$

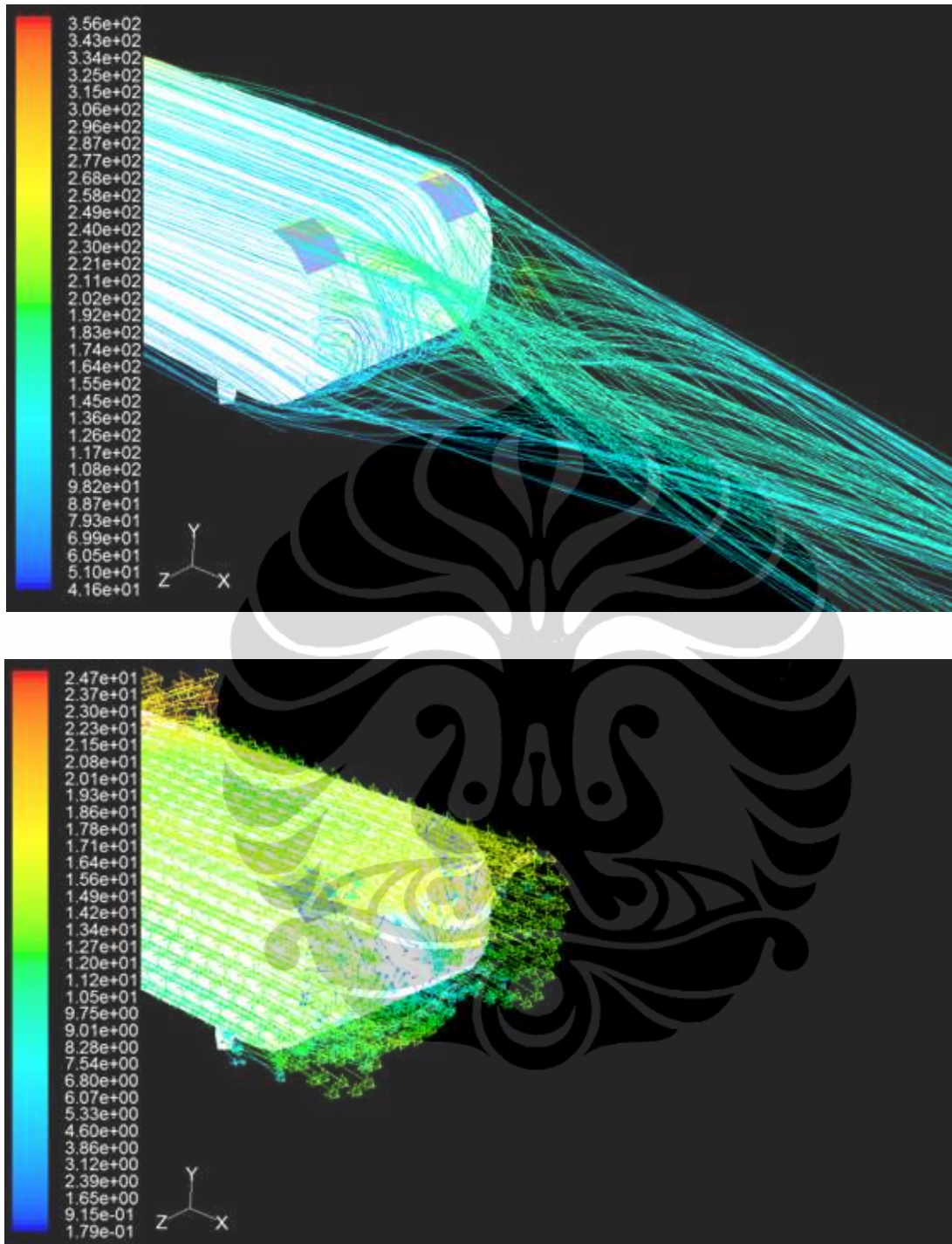


(d). Fase *blowing* maksimum, $t = T$

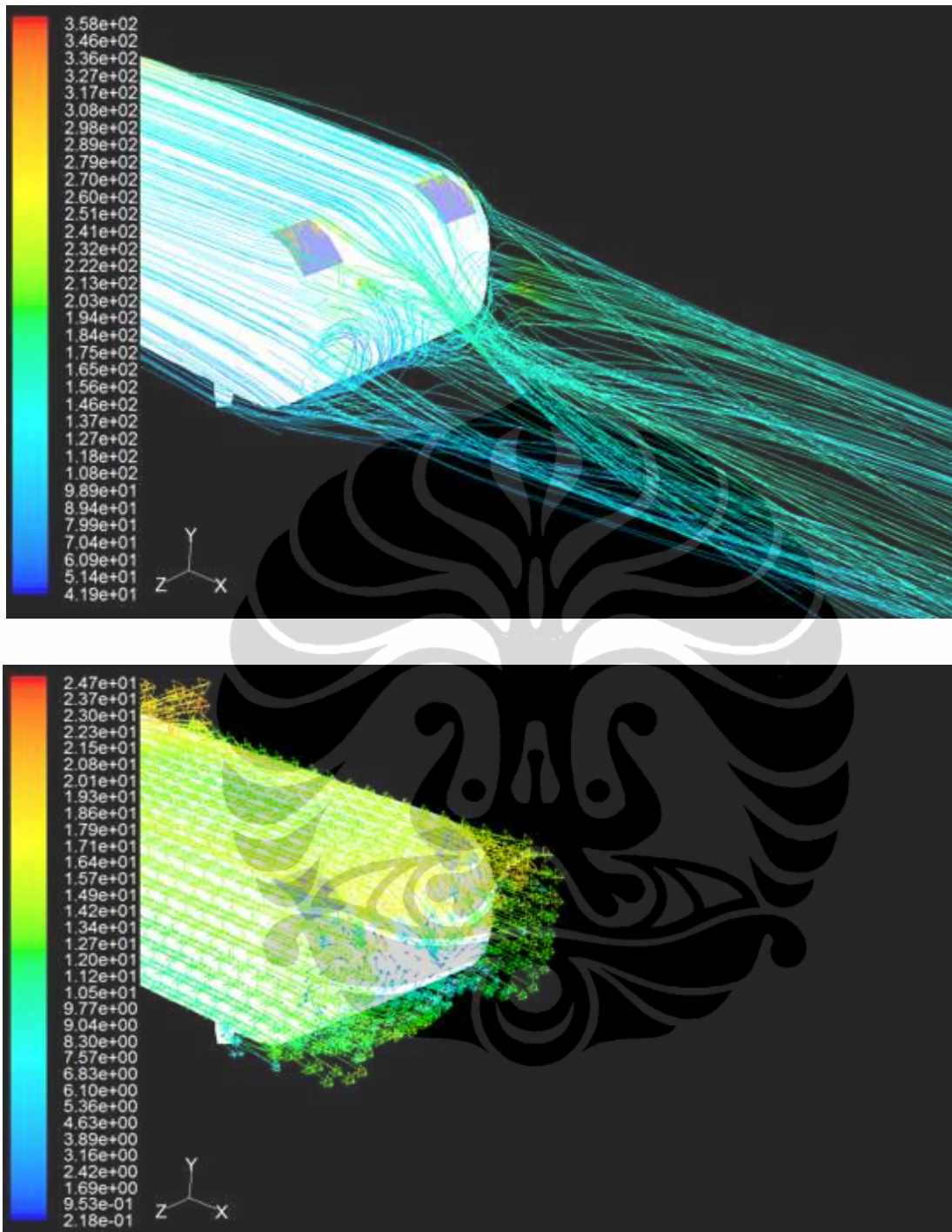


(e). Fase permulaan *suction*, $t = 1 \frac{1}{4} T$

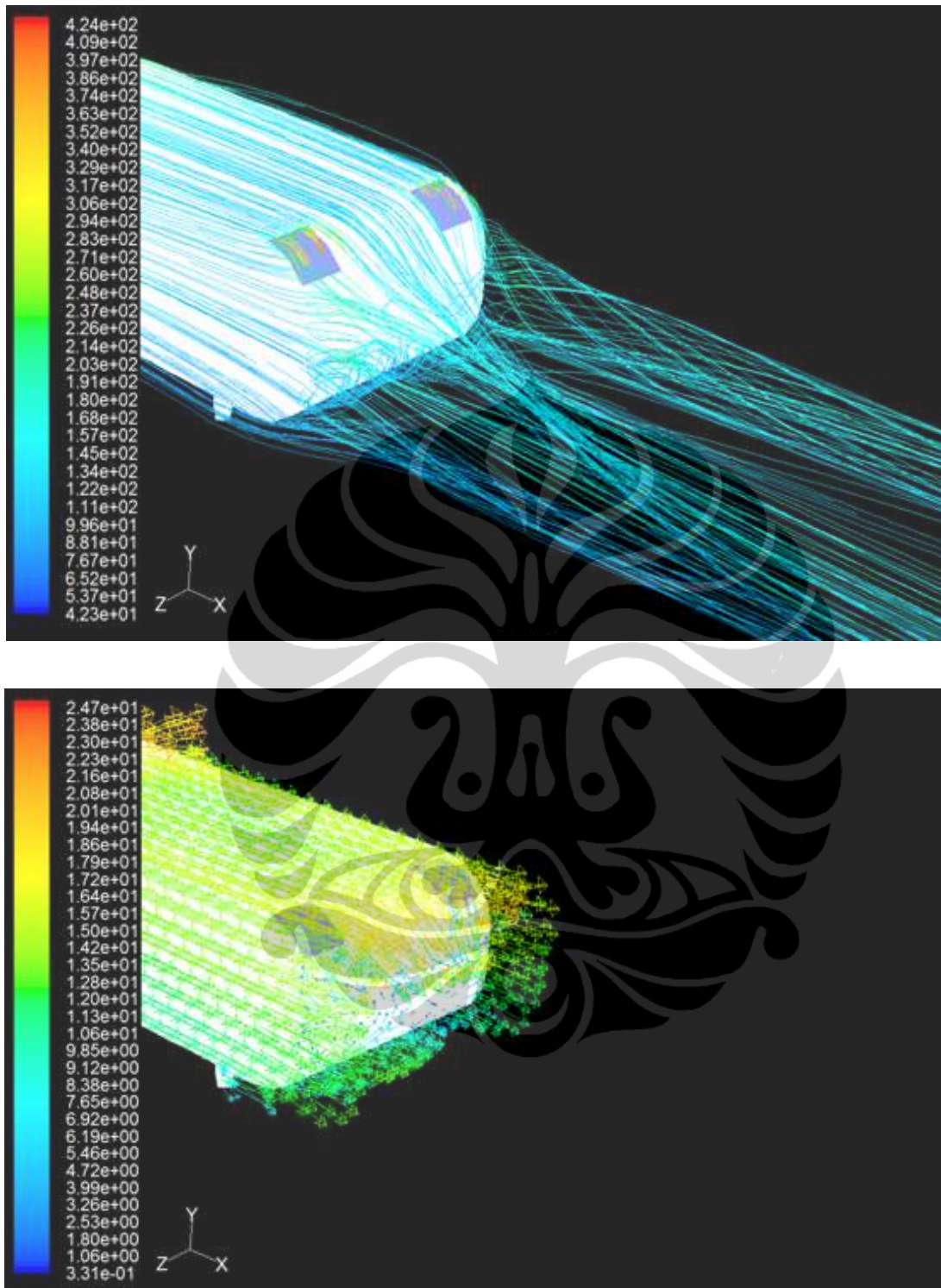
Gambar 4.14 *Pathline* dan vektor kecepatan dengan kecepatan *upstream*,
 $U_o = 13.9 \text{ m/s}$ dan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2 \text{ m/s}$



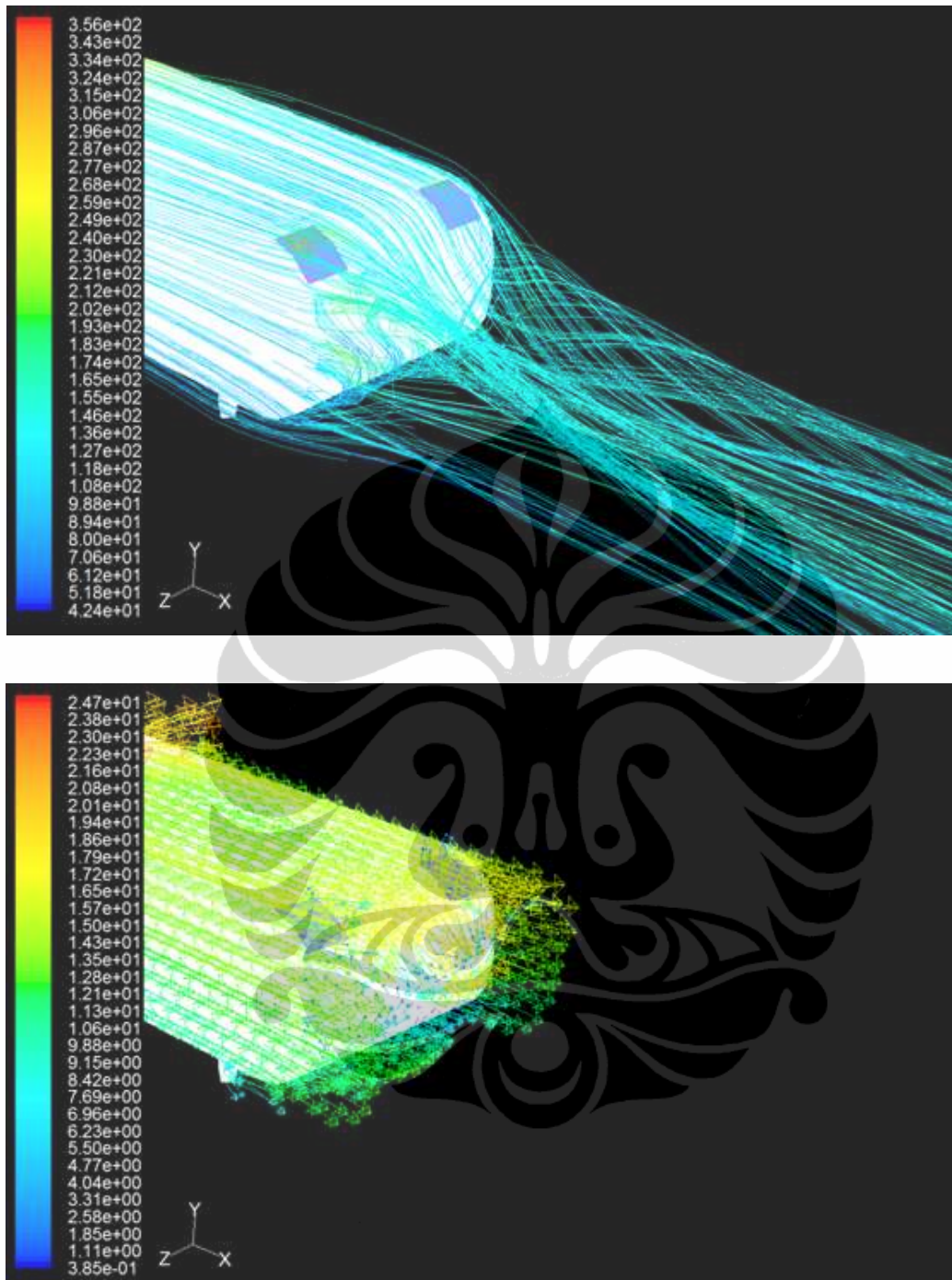
(a). Fase permulaan *suction*, $t = \frac{1}{4} T$



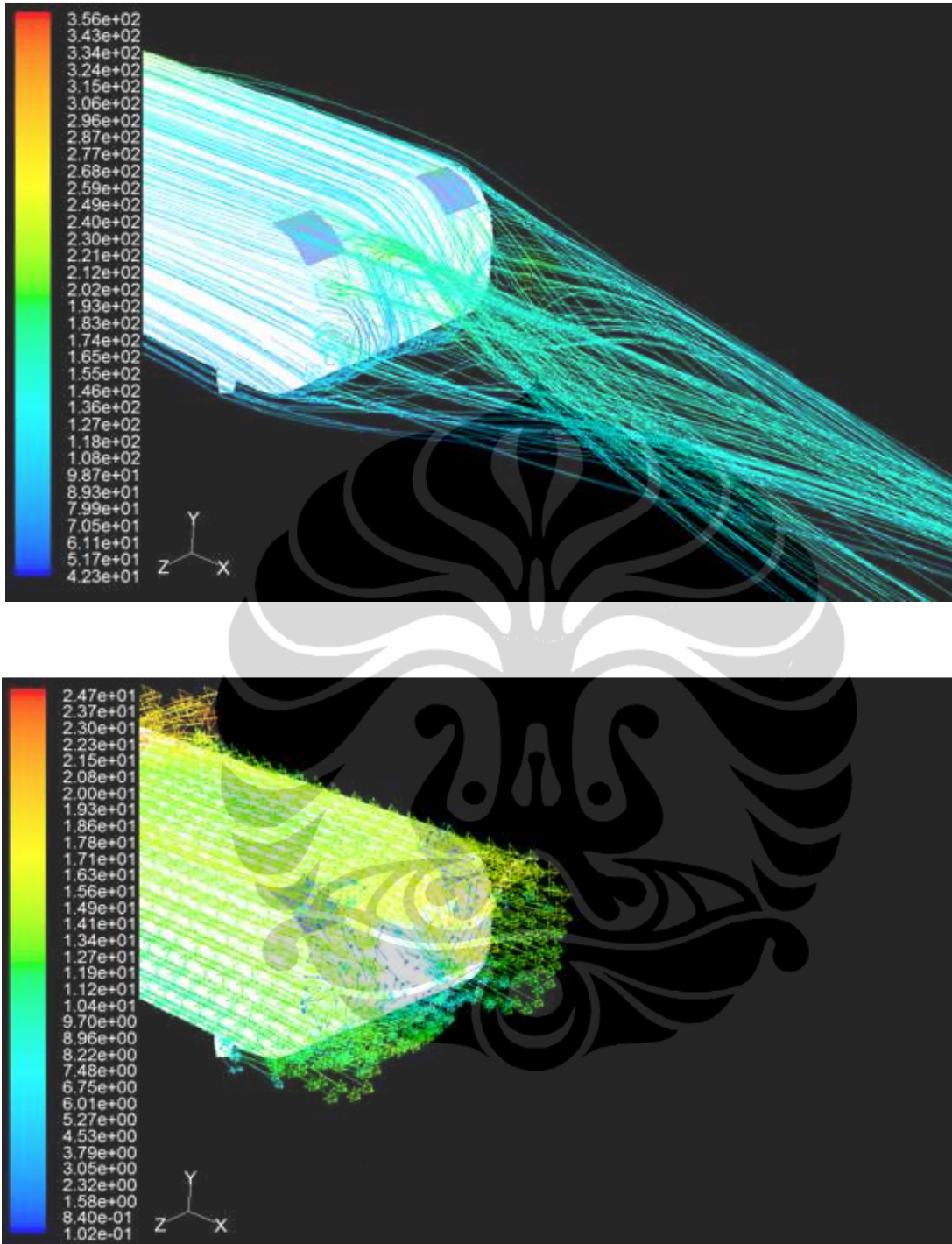
(b). Fase *suction* maksimum, $t = \frac{1}{2} T$



(c). Fase permulaan *blowing*, $t = \frac{3}{4} T$



(d). Fase *blowing* maksimum, $t = T$



(e). Fase permulaan *suction*, $t = 1 \frac{1}{4} T$

Gambar 4.15 *Pathline* dan vektor kecepatan dengan kecepatan *upstream*,
 $U_o = 16.7 \text{ m/s}$ dan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2 \text{ m/s}$

Pada Gb. 4.13, Gb. 4.14 dan Gb. 4.15 nampak bahwa pada fase *blowing* pada *synthetic jet* memberikan pengaruh dimana struktur olakan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed model* berpindah semakin ke atas dan ke belakang (perpindahan positif terhadap sumbu-y dan sumbu-x). Pada fase *suction*, struktur olakan cenderung bergeser ke bawah. Namun secara umum, besarnya area olakan yang teramati pada bagian belakang *reversed Ahmed model* cenderung lebih sedikit dibandingkan dengan *reversed Ahmed model* tanpa kontrol aliran.

4.2.2 Medan Tekanan

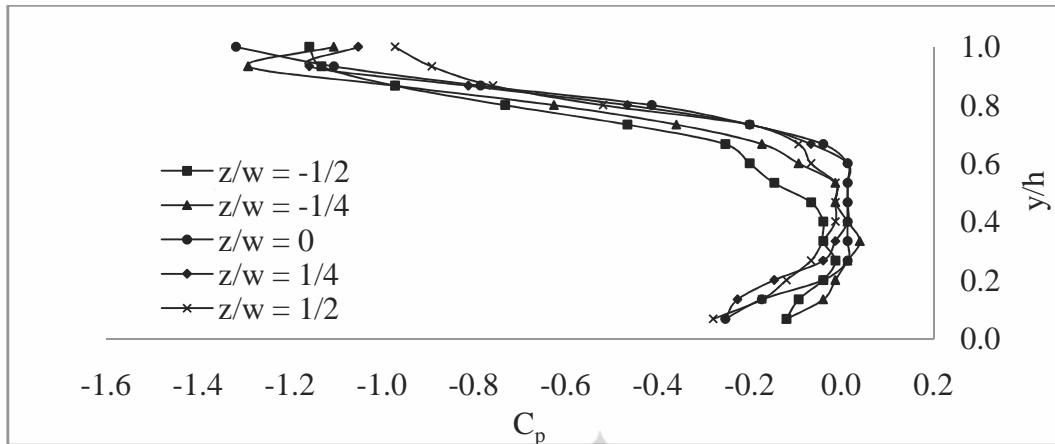
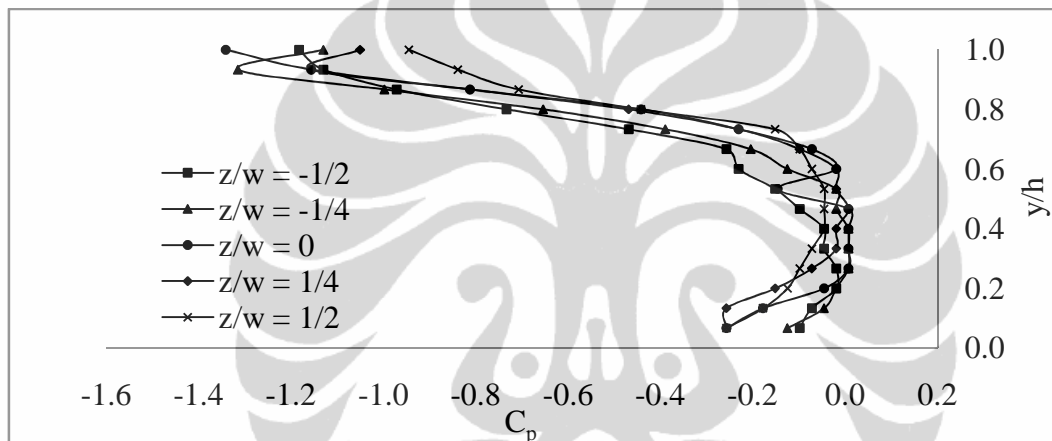
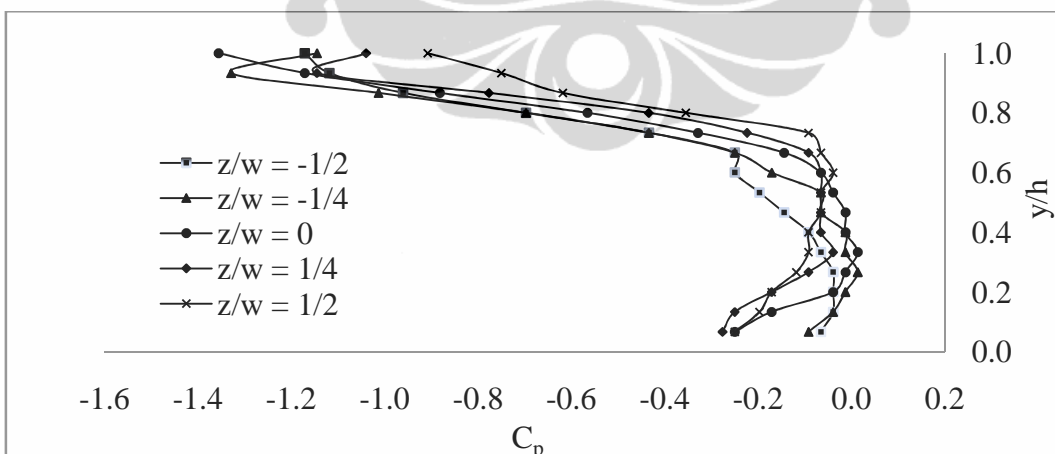
a. Tanpa Kontrol Aliran

Gb. 4.16 menunjukkan hasil distribusi koefisien tekanan tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan 3 (tiga) kecepatan *upstream*, yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.16 diperoleh nilai minimum koefisien tekanan seperti terlihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Nilai minimum koefisien tekanan tanpa kontrol aliran

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-1.3170
2	13.9	-1.3420
3	16.7	-1.3556

Pada Tabel 4.8 terlihat bahwa untuk peningkatan kecepatan *upstream*, nilai minimum dari koefisien tekanan minimum semakin kecil. Nilai ini terletak pada lokasi yang sama, yaitu $y/h=1$ dan $z/w=0$. Dengan semakin meningkatnya kecepatan aliran pada bagian *upstream* dari *reversed Ahmed body* mengakibatkan tekanan yang diperoleh pada bagian *downstream* semakin kecil.

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.16 Distribusi koefisien tekanan tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

b. Dengan Kontrol Aliran *Suction*

Pengaruh penempatan kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap koefisien tekanan dengan variasi kecepatan *upstream* adalah 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti terlihat pada Gb. 4.17. Tabel 4.9 memperlihatkan nilai minimum koefisien tekanan yang diperoleh akibat pengaruh penempatan *suction* dengan kecepatan 1 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* yang berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$.

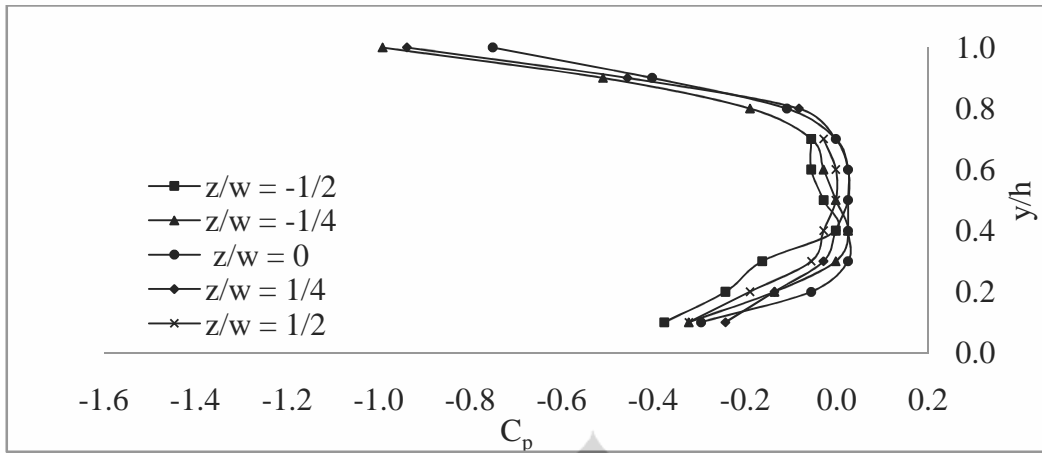
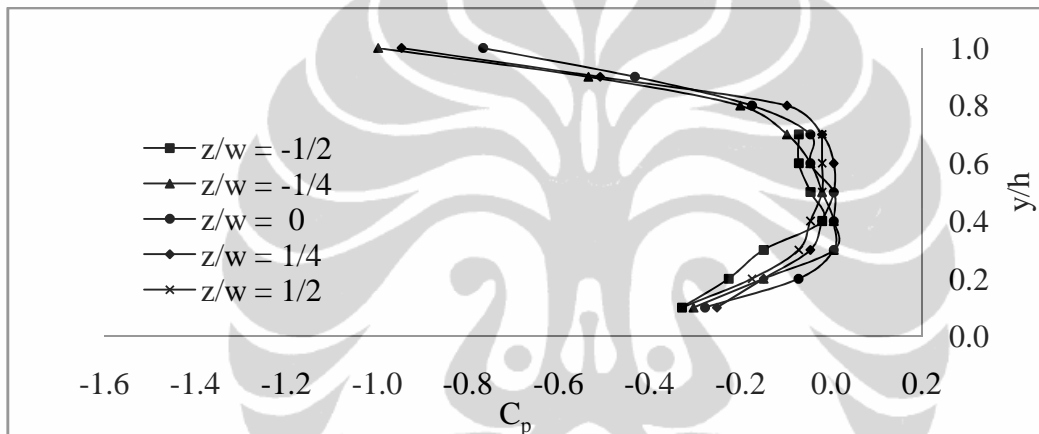
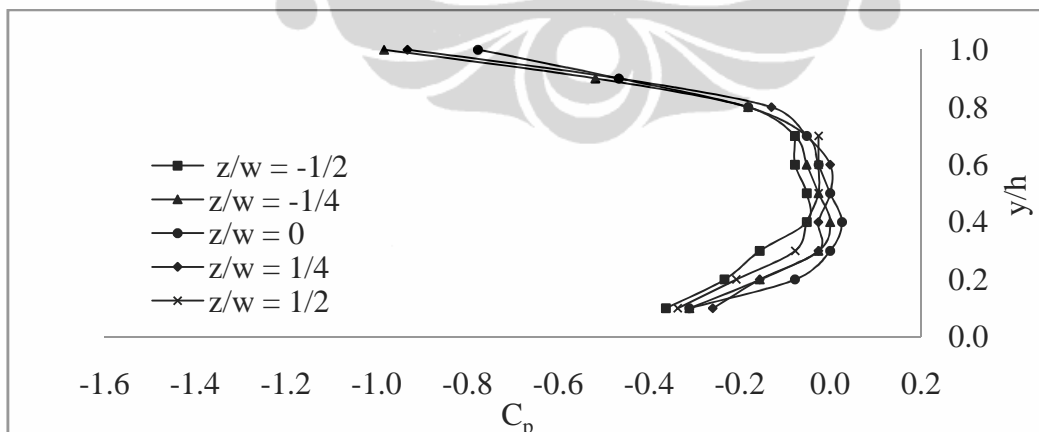
Tabel 4.9 Nilai minimum koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-0.9915
2	13.9	-0.9978
3	16.7	-0.9840

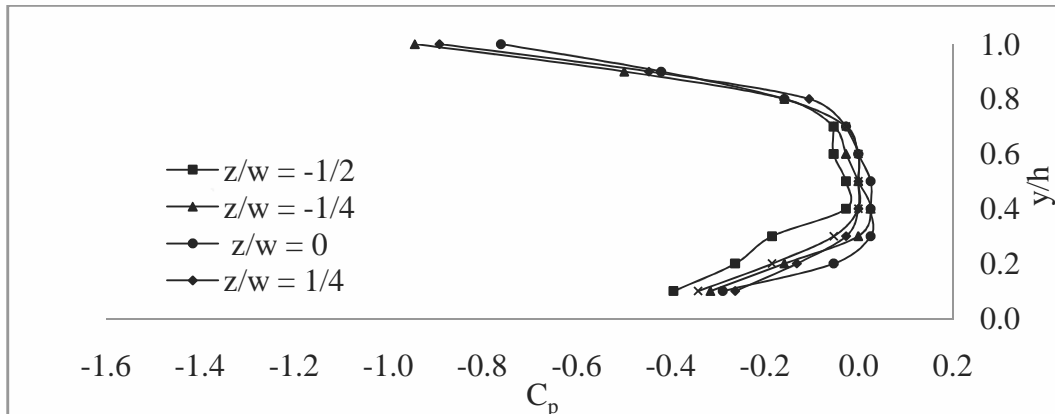
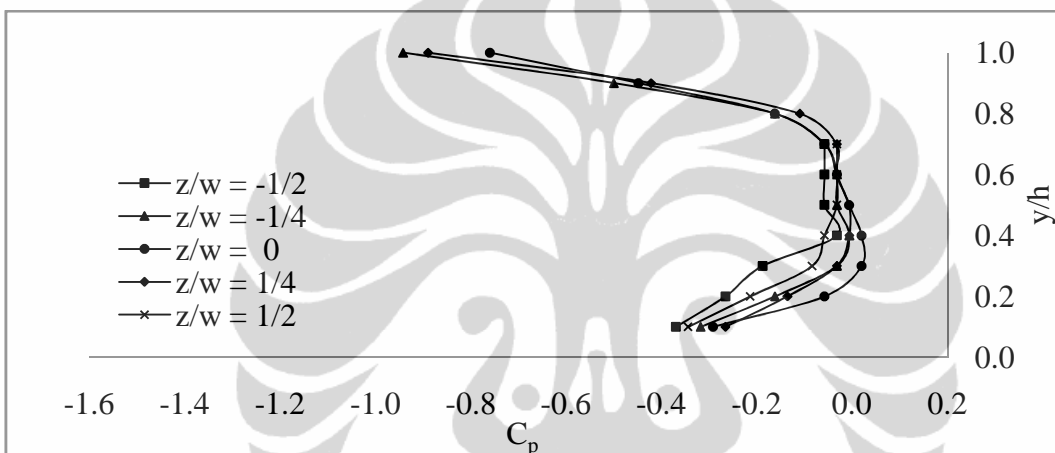
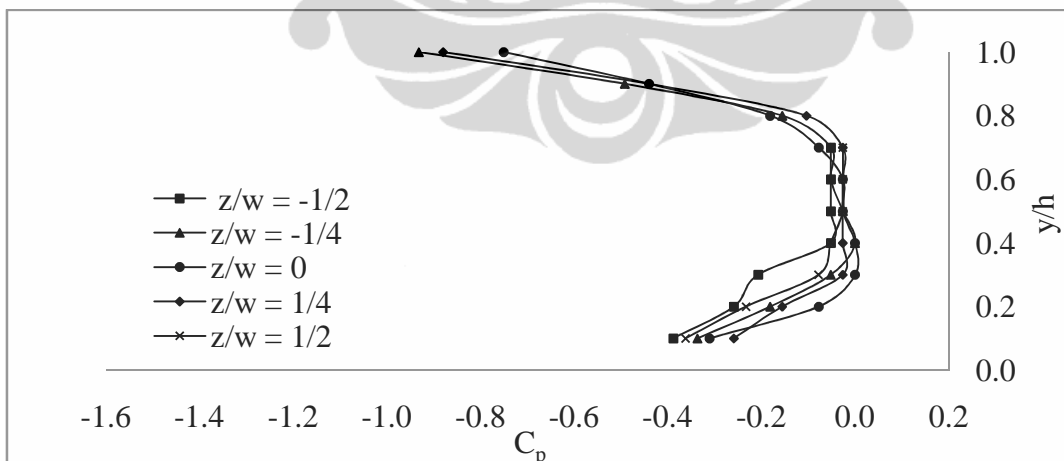
Gb. 4.18 memperlihatkan pengaruh kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.0 m/s terhadap koefisien tekanan yang ditempatkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* dengan 3 (tiga) kecepatan *upstream* yang berbeda yaitu 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.24 diperoleh nilai minimum koefisien tekanan dengan penempatan *suction* yang mempunyai kecepatan 1.0 m/s pada bagian belakang *reversed Ahmed body* berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$, diperlihatkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Nilai minimum koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-0.9440
2	13.9	-0.9417
3	16.7	-0.9320

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.17 Distribusi koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

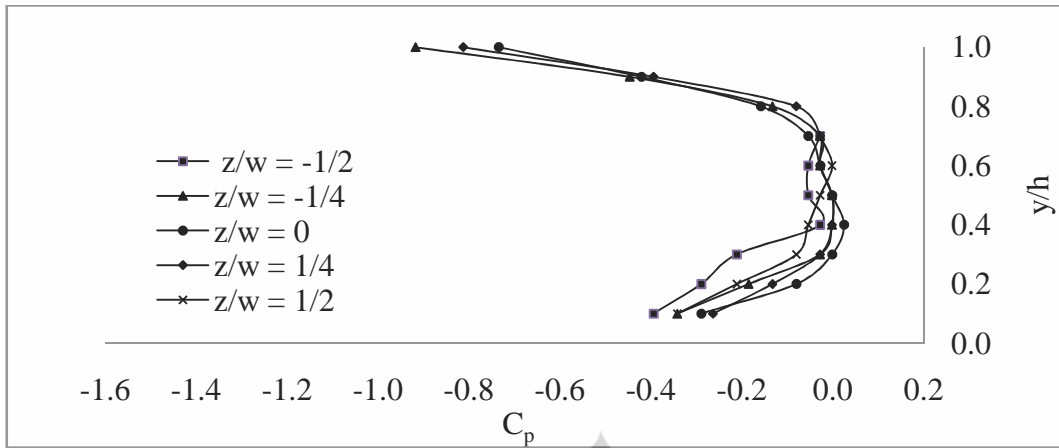
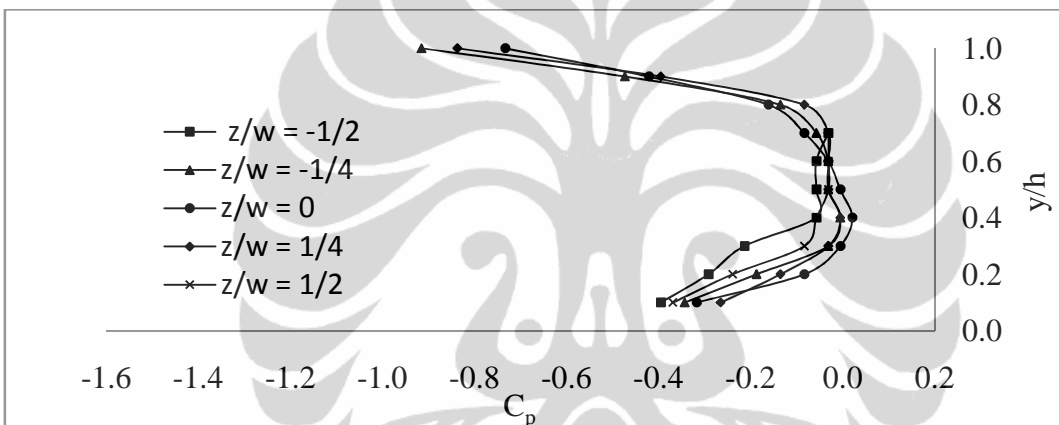
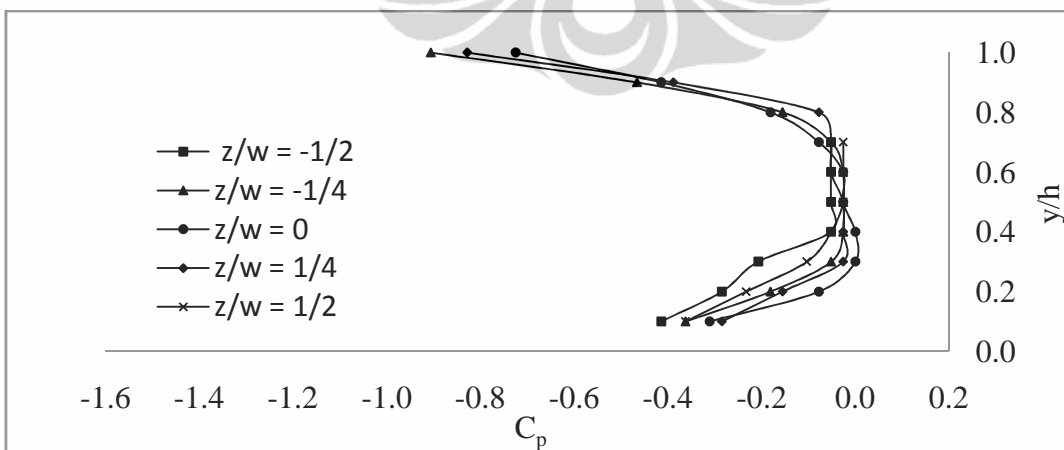
Gambar 4.18 Distribusi koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Kontrol aliran berupa *suction* dengan kecepatan 0.5 m/s yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan 3 (tiga) tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s memberikan pengaruh terhadap koefisien tekanan dan hal tersebut diperlihatkan pada Gb. 4.19. Nilai minimum koefisien tekanan yang diperoleh dari Gb. 4.19 dengan penempatan *suction* yang mempunyai kecepatan 0.5 m/s pada bagian belakang *reversed Ahmed body* berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$, dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Nilai minimum koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-0.9175
2	13.9	-0.9157
3	16.7	-0.9060

Pada Gb. 4.17(a-c), 4.18(a-c) dan 4.19(a-c) terlihat bahwa pengaruh dari penambahan kontrol aliran *suction* yang diletakkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* yang merupakan daerah dimana separasi dan olakan terbentuk adalah meningkatnya nilai koefisien tekanan statik pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* untuk kecepatan *suction* 1.5 m/s, 1.0 m/s dan 0.5 m/s. Hal tersebut terlihat pada Tabel 4.9, 4.10 dan 4.11, dimana nilai koefisien tekanan statik minimum mengalami peningkatan. Untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, peningkatan nilai koefisien tekanan statik terbesar terjadi pada kecepatan *suction* 0.5 m/s, yaitu sebesar 30.31%. Sedangkan untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s, nilai koefisien tekanan statik terbesar masing-masing adalah 31.76% dan 32.29% yang terjadi pada kecepatan *suction* yang sama 0.5 m/s. Hal ini tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Roumeas et al (2009) dimana penggunaan kontrol aliran *suction* mampu mengurangi *total pressure loss* dan meningkatnya tekanan statik pada dinding belakang model *Ahmed body*. Demikian pula yang dilakukan Krajnovics dan Fernandes (2011), bahwa kontrol aktif aliran yang ditempatkan pada tepi bagian belakang model kendaraan mampu menaikkan tekanan dasar.

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.19 Distribusi koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

c. Dengan Kontrol Aliran *Blowing*

Kontrol aliran *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan kecepatan 1.5 m/s mempengaruhi distribusi koefisien tekanan yang diperoleh dengan 3 (tiga) tingkat kecepatan *upstream* yang berbeda yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 4.26. Nilai minimum koefisien tekanan yang diperoleh dari Gb. 4.20 berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = 0$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s. Untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s terletak pada lokas yang sama yaitu $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$, diperlihatkan pada Tabel 4.12.

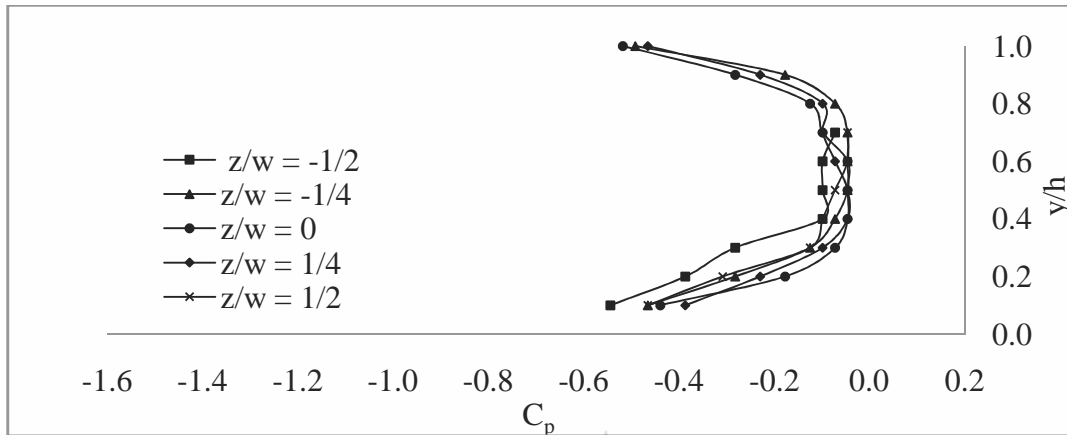
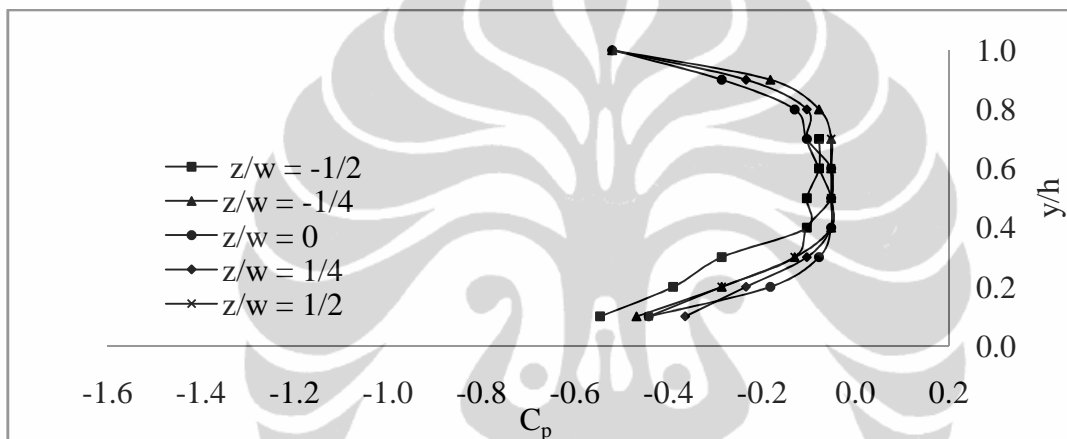
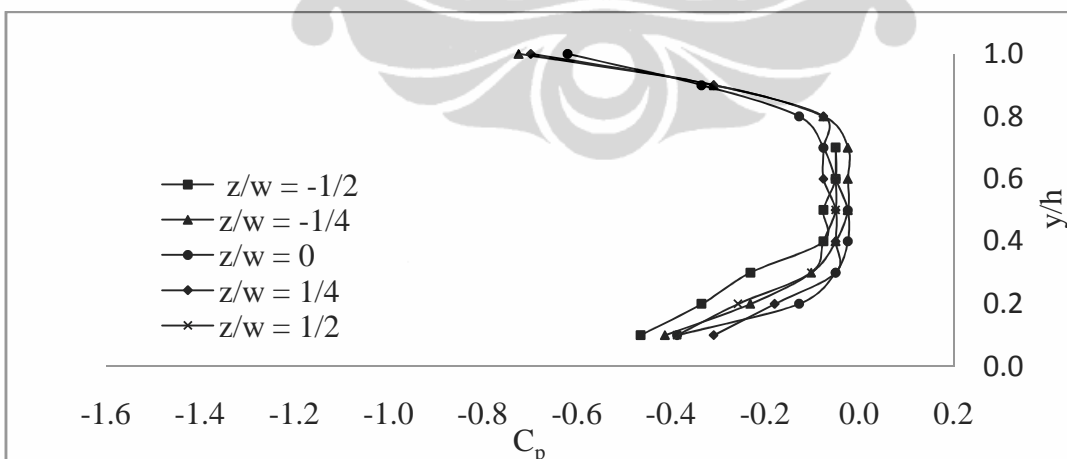
Tabel 4.12 Nilai minimum koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-0.5178
2	13.9	-0.5207
3	16.7	-0.7233

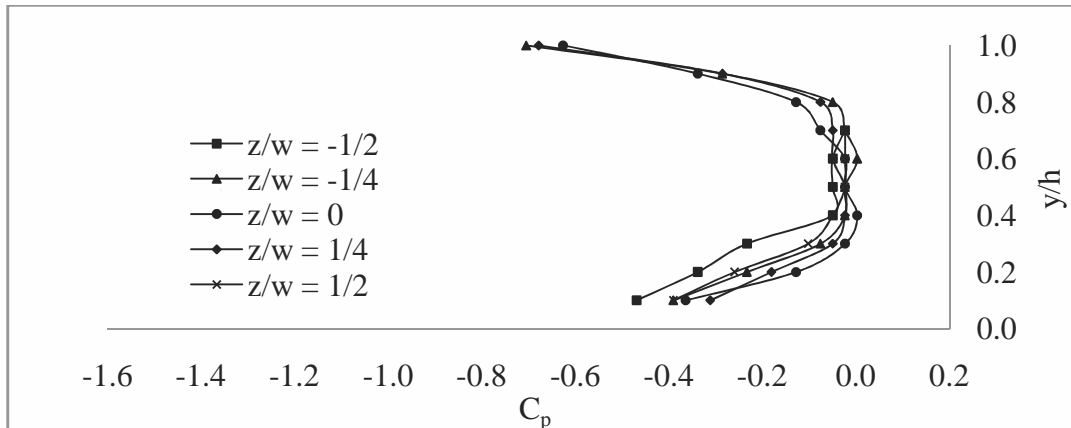
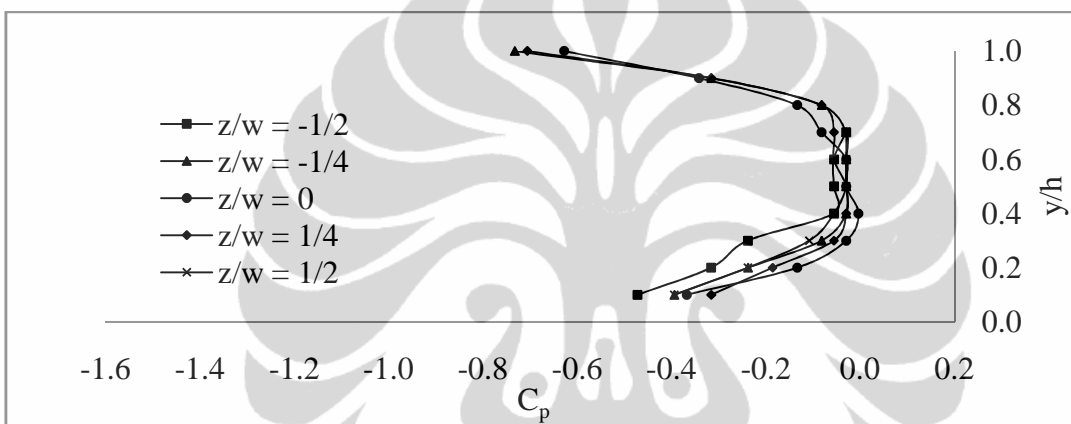
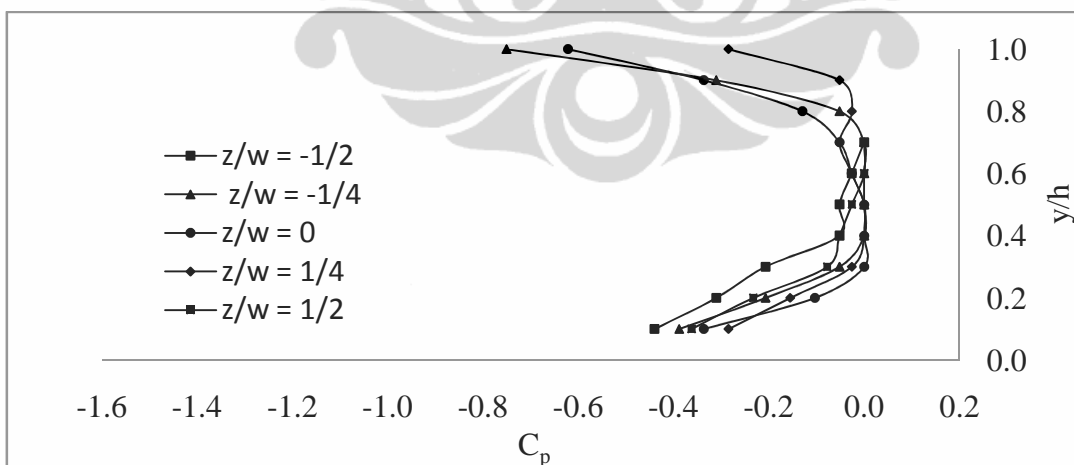
Penempatan kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan kecepatan *upstream* yang berbeda yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang tampak pada Gb. 4.21 memberikan pengaruh terhadap distribusi koefisien tekanan. Pada Gb. 4.21 diperoleh nilai minimum koefisien tekanan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* yang berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$ ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Nilai minimum koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-0.7049
2	13.9	-0.7322
3	16.7	-0.7510

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.20 Distribusi koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

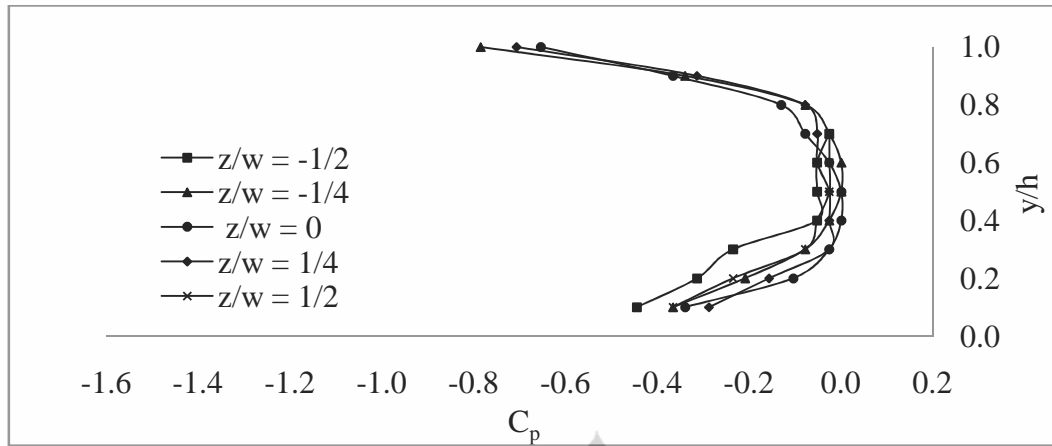
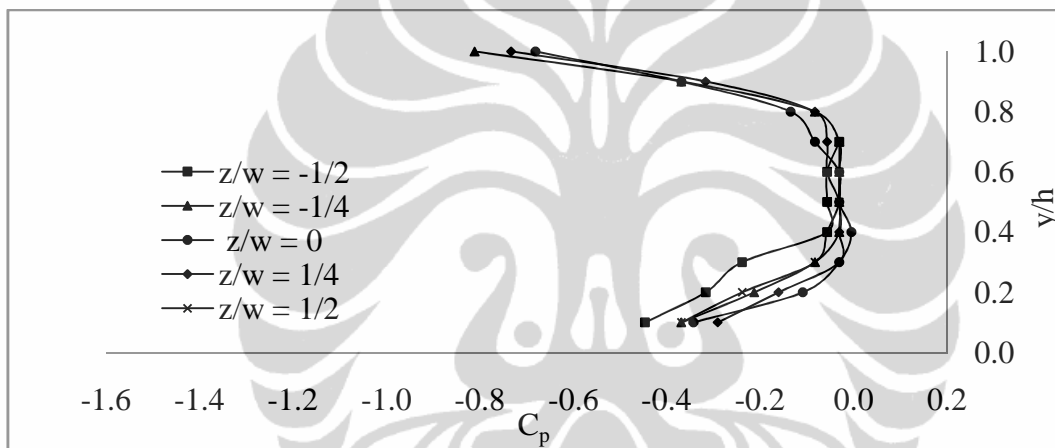
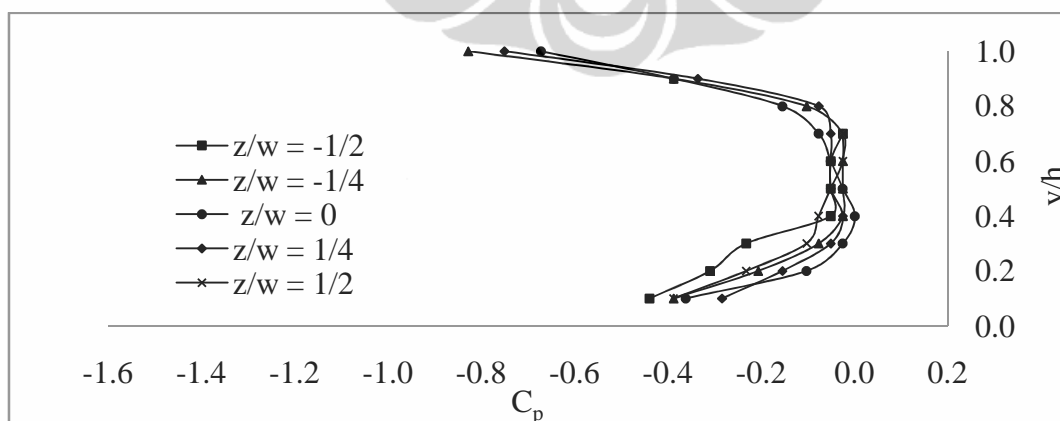
Gambar 4.21 Distribusi koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Demikian pula halnya, dari Gb. 4.22 memberikan gambaran pengaruh penempatan *blowing* dengan kecepatan 0.5 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap distribusi koefisien tekanan dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Dan pada Gb. 4.22 nilai minimum koefisien tekanan yang diperoleh berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$, diberikan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Nilai minimum koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-0.7851
2	13.9	-0.8111
3	16.7	-0.8279

Demikian pula untuk penambahan kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 1,5 m/s, 1 m/s dan 0.5 m/s yang penempatannya pada posisi yang sama untuk kontrol aliran *suction* memberikan pengaruh yang signifikan dimana pada Gb. 4. 20(a-c), 4.21(a-c) dan 4.22(a-c) nampak bahwa nilai koefisien tekanan statik semakin meningkat. Pada Tabel 4.12, 4.13 dan 4.14 terlihat bahwa nilai minimum koefisien tekanan mengalami peningkatan. Pada 3 (tiga) kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, peningkatan nilai koefisien tekanan terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* yang sama yaitu 1.5 m/s dengan persentase kenaikan sebesar 60.69% untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 61.20% untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s, dan 46.64% untuk kecepatan *upstream* $U_o=16.7$ m/s. Hal tersebut sejalan juga dengan penelitian yang dilakukan Roumeas, et al (2009), dimana efek *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang model adalah mampu mengurangi *total pressure loss* dan meningkatkan tekanan statik pada bagian belakang *generic squareback bluff body*.

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.22 Distribusi koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

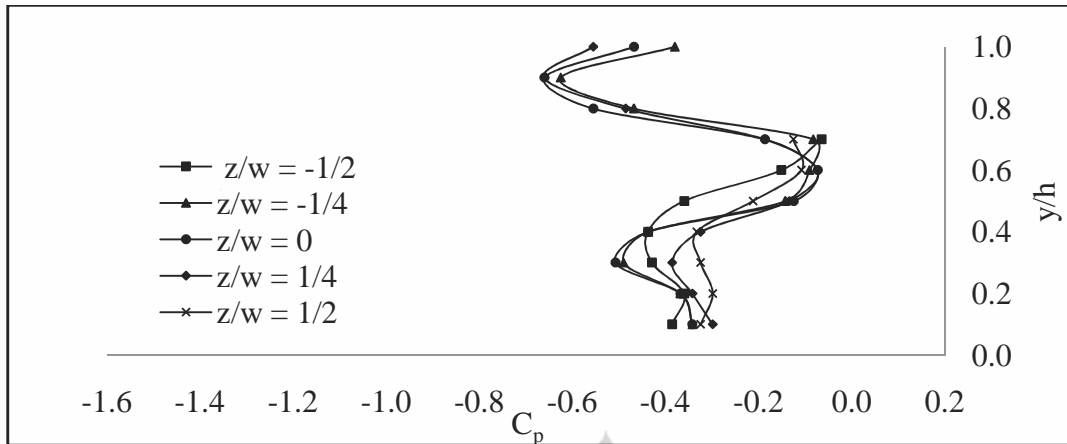
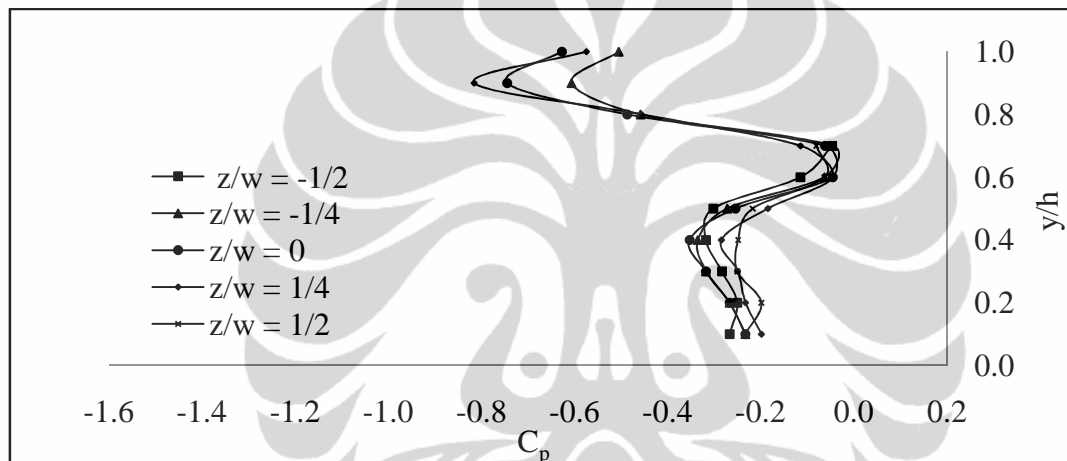
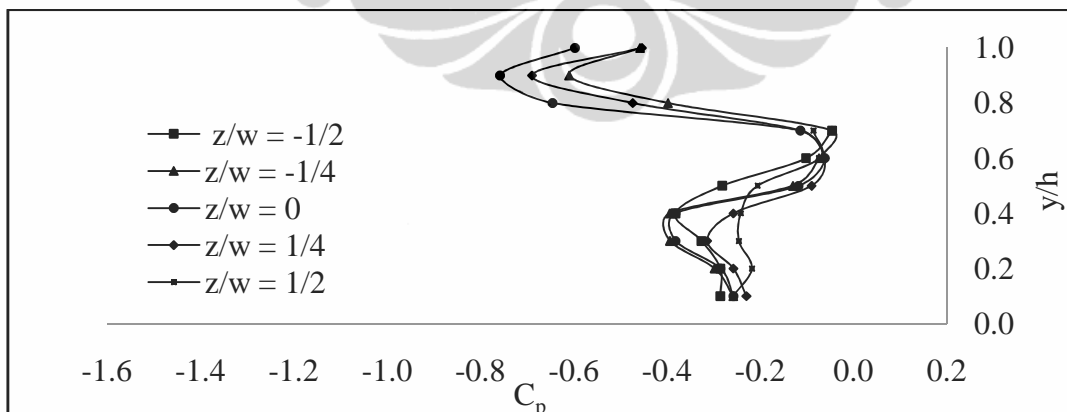
d. Dengan Kontrol Aliran *Synthetic Jet*

Penempatan kontrol aliran *synthetic jet* dengan kecepatan 2 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* mempengaruhi distribusi koefisien tekanan yang diperoleh dengan 3 (tiga) tingkat kecepatan *upstream* yang berbeda yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 4.23. Nilai minimum koefisien tekanan yang diperoleh dari Gambar 4.23 berlokasi pada $y/h = 0.9$ dan $z/w = -1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s, sedangkan untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s berlokasi pada $y/h = 0.9$ dan $z/w = 0$. Nilai minimum koefisien tekanan tersebut dirangkum pada Table 4.15.

Tabel 4.15 Nilai minimum koefisien tekanan dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien tekanan, C_p
1	11.1	-0.6607
2	13.9	-0.8158
3	16.7	-0.7585

Pengaruh dari penambahan kontrol aliran berupa *synthetic jet* yang diletakkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* yang merupakan daerah dimana separasi dan olakan terbentuk seperti yang terlihat pada Gb. 4.23(a-c) adalah meningkatnya nilai koefisien tekanan statik pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* untuk kecepatan *synthetic jet* 2 m/s. Hal tersebut terlihat pada Tabel 4.15, dimana nilai koefisien tekanan statik minimum mengalami kenaikan. Peningkatan nilai koefisien tekanan statik terbesar terjadi pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s, yaitu sebesar 49.84%. Sedangkan untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s, nilai koefisien tekanan statik masing-masing adalah 31.21% dan 44.04%.

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.23 Distribusi koefisien tekanan dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

4.2.3 Intensitas Turbulensi

a. Tanpa Kontrol Aliran

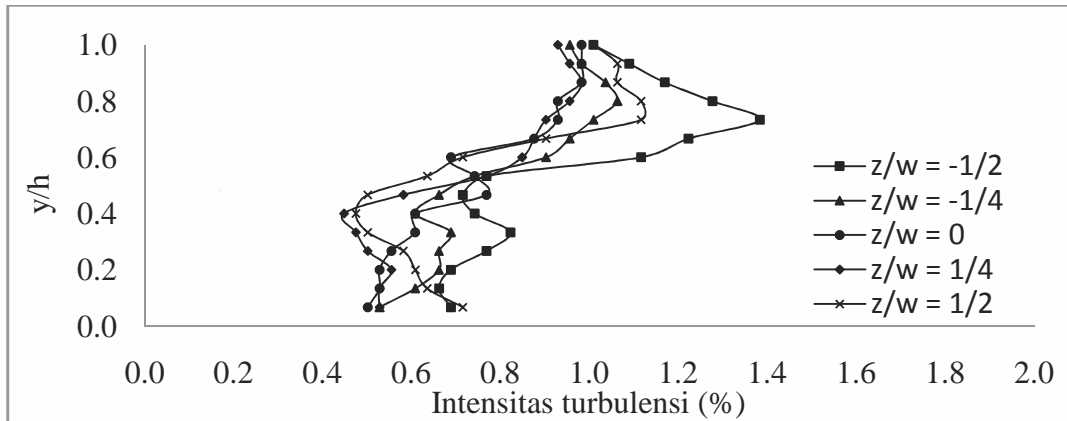
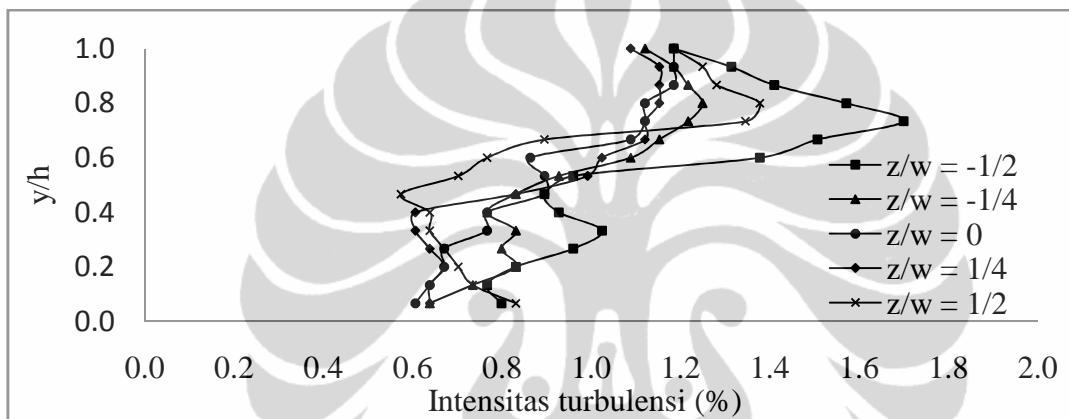
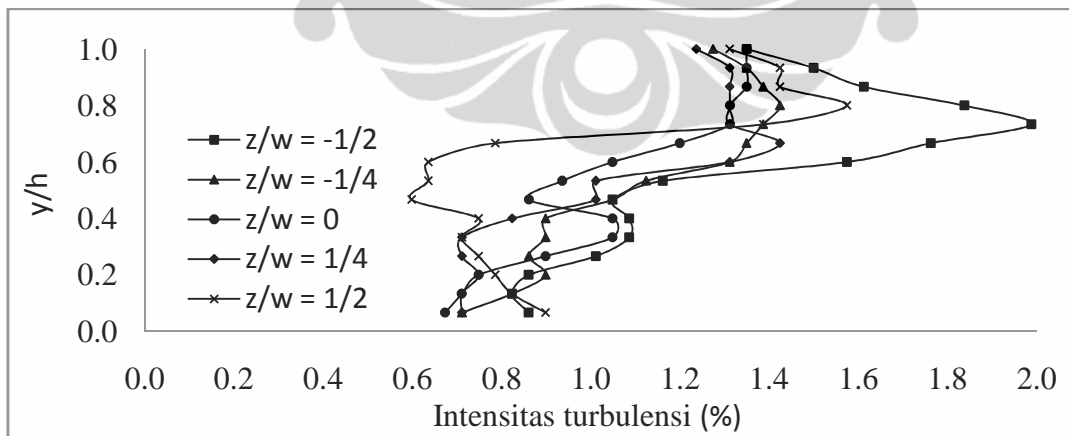
Gb. 4.24 menunjukkan hasil komputasi untuk turbulensi intensitas tanpa kontrol aktif aliran pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan 3 (tiga) tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Nilai maksimum intensitas turbulensi yang diperoleh dari Gb. 4.24 tanpa kontrol aliran berlokasi pada $y/h = 0.73$ dan $z/w = -1/2$, dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Nilai maksimum intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.38
2	13.9	1.70
3	16.7	1.99

Pada daerah *downstream* dari *reversed Ahmed body* yang ditunjukkan oleh medan aliran nampak bahwa adanya suatu struktur olakan yang terbentuk. Parameter intensitas turbulensi untuk menyatakan secara kuantitatif besaran dari struktur olakan ini yang merupakan gambaran turbulensi yang terjadi dalam aliran dengan variasi kecepatan *upstream*. Intensitas turbulensi yang dikaji merupakan besaran yang terdapat pada bagian belakang dari model *reversed Ahmed body*.

Analisa intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran yang ditampilkan dalam Gb. 4.24 dan nilai maksimum intensitas turbulensi dalam Tabel 4.16. memperlihatkan bahwa untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi adalah 1.38% yang terletak pada titik $y/h = 0.73$ dan $z/w = -1/2$. Sedangkan untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s, nilai maksimum intensitas turbulensi masing-masing adalah 1.7% dan 1.99% dan terletak pada titik yang sama seperti pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s.

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.24 Intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Nilai maksimum dari intensitas turbulensi ini meningkat sesuai dengan meningkatnya kecepatan *upstream* pada model *reversed Ahmed body*. Hal ini juga berkaitan dengan struktur pusaran yang terjadi seperti yang terlihat dan dibandingkan pada Gb. 4.15, dimana pusaran yang terjadi meningkat sesuai dengan kenaikan kecepatan *upstream*.

b. Dengan Kontrol Aliran *Suction*

Penempatan kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan kecepatan *upstream* yang berbeda yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang tampak pada Gb. 4.25. memberikan pengaruh terhadap intensitas turbulensi. Pada Gb. 4.25 diperoleh nilai maksimum intensitas turbulensi pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s

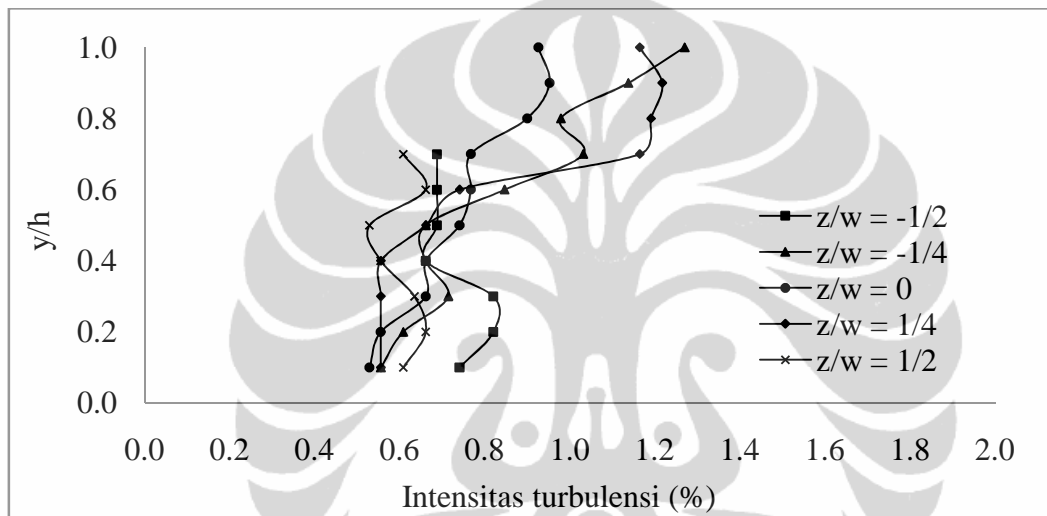
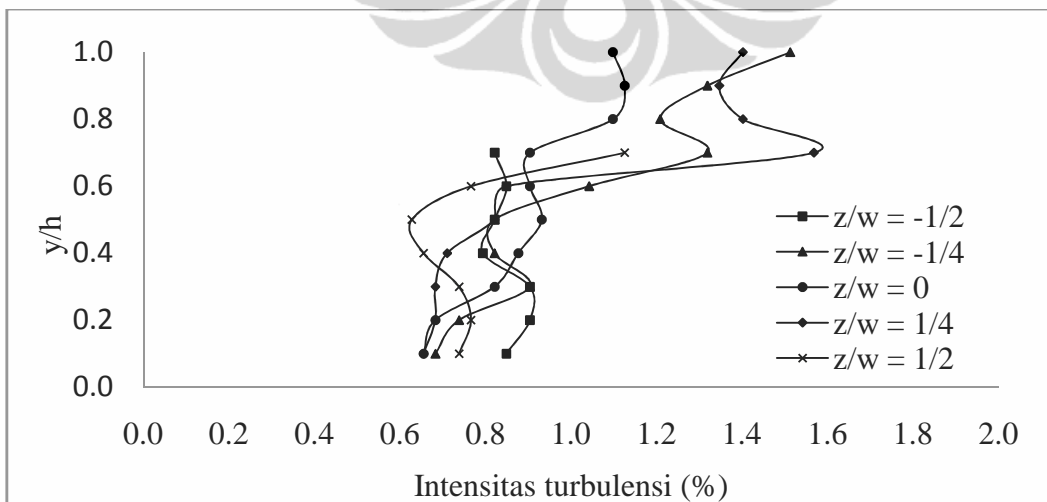
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.269
2	13.9	1.512
3	16.7	1.705

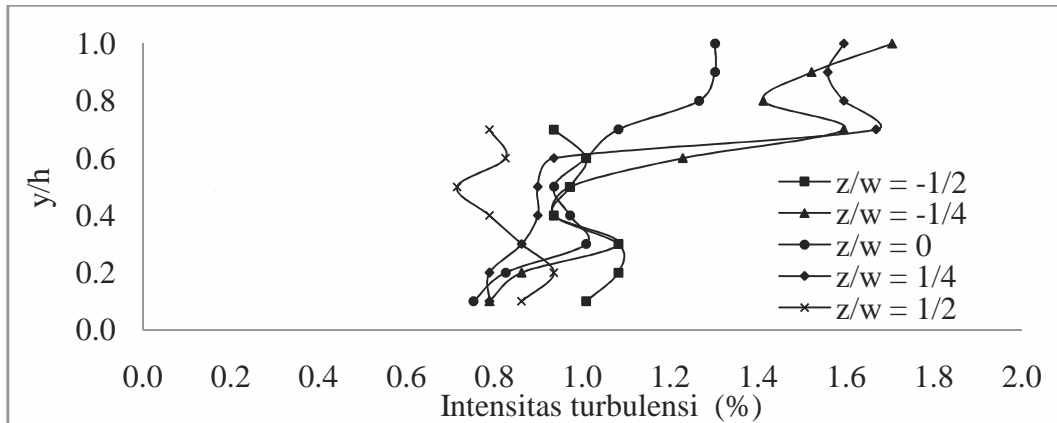
Intensitas turbulensi dengan kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s yang ditampilkan dalam Gb. 4.25 dan nilai maksimum intensitas turbulensi dalam Tabel 4.17 memperlihatkan bahwa nilai maksimum intensitas turbulensi untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s adalah 1.269%, 1.512% dan 1.705% yang terletak pada titik $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$.

Gb. 4.26 memperlihatkan pengaruh kontrol aliran *suction* yang dipasang pada bagian belakang *reversed Ahmed body* dengan kecepatan 1.0 m/s terhadap intensitas turbulensi dengan 3 (tiga) tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Nilai maksimum intensitas turbulensi yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 4.18 berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$.

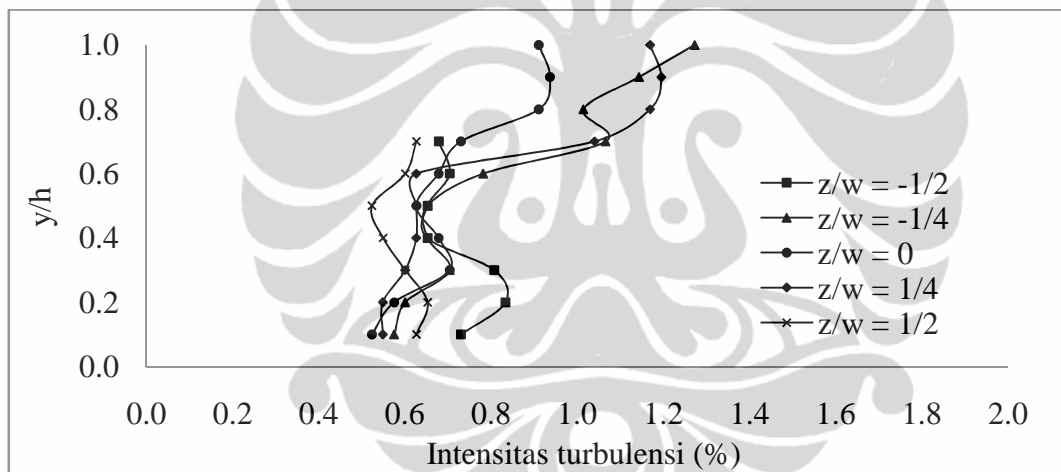
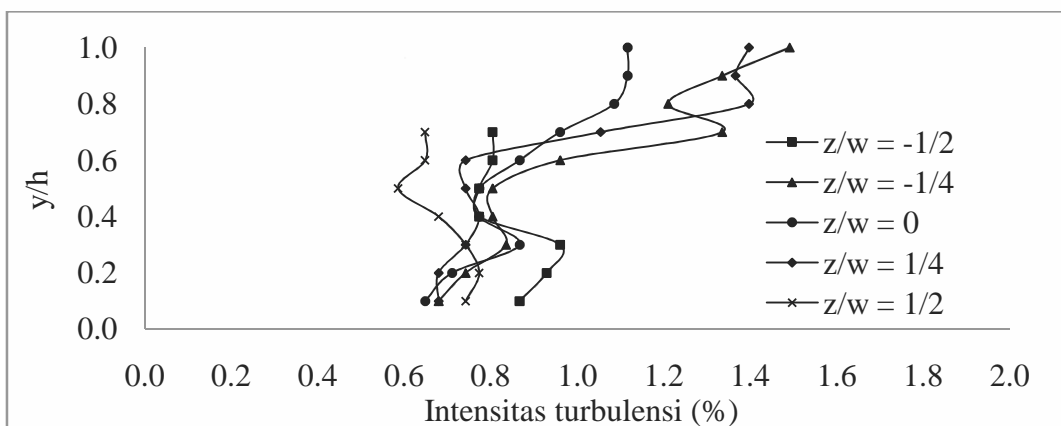
Tabel 4.18 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s

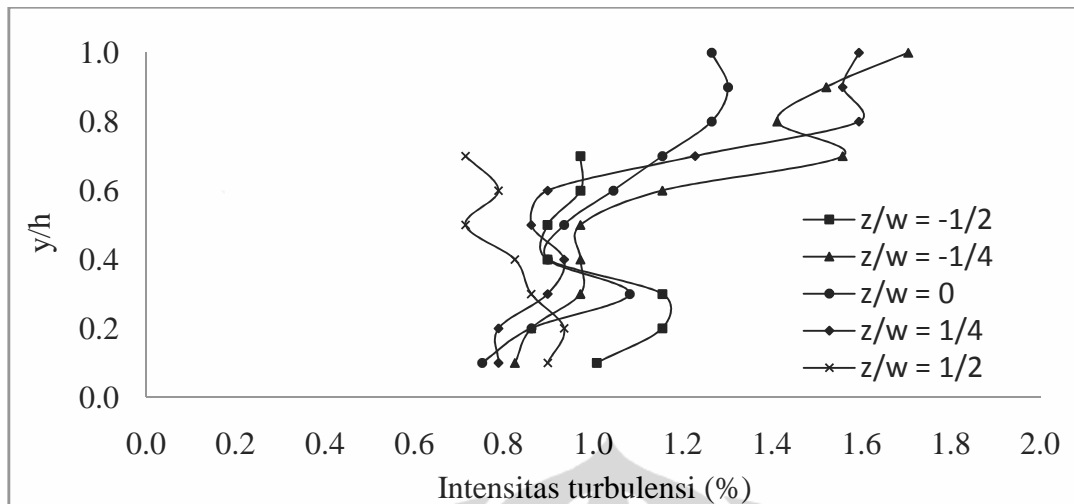
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.272
2	13.9	1.490
3	16.7	1.704

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s

(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.25 Intensitas turbulensi dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s

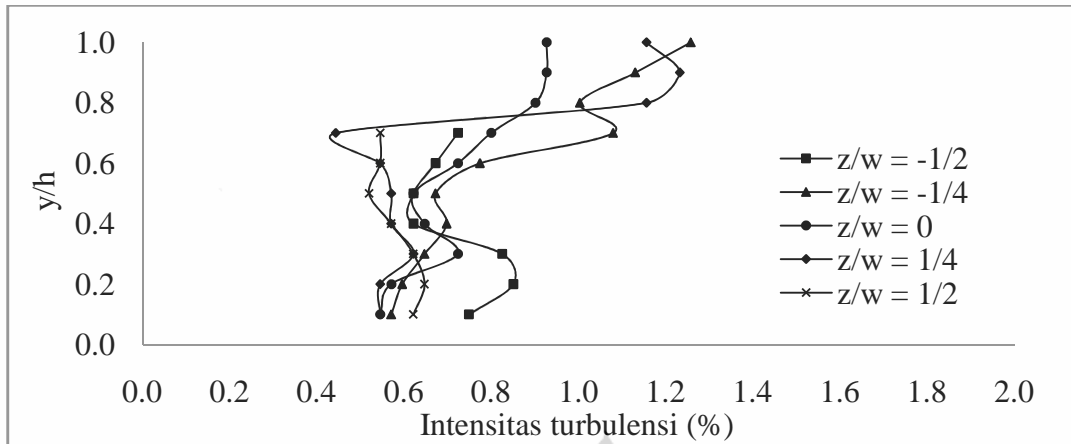
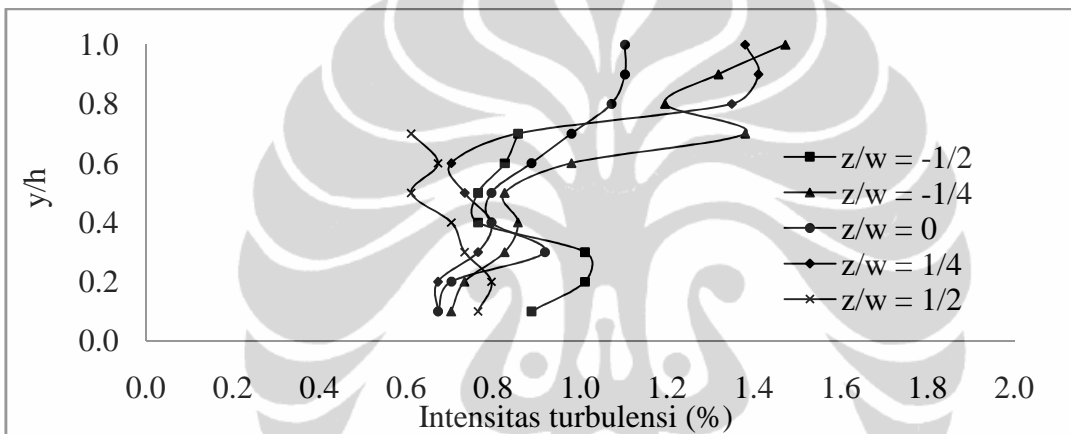
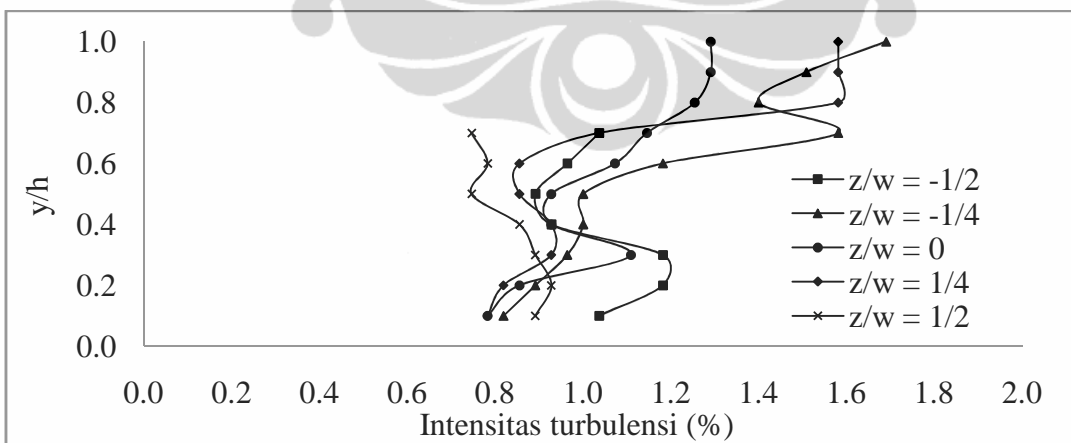
(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.26 Intensitas turbulensi dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Pengaruh penempatan kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 0.5 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan *upstream* adalah 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti terlihat pada Gb. 4.27. Tabel 4.19 memperlihatkan nilai maksimum intensitas turbulensi yang diperoleh akibat pengaruh penempatan *suction* dengan kecepatan 0.5 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* yang berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$.

Tabel 4.19 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.257
2	13.9	1.472
3	16.7	1.690

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.27 Intensitas turbulensi dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Pada Gb. 4.25(a-c), 4.26(a-c) dan 4.27(a-c) nampak bahwa penempatan kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s, 1.0 m/s dan 0.5 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengurangan nilai intensitas turbulensi maksimum untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Tabel 4.17, 4.18 dan 4.19 untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, pengurangan intensitas turbulensi maksimum terjadi untuk kecepatan *suction* 0.5 m/s yaitu sebesar 9.09%. Untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi paling tinggi masing-masing adalah 13.37% dan 14.94% yang terjadi pada kecepatan *suction* yang sama yaitu 0.5 m/s. Hal lain yang dapat diamati adalah terjadi pergeseran lokasi dimana nilai maksimum intensitas turbulensi terjadi karena adanya pengaruh kontrol aliran *suction*. Lokasi pergeseran nilai maksimum intensitas turbulensi dari model *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran pada posisi $y/h = 0.73$ dan $z/w = -1/2$, cenderung bergeser ke posisi $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$ dengan adanya penempatan kontrol aliran *suction*.

c. Dengan Kontrol Aliran *Blowing*

Penempatan kontrol aliran *blowing* pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan kecepatan 1.5 m/s memberikan pengaruh terhadap intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang tampak pada Gb. 4.34. Dan pada Gb. 4.28 diperoleh nilai maksimum intensitas turbulensi yang berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s berlokasi $y/h = 0.9$ dan $z/w = -1/4$ dan 16.7 m/s berlokasi $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$ dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.182
2	13.9	1.596
3	16.7	1.631

Kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan 3 (tiga) tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s memberikan pengaruh terhadap intensitas turbulensi dan diperlihatkan pada Gb. 4.29. Nilai maksimum intensitas turbulensi yang diperoleh dari Gambar 4.29, berlokasi pada $y/h = 0.9$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s serta pada $y/h = 1$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s, terlihat pada Tabel 4.21.

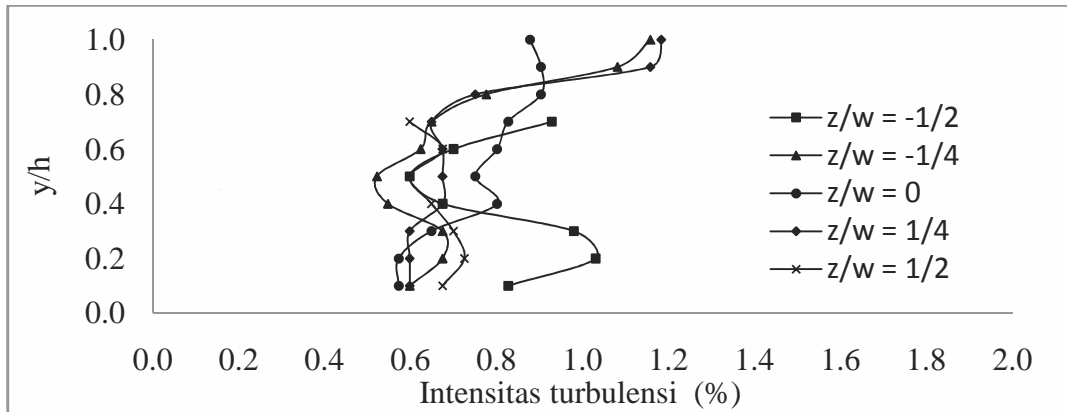
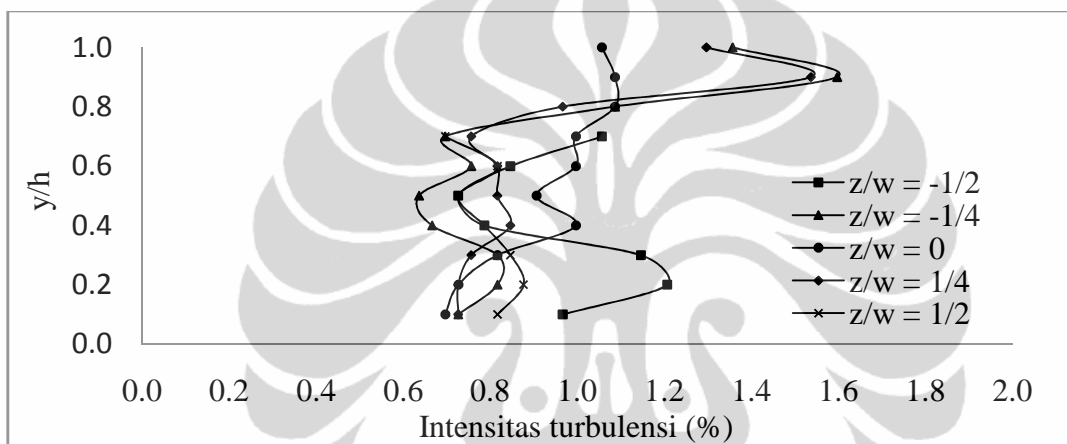
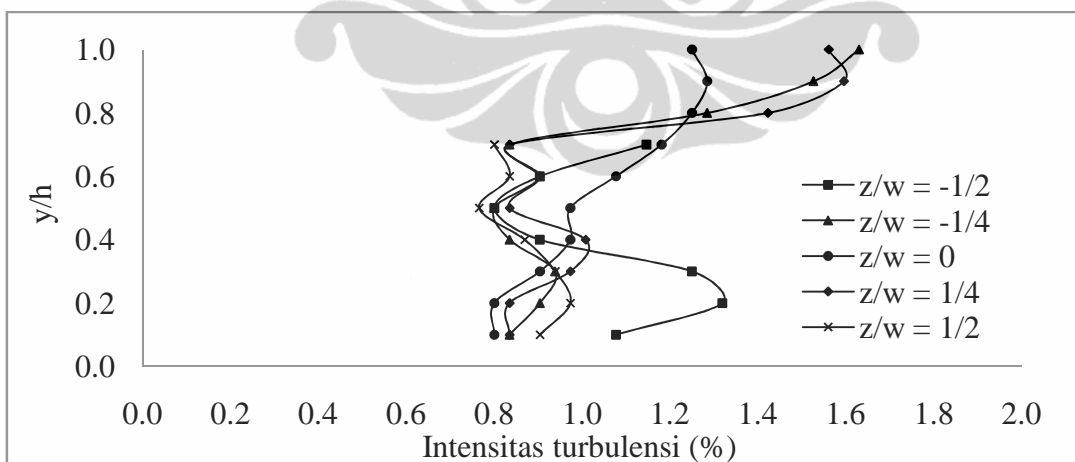
Tabel 4.21 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.360
2	13.9	1.475
3	16.7	1.630

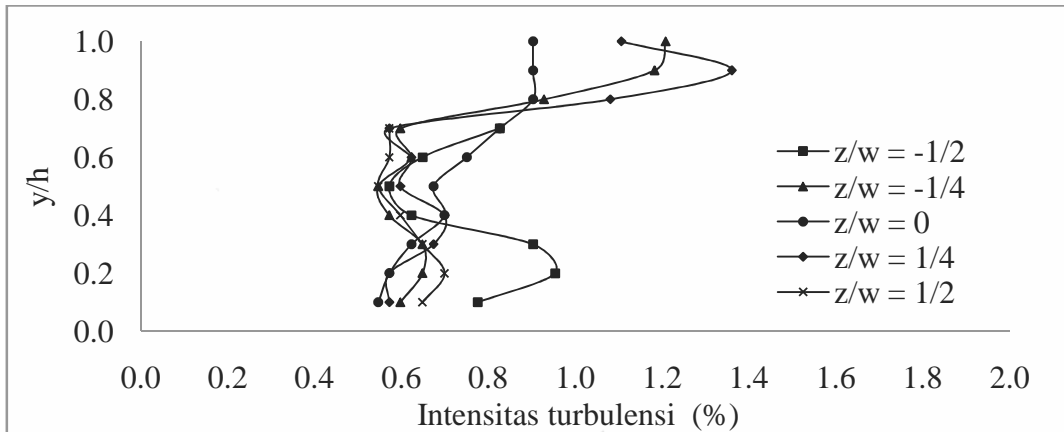
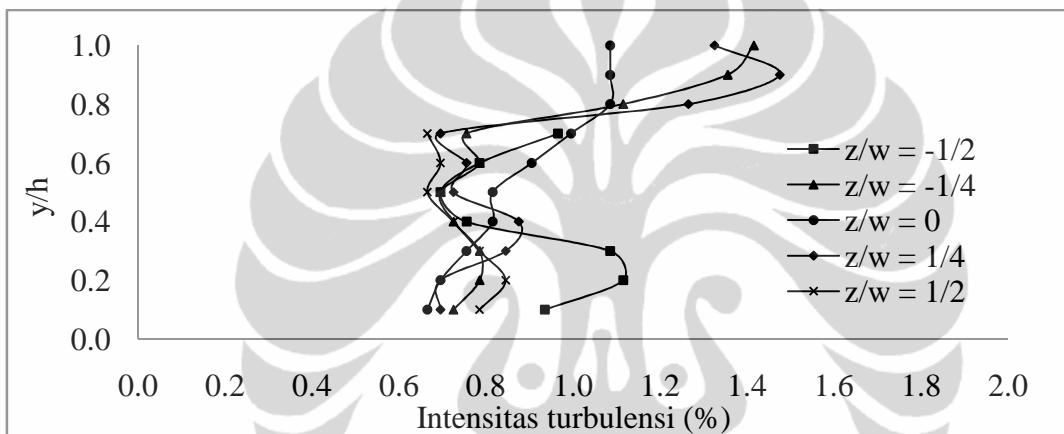
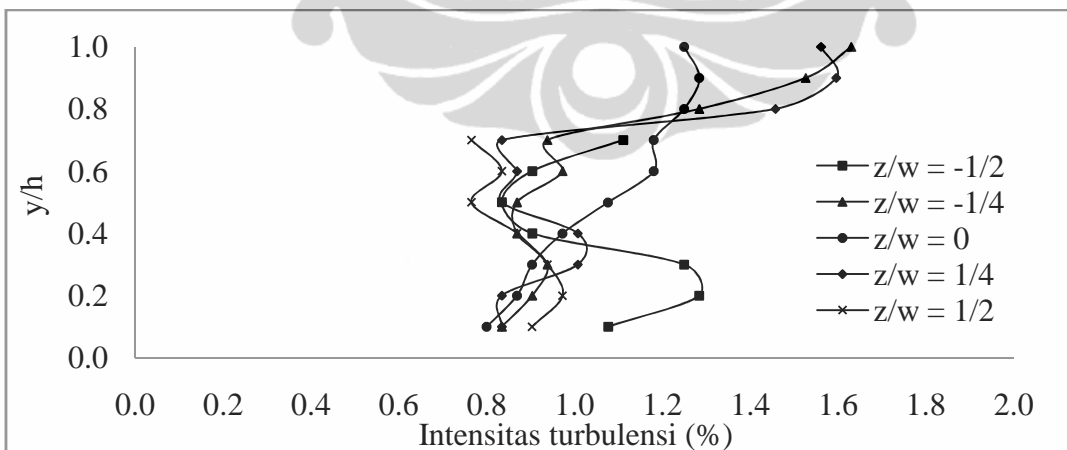
Demikian pula halnya, Gb. 4.30 memperlihatkan pengaruh penempatan *blowing* dengan kecepatan 0.5 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap intensitas turbulensi dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Dan pada Gb. 4.36 nilai maksimum intensitas turbulensi yang diperoleh berlokasi pada $y/h = 0.9$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s serta pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$ untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s diberikan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s

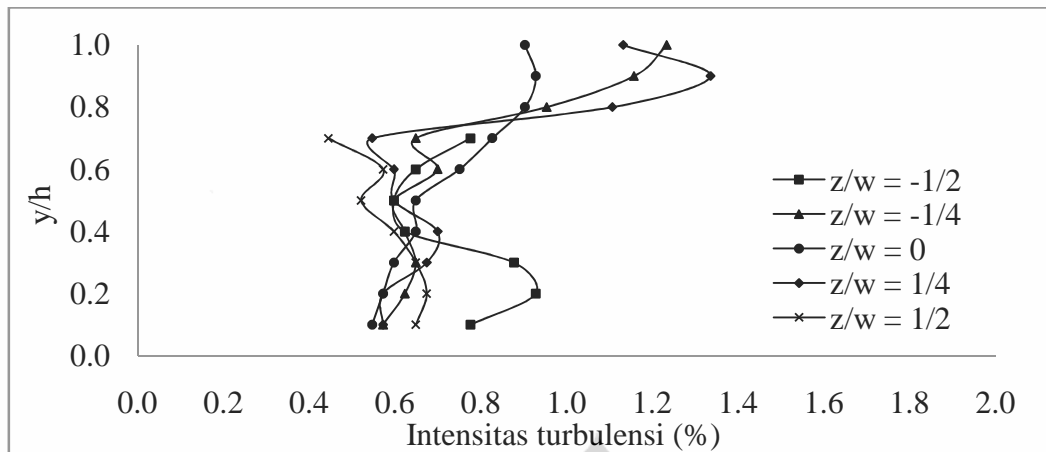
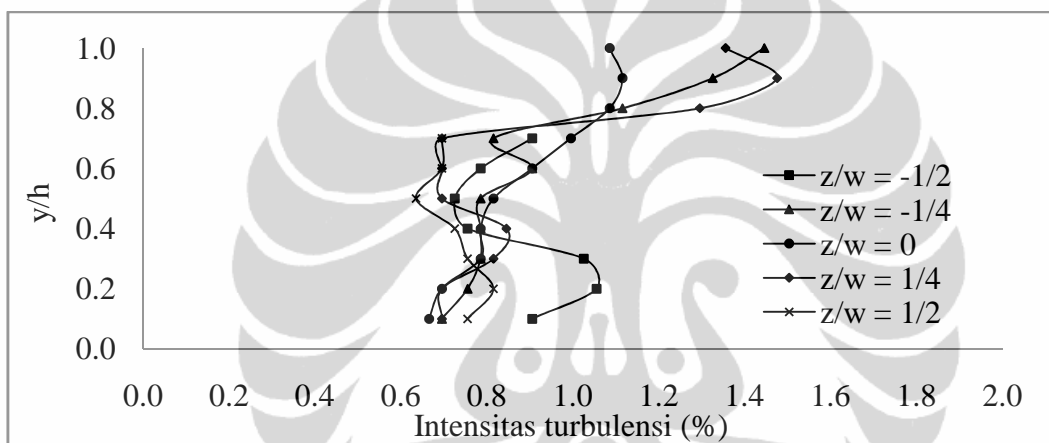
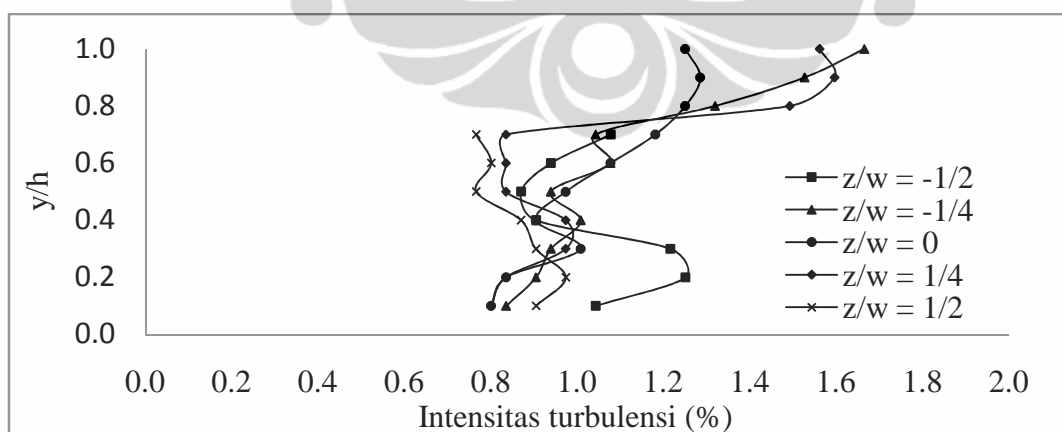
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.334
2	13.9	1.475
3	16.7	1.665

(a). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.28 Intensitas turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

(a). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_0 = 16.7$ m/s

Gambar 4.29 Intensitas turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl} = 1$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.30 Intensitas turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Penambahan kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 1.5 m/s, 1 m/s dan 0.5 m/s yang penempatannya pada lokasi yang sama dengan kontrol aliran *suction* juga mengakibatkan terjadinya pengurangan nilai intensitas turbulensi, seperti yang tampak pada Gb. 4.28, 4.29 dan 4.30. Pada Tabel 4.20, 4.21 dan 4.22 pengurangan nilai intensitas turbulensi terbesar untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, terjadi pada kecepatan *blowing* 1.5 m/s yaitu sebesar 14.51%. Pada kecepatan *upstream* $U_0=13.9$ m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* 1.0 m/s yaitu sebesar 13.37%. Pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada kecepatan *blowing* 1.0 m/s yaitu sebesar 17.98%.

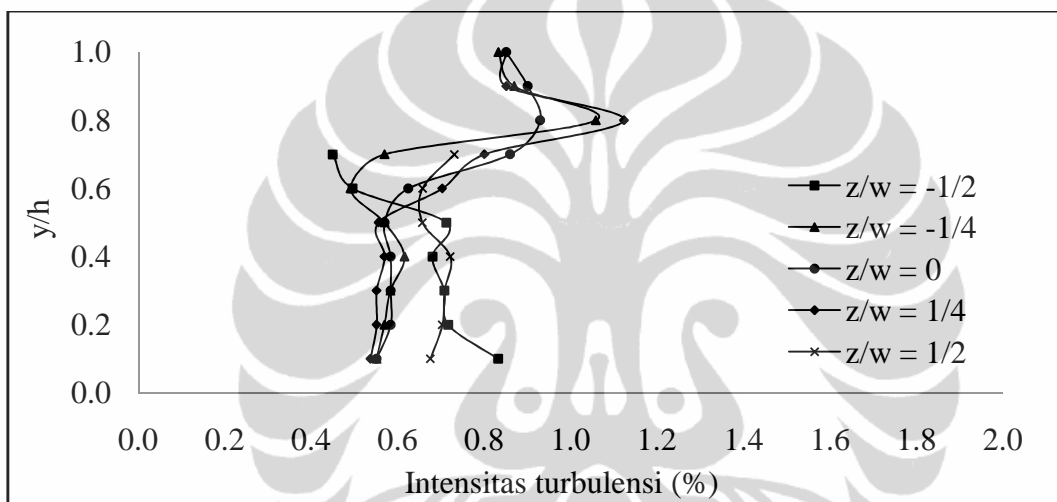
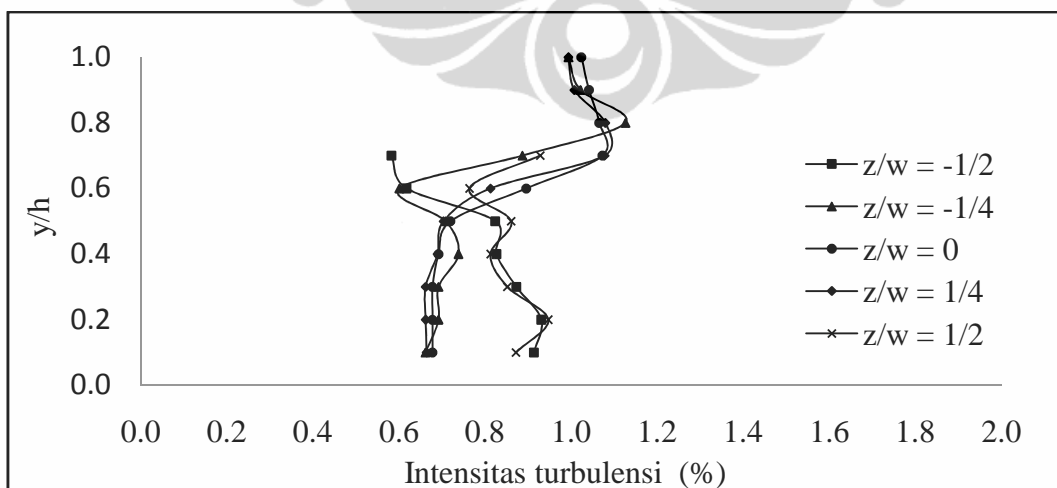
Lokasi terjadinya nilai maksimum intensitas turbulensi dari model *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran pada posisi $y/h = 0.73$ dan $z/w = -1/2$ mengalami pergeseran yang berbeda untuk masing-masing kecepatan *blowing*. Pada kecepatan *blowing* 1.5 m/s, cenderung berlokasi pada $y/h = 1$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s; $y/h = 0.9$ dan $z/w = -1/4$ untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$ untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s. Untuk kecepatan *blowing* 1.0 m/s, lokasi pergeserannya terjadi pada $y/h = 0.9$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s serta pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$ untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s. Dan untuk kecepatan *blowing* 0.5 m/s, terletak pada lokasi $y/h = 0.9$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s serta pada $y/h = 1$ dan $z/w = -1/4$ untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s.

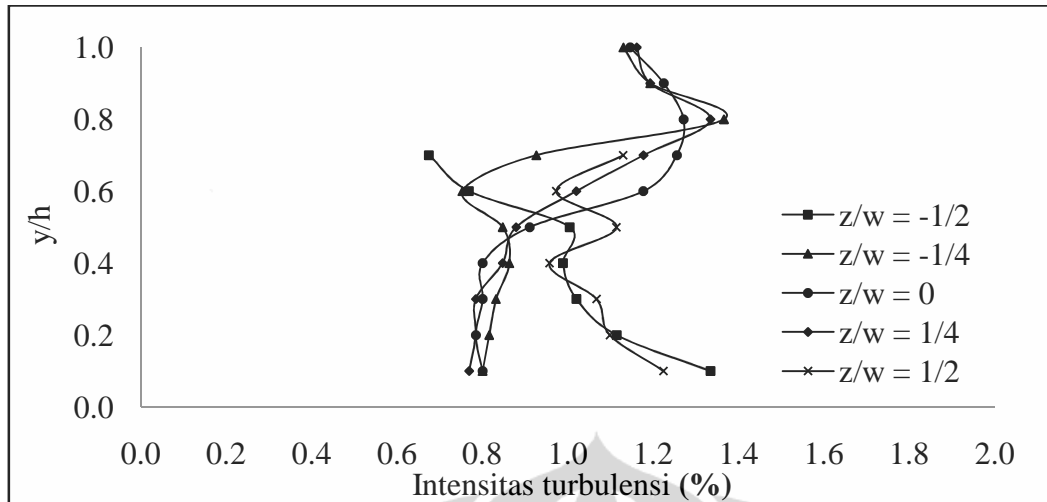
d. Dengan Kontrol Aliran *Synthetic Jet*

Kontrol aliran *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan kecepatan 2 m/s memberikan pengaruh terhadap intensitas turbulensi dengan variasi kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s, seperti yang terlihat pada Gb. 4.31. Dan pada Gb. 4.37 diperoleh nilai maksimum intensitas turbulensi yang berlokasi pada $y/h = 0.8$ dan $z/w = 1/4$ untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s; $y/h = 0.8$ dan $z/w = -1/4$ untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s dapat dilihat pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2$ m/s

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Intensitas turbulensi, (%)
1	11.1	1.12
2	13.9	1.13
3	16.7	1.37

(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s

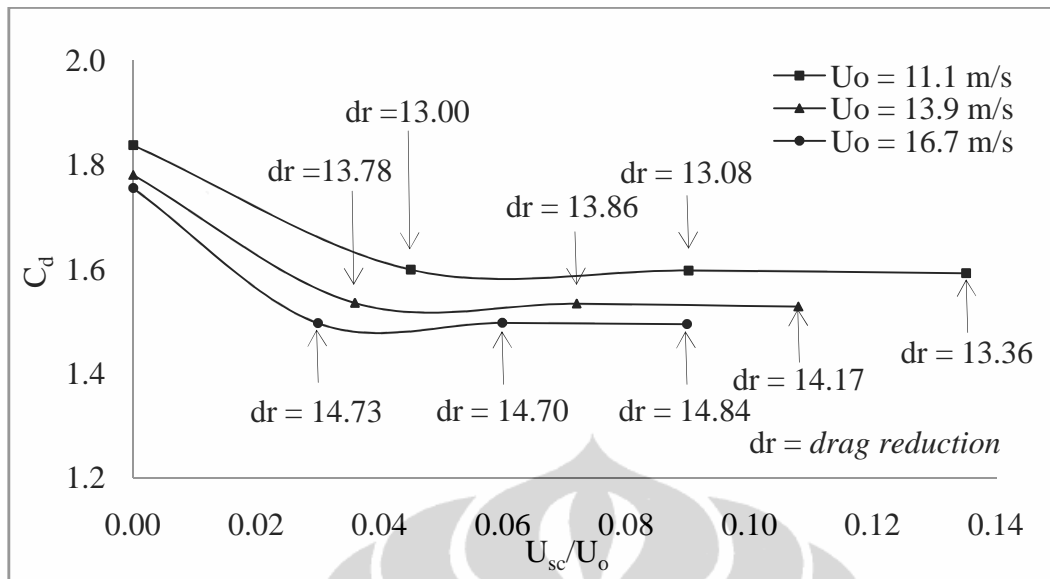
(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/s

Gambar 4.31 Intensitas turbulensi dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2$ m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Penempatan kontrol aliran berupa *synthetic jet* dengan kecepatan 2 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengurangan nilai intensitas maksimum untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s seperti yang nampak pada Gb. 4.31. Pada Tabel 4.24 pengurangan intensitas turbulensi maksimum terjadi untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, yaitu sebesar 18.80%. Untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 16.7 m/s, pengurangan nilai intensitas turbulensi paling tinggi masing-masing adalah 33.76% dan 31.29%. Hal lain yang dapat diamati adalah terjadi pergeseran lokasi dimana nilai maksimum intensitas turbulensi terjadi karena adanya pengaruh kontrol aliran *synthetic jet*. Lokasi pergeseran nilai maksimum intensitas turbulensi dari model *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran pada posisi $y/h = 0.73$ dan $z/w = -1/2$, cenderung bergeser ke posisi $y/h = 0.8$ dan $z/w = -1/4$ dengan adanya penempatan kontrol aliran *synthetic jet*.

4.2.4 Drag Aerodinamika

Koefisien drag sebagai fungsi kecepatan *suction* yang merupakan hasil dari komputasi untuk variasi 3 (tiga) kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s ditampilkan pada Gb. 4.32. Dan pada Gb. 32 tersebut terlihat nilai koefisien drag dan pengurangan drag yang diperoleh dirangkum dalam Tabel 4.24 dan 4.25.



Gambar 4.32 Koefisien drag sebagai fungsi kecepatan *suction*, *CFD*

Gb. 4.32 dan data yang ditampilkan pada Tabel 4.24 dan 4.25 menunjukkan bahwa terdapat pengaruh dari penambahan kontrol aliran berupa *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s, 1.0 m/s dan 0.5 m/s yang dipasang pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap nilai koefisien *drag* rata-rata dan pengurangan *drag* dengan peningkatan kecepatan *upstream* yang diberikan yaitu 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s. Untuk model *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran, koefisien *drag* terkecil terjadi pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s yaitu 1.756. Hal ini terjadi karena gaya *drag* terbesar yang diterima model *reversed Ahmed body* terjadi pada kecepatan *upstream* yang lebih besar yaitu 16.7 m/s yaitu sebesar 1.172 N.

Pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s, *suction* diberikan dengan kenaikan $0.045 U_{sc}/U_o$, pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *suction* 1.5 m/s atau $U_{sc}/U_o = 0.135$ yaitu 13.36%. Pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s, *suction* diberikan dengan kenaikan $0.036 U_{sc}/U_o$, pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *suction* 1.5 m/s atau $U_{sc}/U_o = 0.108$ yaitu 14.17%. Pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s, *suction* diberikan dengan kenaikan $0.030 U_{sc}/U_o$, dan pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *suction* 1.5 m/s atau $U_{sc}/U_o = 0.090$ yaitu 14.84%. Pengurangan *drag* maksimum yang diperoleh pada masing-masing kecepatan *upstream* sejalan dengan peningkatan koefisien tekanan dan pengurangan intensitas turbulensi.

Tabel 4.24 Nilai koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *suction*, CFD

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien <i>drag</i> , C_d			
		Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>suction</i> , U_{sc} (m/s)		
			0.5	1	1.5
1	11.1	1.838	1.599	1.598	1.593
2	13.9	1.781	1.536	1.534	1.529
3	16.7	1.756	1.497	1.498	1.495

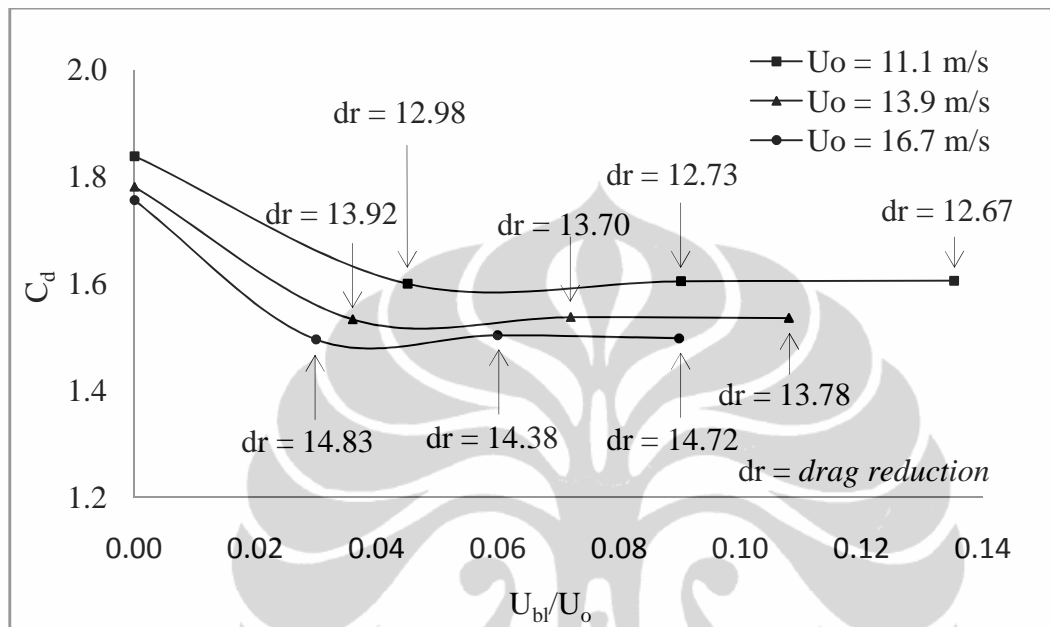
Tabel 4.25 Nilai pengurangan *drag* (*drag reduction*) dengan *suction*, CFD

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Pengurangan <i>drag</i> (%)		
		Kecepatan <i>suction</i> , U_{sc} (m/s)		
		0.5	1	1.5
1	11.1	13.00	13.08	13.36
2	13.9	13.78	13.86	14.17
3	16.7	14.73	14.70	14.84

Gb. 4.33 memperlihatkan hasil komputasi untuk koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *blowing* dengan 3 (tiga) kecepatan *upstream*, masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* yang terlihat pada Gb. 33 dirangkum pada Tabel 4.27 dan 4.28.

Berdasarkan Gb. 4.33 dan Tabel 4.26 dan 4.27 tampak bahwa terdapat pengaruh dari penambahan kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 1.5 m/s, 1 m/s dan 0.5 m/s yang dipasang pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap nilai koefisien *drag* rata-rata dan pengurangan *drag* dengan peningkatan kecepatan *upstream* yang diberikan yaitu 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s. Pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s, *blowing* diberikan dengan kenaikan $0.045 U_{bl}/U_o$, pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *blowing* 0.5 m/s atau $U_{bl}/U_o = 0.045$ yaitu 12.98%. Pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s, *blowing* diberikan dengan kenaikan $0.036 U_{bl}/U_o$, pengurangan

drag maksimum terjadi pada kecepatan *blowing* 0.5 m/s atau $U_{bl}/U_o = 0.036$ yaitu 13.92%. Pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s, *blowing* diberikan dengan kenaikan 0.030 U_{bl}/U_o dan pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *blowing* 0.5 m/s atau $U_{bl}/U_o = 0.030$ yaitu 14.83%.



Gambar 4.33 Koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *blowing*, CFD

Tabel 4.26 Nilai koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *blowing*, CFD

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien <i>drag</i> , C_d			
		Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>blowing</i> , U_{bl} (m/s)		
			0.5	1	1.5
1	11.1	1.838	1.599	1.604	1.605
2	13.9	1.781	1.533	1.537	1.536
3	16.7	1.756	1.495	1.503	1.497

Tabel 4.27 Nilai pengurangan *drag* (*drag reduction*) dengan *blowing*, CFD

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Pengurangan <i>drag</i> (%)		
		Kecepatan <i>blowing</i> , U_{bl} (m/s)		
		0.5	1	1.5
1	11.1	12.98	12.73	12.67
2	13.9	13.92	13.70	13.78
3	16.7	14.83	14.38	14.72

Nilai koefisien *drag* dengan kecepatan *synthetic jet* 2 m/s dengan variasi 3 (tiga) kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s ditampilkan pada Tabel 4.28 dan pengurangan *drag* yang diperoleh dirangkum dalam Tabel 4.29.

Tabel 4.28 Nilai koefisien dengan kontrol aliran *synthetic jet*, CFD

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien <i>drag</i> , C_d	
		Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s
1	11.1	1.838	1.504
2	13.9	1.781	1.458
3	16.7	1.756	1.431

Pada Tabel 4.28 dan 4.29 memperlihatkan bahwa terdapat pengaruh dari penempatan kontrol aliran *synthetic jet* dengan kecepatan 2 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap nilai koefisien *drag* rata-rata dan pengurangan *drag* dengan peningkatan kecepatan *upstream* yang diberikan yaitu 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s. Pada perbandingan kecepatan *synthetic jet* terhadap kecepatan *upstream*, $U_{sj}/U_o = 0.18$, pengurangan *drag* yang diperoleh adalah 18.16%. Untuk $U_{sj}/U_o = 0.14$ dan $U_{sj}/U_o = 0.12$ pengurangan *drag* yang dihasilkan adalah masing-masing 18.15% dan 18.49%.

Tabel 4.29 Nilai pengurangan *drag* (*drag reduction*) dengan *synthetic jet*, CFD

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Pengurangan <i>drag</i> (%)
		Kecepatan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s
1	11.1	18.16
2	13.9	18.15
3	16.7	18.49

4.3 Karakteristik Perubahan Medan Aliran – Hasil-hasil Eksperimental.

4.3.1 Dinamika Zona Aliran Resirkulasi – Pengukuran PIV

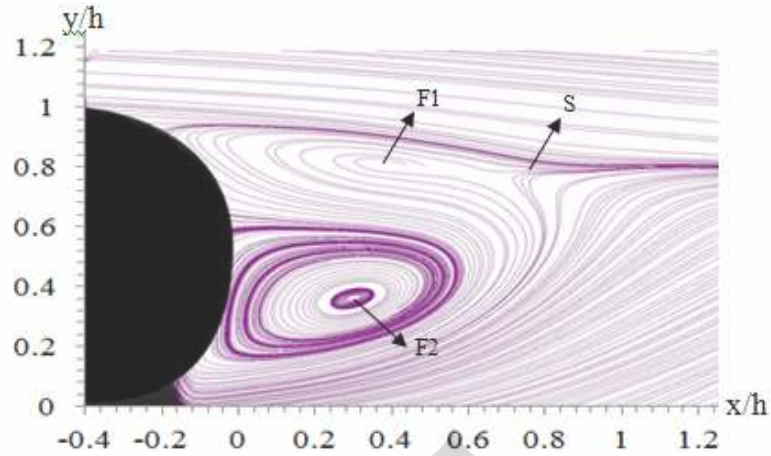
Teknik PIV dilakukan pada pendekatan eksperimental untuk mengelaborasi lebih dalam dinamika zona aliran resirkulasi di bawah pengaruh kontrol aktif dan memvalidasi hasil medan aliran yang telah diperoleh dari pendekatan komputasional. Jumlah data (*image*) yang diambil adalah sebanyak 200 buah untuk setiap 3 variasi perbandingan kecepatan *suction* dengan kecepatan *upstream* dan 3 variasi perbandingan kecepatan *blowing* dengan kecepatan *upstream* serta perbandingan kecepatan *synthetic jet* dengan kecepatan *upstream*. Hasil pengolahan *image streamline* dan *vorticity* yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk rata-rata.

Tabel 4.30 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$

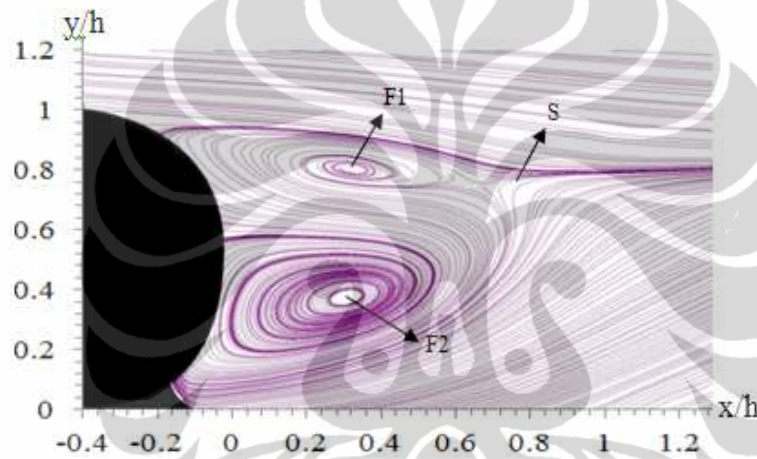
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang resirkulasi/h	Posisi		Panjang resirkulasi/h	Posisi	
		x/h	y/h		x/h	y/h		x/h	y/h
1	11.1	0.39	0.86	0.68	0.32	0.39	0.91	0.74	0.84
2	13.9	0.36	0.86	0.72	0.34	0.39	0.88	0.74	0.81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

Gb. 4.34 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. 4.34 terlihat jelas *large reverse flow region* pada bagian belakang dari model uji. 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 4.30.

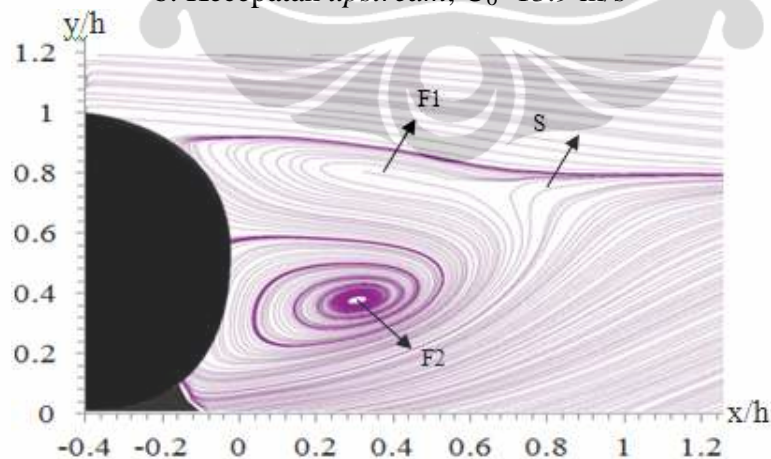
Streamline rata-rata dengan kontrol aliran *suction* yang ditempatkan di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 4.35. Kecepatan *suction* adalah 1.5 m/s dengan kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Penempatan *suction* tersebut memberikan pengaruh terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan. Gb. 4.35 memperlihatkan dengan jelas *large reverse flow region* pada bagian belakang dari model uji. Titik pusat resirkulasi pada bagian atas (F1) dan titik pusat resirkulasi pada bagian bawah (F2) dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi *saddle point* (S) dirangkum pada Tabel 4.31. Pada Gb. 4.35 dan Tabel 4.31 diperoleh informasi bahwa ada kecenderungan terjadi pergeseran posisi titik pusat resirkulasi bagian atas (F1) ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran dan hal yang sama juga terjadi untuk F2. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 11.53% dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 12.02% dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 12.48% dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s. Sementara panjang resirkulasi untuk F2 mengalami peningkatan untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 16.7 m/s adalah masing-masing 1.92% dan 10.57%, sebaliknya untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s terjadi pengurangan panjang resirkulasi sebesar 0.85%. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.



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

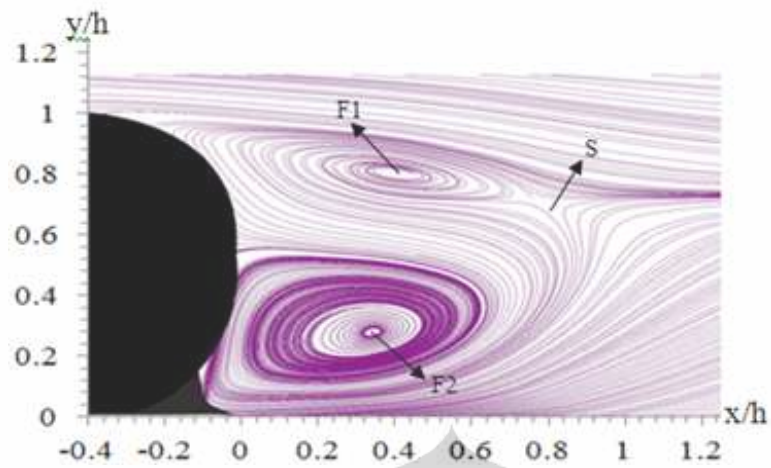


b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9$ m/s

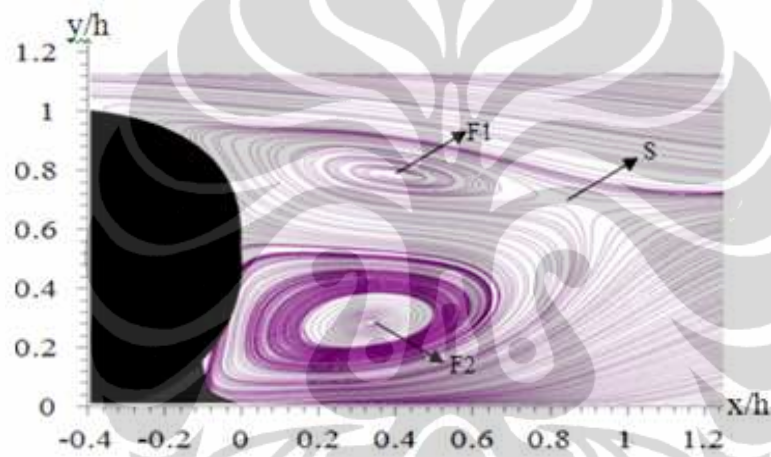


c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

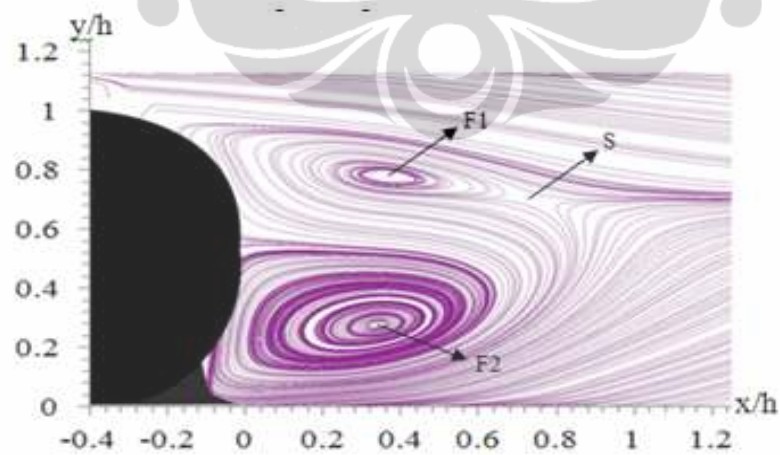
Gambar 4.34 *Streamline* rata-rata tanpa kontrol aliran di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$



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



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



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

Gambar 4.35 *Streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

Tabel 4.31 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

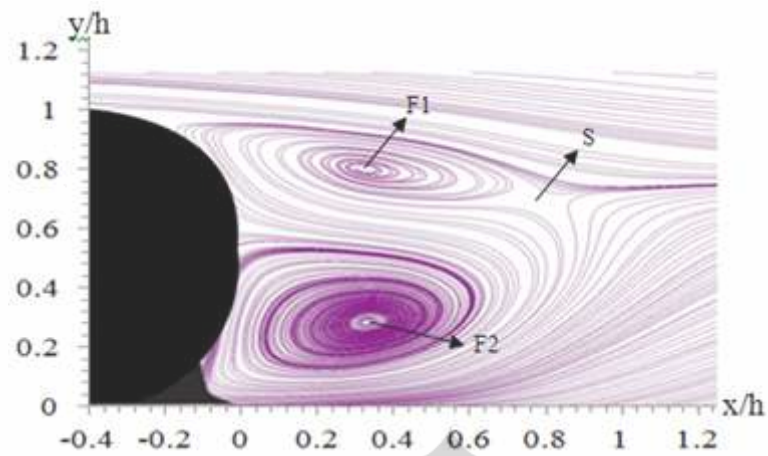
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang	Posisi		Panjang	Posisi	
		x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h
1	11.1	0.40	0.83	0.77	0.35	0.27	0.92	0.79	0.72
2	13.9	0.39	0.81	0.82	0.33	0.27	0.87	0.85	0.68
3	16.7	0.38	0.80	0.75	0.35	0.27	0.88	0.78	0.70

Kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.0 m/s yang ditempatkan di bagian belakang pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ 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. 4.36. Dengan ditematkannya *suction* tersebut, memberikan efek terhadap *streamline* rata-rata yang diperoleh. Pada Gb. 4.36 diperoleh informasi bahwa *large reverse flow region* terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi *saddle point* (S) diberikan pada Tabel 4.32. Pada Gb. 4.36 dan Tabel 4.32 diberikan gambaran bahwa ada kecenderungan terjadi pergeseran posisi titik F1 ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran dan hal serupa juga terjadi untuk F2. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s mengalami peningkatan masing-masing sekitar 15.59%, 11.57% dan 15.65%. Sementara panjang resirkulasi untuk F2 mengalami peningkatan untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 16.7 m/s adalah masing-masing 2.81% dan 13.44%, sebaliknya untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s terjadi pengurangan panjang resirkulasi sebesar 1.36%. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

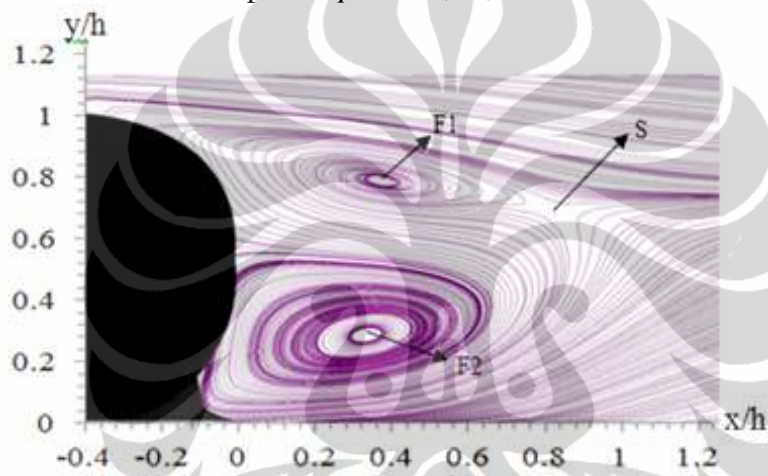
Tabel 4.32 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up 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	0.32	0.83	0.81	0.33	0.27	0.93	0.80	0.73
2	13.9	0.37	0.81	0.81	0.33	0.27	0.87	0.83	0.70
3	16.7	0.36	0.79	0.78	0.35	0.28	0.91	0.80	0.70

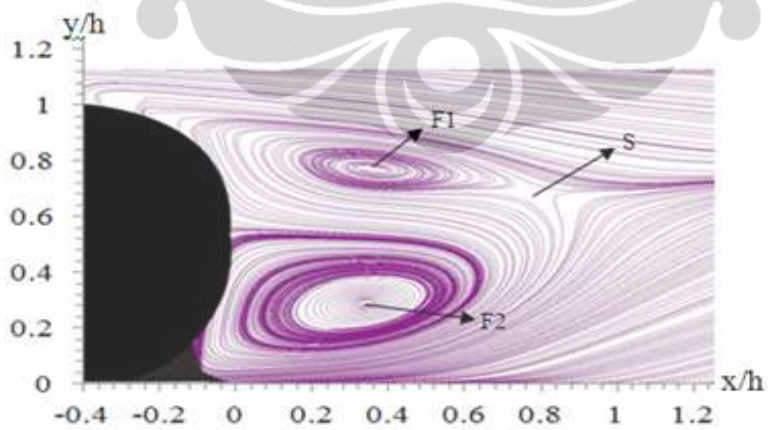
Pengaruh kontrol aliran *suction* terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan pada bagian belakang dari model uji pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 4.37. Kecepatan *suction* yang diberikan adalah 0.5 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.37 tampak bahwa *large reverse flow region* terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi *saddle point* (S) ditampilkan pada Tabel 4.33. Pada Gb. 4.37 dan Tabel 4.33 ditunjukkan bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 ke arah bawah dan untuk posisi titik F2 mempunyai kecenderungan menjauhi (arah ke belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 13.28%, 6.16% dan 16.66% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Sementara panjang resirkulasi untuk F2 mengalami peningkatan masing-masing sekitar 9.39% dan 16.31% untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 16.7 m/s, sebaliknya untuk kecepatan *upstream* 13.9 m/s terjadi pengurangan panjang resirkulasi sebesar 1.90%. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.



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

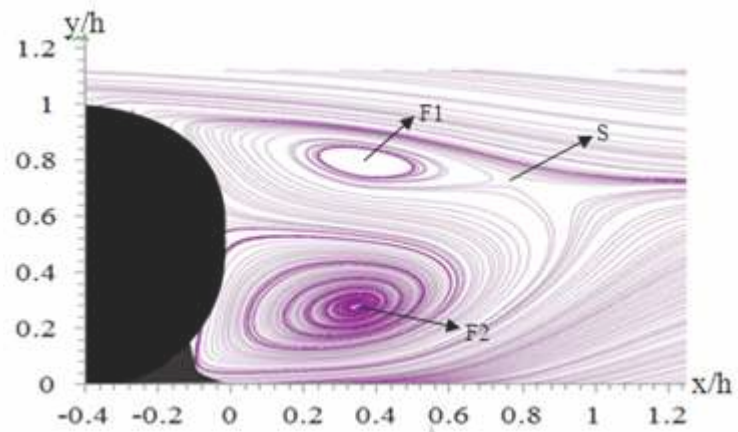


b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9$ m/s

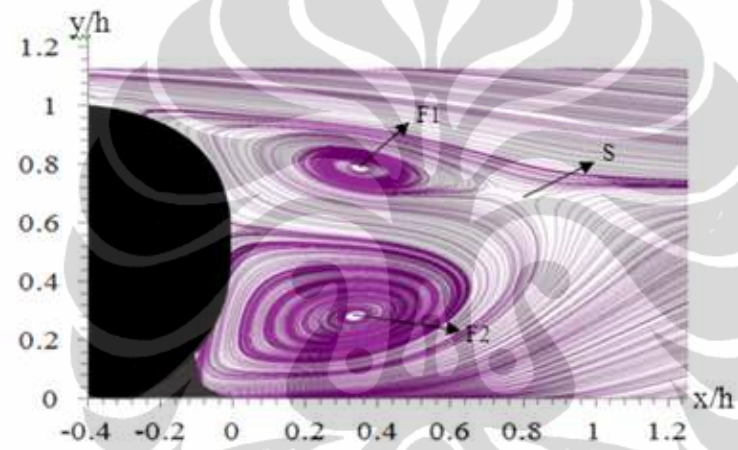


c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

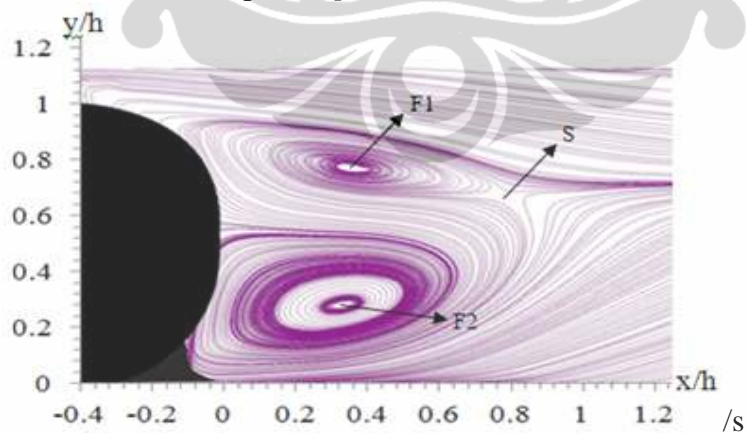
Gambar 4.36 *Streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$



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



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

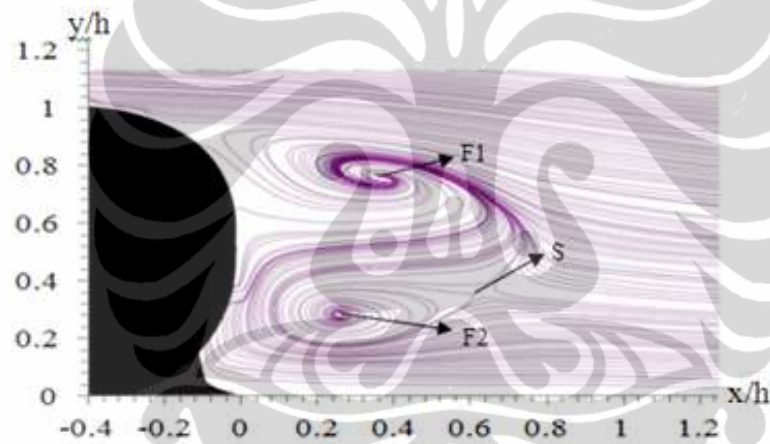


c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

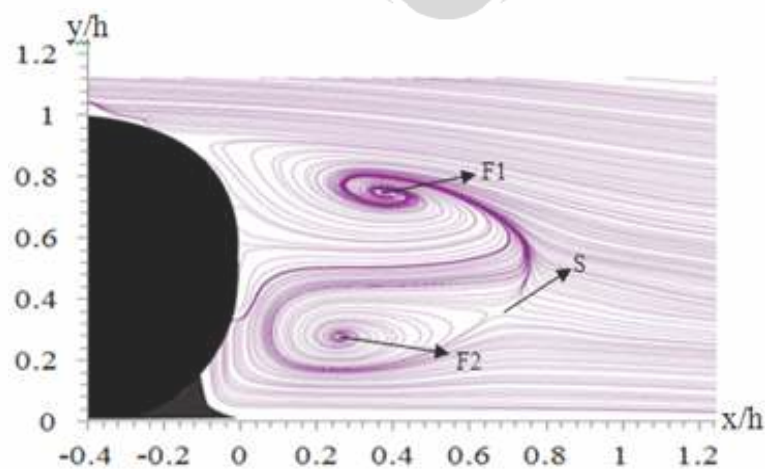
Gambar 4.37. *Streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

Tabel 4.33 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

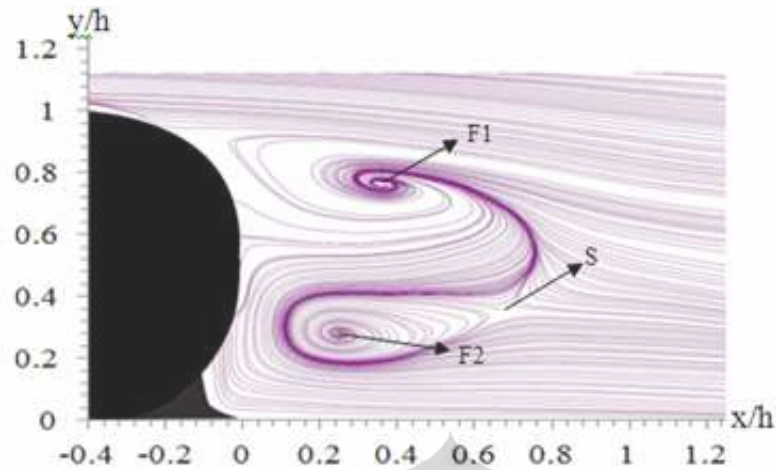
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi x/h	Posisi y/h	Panjang resirkulasi/h	Posisi x/h	Posisi y/h	Panjang resirkulasi/h	Posisi x/h	Posisi y/h
1	11.1	0.38	0.83	0.78	0.36	0.27	1.00	0.79	0.73
2	13.9	0.36	0.81	0.77	0.34	0.27	0.86	0.78	0.71
3	16.7	0.36	0.77	0.79	0.35	0.27	0.94	0.80	0.70



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



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

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

Gambar 4.38 *Streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

Tabel 4.34 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ 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>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang resirkulasi/ h	Posisi		Panjang resirkulasi/ h	Posisi	
		x/h	y/h		x/h	y/h		x/h	y/h
1	11.1	0.39	0.78	0.82	0.25	0.27	0.66	0.65	0.36
2	13.9	0.38	0.77	0.83	0.27	0.26	0.66	0.68	0.36
3	16.7	0.37	0.79	0.85	0.26	0.27	0.66	0.68	0.35

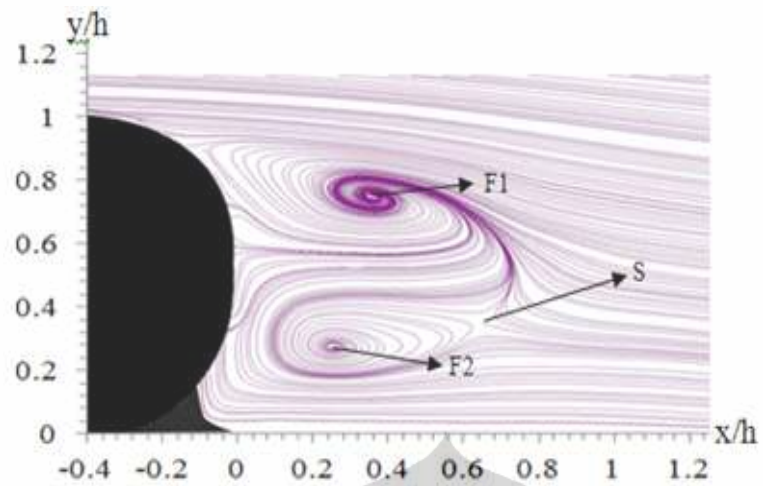
Kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s yang ditempatkan di bagian belakang pada bidang $z = 0.5$ (bidang yang mengenai kontrol aktif aliran) dengan 3 tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s memperlihatkan *streamline* rata-rata yang diperoleh, seperti nampak pada Gb. 4.38. Dengan ditematkannya *suction* tersebut, memberikan efek terhadap *streamline* rata-rata yang diperoleh. Pada Gb. 4.38 diperoleh informasi tentang *large reverse flow region* yang terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan Titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi *saddle point* (S) diberikan pada Tabel 4.34. Pada Gb. 4.38 dan Tabel 4.34 diberikan informasi bahwa ada kecenderungan posisi titik F1

menjauhi (arah ke belakang dan bawah) dan sebaliknya untuk titik F2 cenderung mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 17.45%, 13.91% dan 22.35% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Sebaliknya panjang resirkulasi untuk F2 mengalami penurunan masing-masing sekitar 37.82%, 32.37% dan 18.38% untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

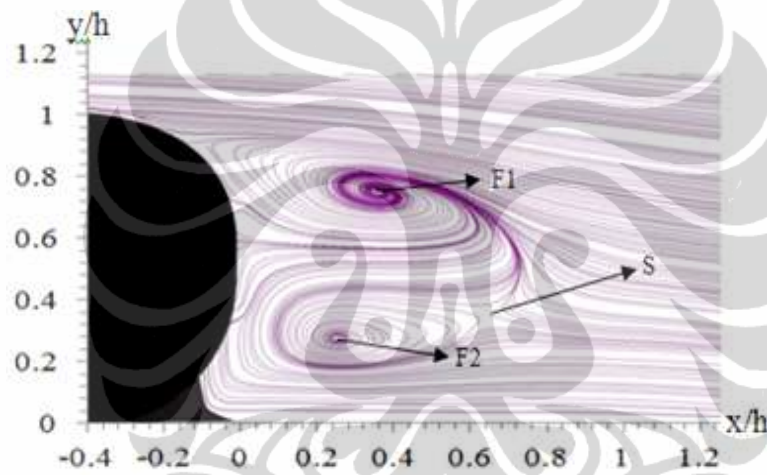
Streamline rata-rata dengan kontrol aliran *suction* yang ditempatkan di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$ (bidang yang mengenai kontrol aktif aliran) diperlihatkan pada Gb. 4.39. Kecepatan *suction* adalah 1.0 m/s dengan kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Penempatan *suction* tersebut memberikan pengaruh terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan. Gb. 4.39 memperlihatkan bahwa *large reverse flow region* pada bagian belakang dari model uji terlihat jelas. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya ditampilkan pada Tabel 4.35.

Tabel 4.35 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang $z = 0.5$.

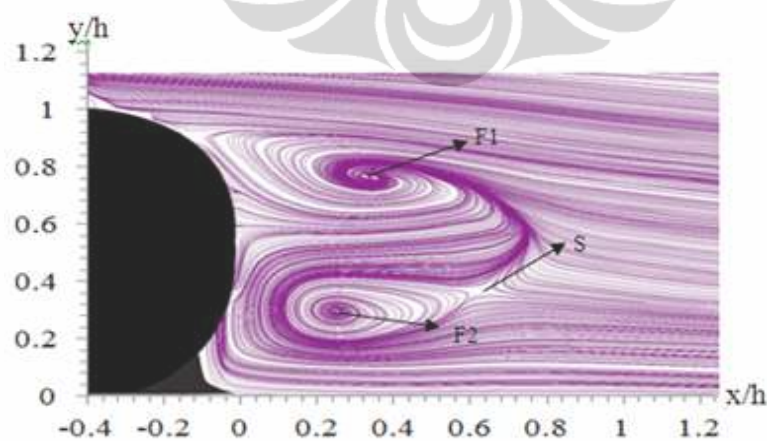
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang	Posisi		Panjang	Posisi	
		x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h
1	11.1	0.37	0.77	0.83	0.27	0.26	0.65	0.63	0.34
2	13.9	0.39	0.79	0.83	0.29	0.27	0.66	0.65	0.36
3	16.7	0.36	0.79	0.86	0.27	0.28	0.63	0.65	0.36



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



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



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

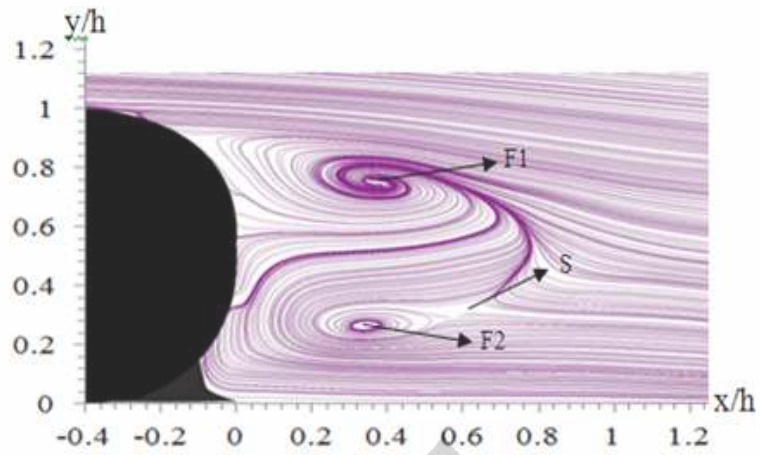
Gambar 4.39 *Streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

Pada Gb. 4.39 dan Tabel 4.35 diperoleh gambaran bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 menjauhi (arah ke belakang dan bawah) dan sebaliknya untuk titik F2 cenderung mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 18.25%, 13.46% dan 23.12% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Sebaliknya panjang resirkulasi untuk F2 mengalami penurunan masing-masing sekitar 39.52%, 32.85% dan 24.92% untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

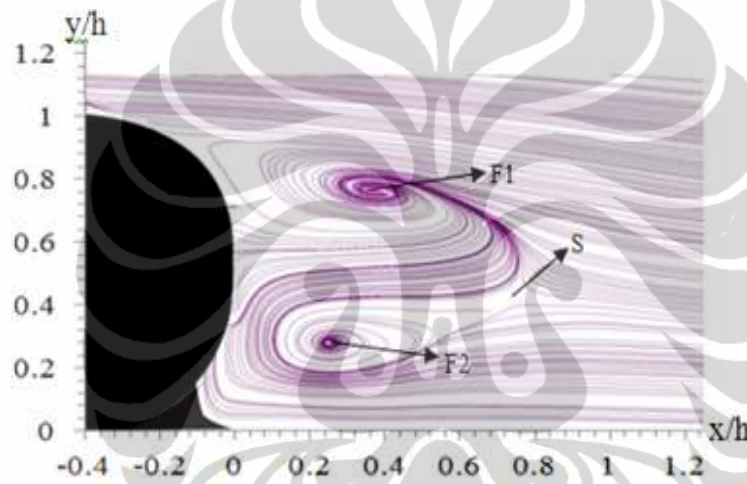
Pengaruh kontrol aliran *suction* terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan pada bagian belakang dari model uji pada bidang $z = 0.5$ (bidang yang mengenai kontrol aktif aliran) diperlihatkan pada Gb. 4.40. Kecepatan *suction* yang diberikan adalah 0.5 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.40 tampak bahwa *large reverse flow region* terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi *saddle point* (S) dirangkum pada Tabel 4.36.

Tabel 4.36 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang $z = 0.5$.

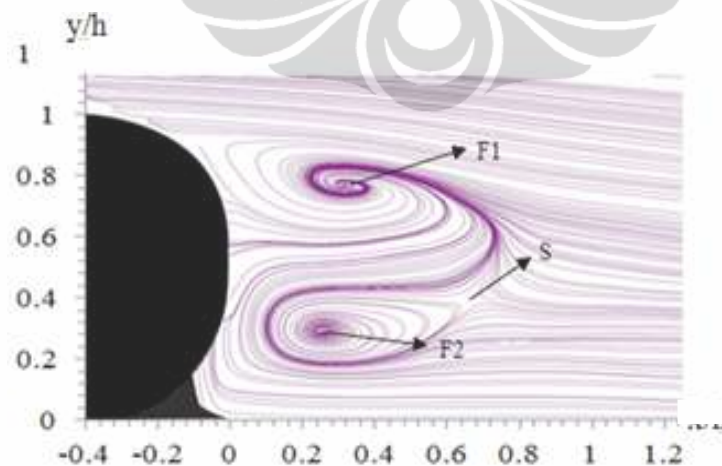
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang	Posisi		Panjang	Posisi	
		x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h	resirkulasi/h	x/h	y/h
1	11.1	0.37	0.78	0.87	0.34	0.25	0.57	0.64	0.32
2	13.9	0.38	0.78	0.84	0.25	0.27	0.71	0.72	0.40
3	16.7	0.35	0.79	0.80	0.26	0.28	0.65	0.66	0.38



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



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



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

Gambar 4.40 *Streamline* dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

Pada Gb. 4.40 dan Tabel 4.36 dilaporkan bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 ke arah bawah dan sebaliknya untuk titik F2 cenderung mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 21.58%, 14.96% dan 18.06% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Sebaliknya panjang resirkulasi untuk F2 mengalami penurunan masing-masing sekitar 59.20%, 23.83% dan 20.27% untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

Streamline rata-rata dengan kontrol aliran *blowing* yang ditempatkan di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 41. Kecepatan *blowing* adalah 1.5 m/s dengan kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Penempatan *blowing* tersebut memberikan pengaruh terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan. Gb. 4.41 memperlihatkan bahwa *large reverse flow region* pada bagian belakang dari model uji terlihat jelas. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya dan *saddle point* (S) dirangkum pada Tabel 4.37.

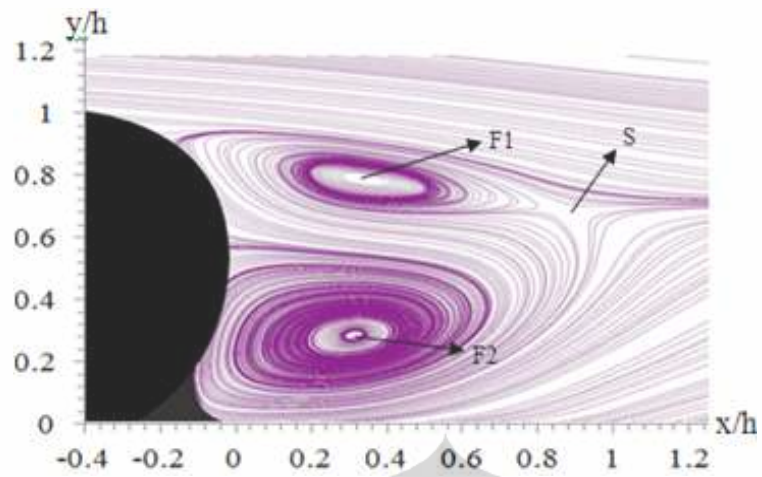
Tabel 4.37 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi x/h	Posisi y/h	Panjang resirkulasi/h	Posisi x/h	Posisi y/h	Panjang resirkulasi/h	Posisi x/h	Posisi y/h
1	11.1	0.35	0.83	0.84	0.33	0.31	0.96	0.83	0.72
2	13.9	0.35	0.82	0.78	0.35	0.31	0.89	0.82	0.71
3	16.7	0.36	0.80	0.80	0.37	0.31	0.91	0.82	0.66

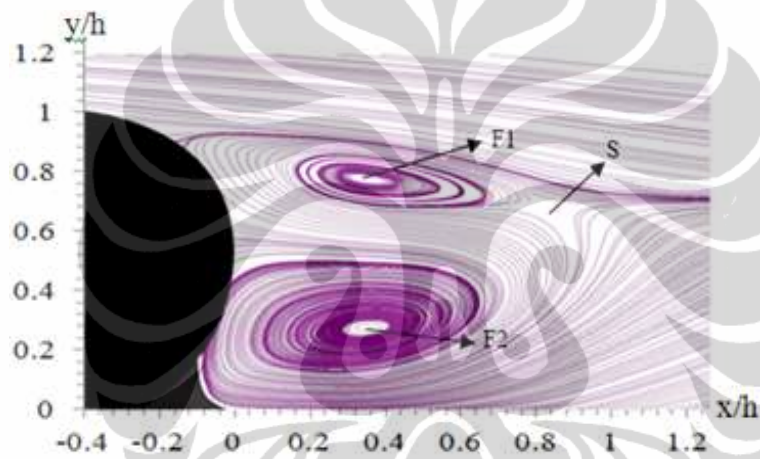
Pada Gb. 4.41 dan Tabel 4.37 diperoleh informasi bahwa ada kecenderungan terjadi pergeseran posisi titik pusat resirkulasi bagian atas (F1) ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah), sebaliknya untuk titik F2 justru menjauhi (ke arah belakang

dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 18.75% dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 7.69% dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan 17.85% dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s. Sementara panjang resirkulasi untuk F2 mengalami peningkatan untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s adalah masing-masing 5.79%, 1.58% dan 13.57%. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

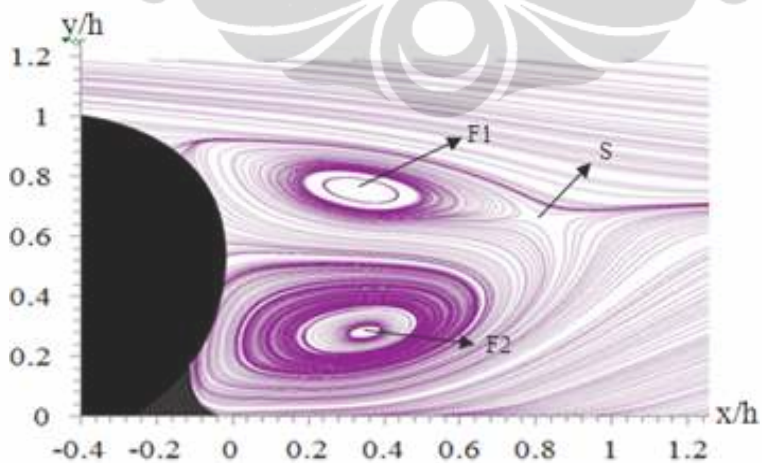
Kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s yang ditempatkan di bagian belakang pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ dengan 3 tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s memperlihatkan *streamline* rata-rata yang diperoleh, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 4.42. Dengan ditematkannya *blowing* tersebut, memberikan efek terhadap *streamline* rata-rata yang diperoleh. Pada Gb. 4.42 diperoleh informasi tentang *large reverse flow region* yang terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi *saddle point* (S) diberikan pada Tabel 4.38. Pada Gb. 4.42 dan Tabel 4.38 diberikan gambaran bahwa ada kecenderungan terjadi pergeseran posisi titik F1 ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran dan hal serupa juga terjadi untuk F2. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s mengalami peningkatan masing-masing sekitar 18.72%, 13.63% dan 16.05%. Sementara panjang resirkulasi untuk F2 juga mengalami peningkatan untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s adalah masing-masing 5.19%, 4.14% dan 13.67%. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.



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

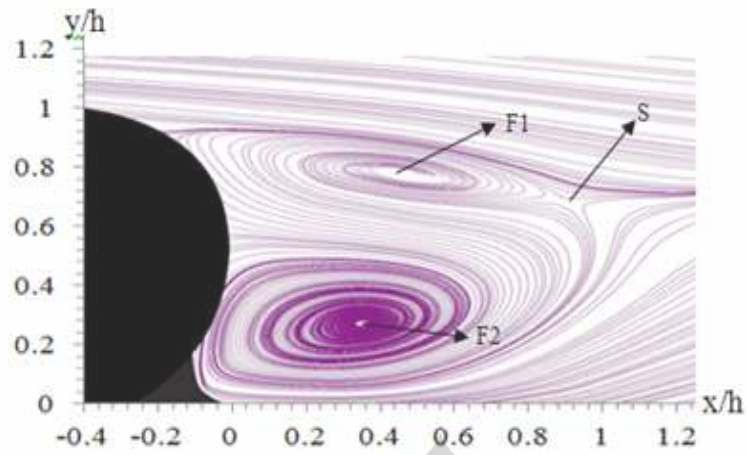


b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9$ m/s

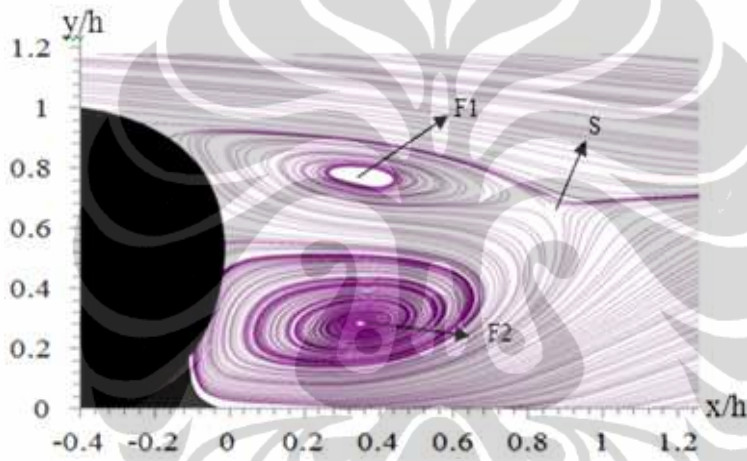


c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

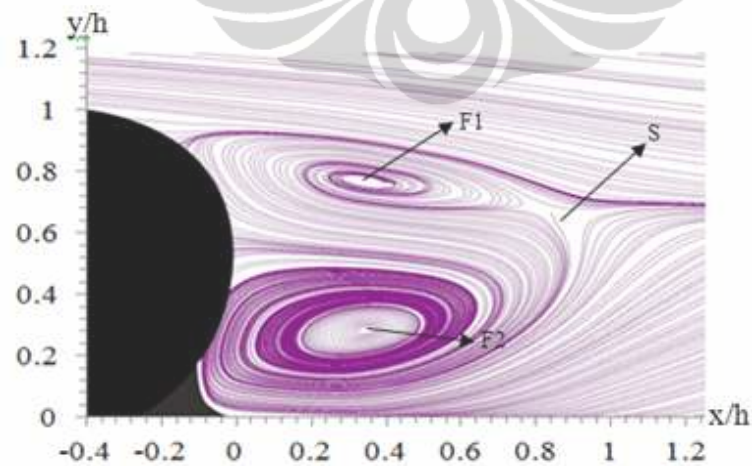
Gambar 4.41 *Streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$



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



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



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

Gambar 4.42 *Streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

Tabel 4.38 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang resirkulasi/h	Posisi		Panjang resirkulasi/h	Posisi	
		x/h	y/h		x/h	y/h		x/h	y/h
1	11.1	0.45	0.83	0.84	0.35	0.30	0.96	0.84	0.73
2	13.9	0.38	0.82	0.83	0.37	0.32	0.92	0.83	0.70
3	16.7	0.35	0.81	0.78	0.35	0.31	0.91	0.78	0.72

Pengaruh kontrol aliran *blowing* terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan pada bagian belakang dari model uji pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 4.43. Kecepatan *blowing* yang diberikan adalah 0.5 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.43 tampak bahwa *large reverse flow region* terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya *saddle point* (S) ditampilkan pada Tabel 4.39.

Tabel 4.39 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi		Panjang resirkulasi/h	Posisi		Panjang resirkulasi/h	Posisi	
		x/h	y/h		x/h	y/h		x/h	y/h
1	11.1	0.35	0.84	0.87	0.34	0.31	1.01	0.89	0.71
2	13.9	0.34	0.80	0.77	0.35	0.31	0.94	0.78	0.75
3	16.7	0.34	0.81	0.75	0.34	0.31	0.90	0.79	0.72

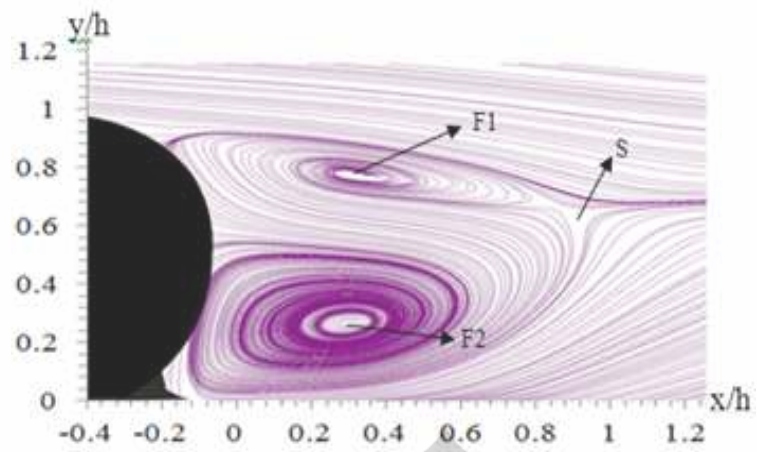
Pada Gb.4.43 dan Tabel 4.39 ditunjukkan bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) dan sebaliknya untuk posisi titik F2 mempunyai kecenderungan menjauhi (arah ke belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Panjang resirkulasi (L_r)

untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 22.04%, 6.98% dan 12.59% serta untuk F2 masing-masing sekitar 9.93%, 6.82% dan 12.81% untuk kecepatan *upstream* 11.1, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang menjauhi (ke arah belakang dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

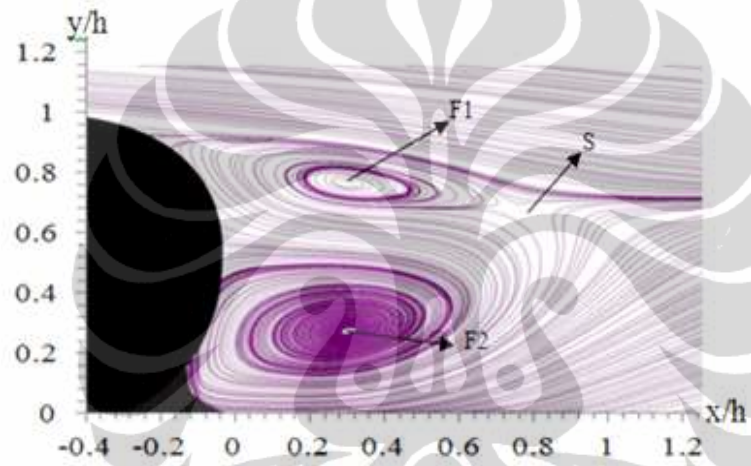
Kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 1.5 m/s yang ditempatkan di bagian belakang pada bidang $z = 0.5$ (bidang yang mengenai kontrol aktif aliran) dengan 3 tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s memperlihatkan *streamline* rata-rata yang diperoleh, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 4.44. Dengan ditematkannya *blowing* tersebut, memberikan efek terhadap *streamline* rata-rata yang diperoleh. Pada Gb. 4.44 diperoleh informasi tentang *large reverse flow region* yang terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta posisi *saddle point* (S) ditampilkan pada Tabel 4.40. Pada Gb. 4.44 dan Tabel 4.40 diberikan informasi bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran dan hal yang serupa terjadi juga untuk titik F2. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 24.69%, 14.38% dan 21.99% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Dan hal sebaliknya terjadi untuk F2 justru mengalami penurunan panjang resirkulasi masing-masing sekitar 35.85%, 35.17% dan 32.45%. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

Tabel 4.40 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang $z = 0.5$.

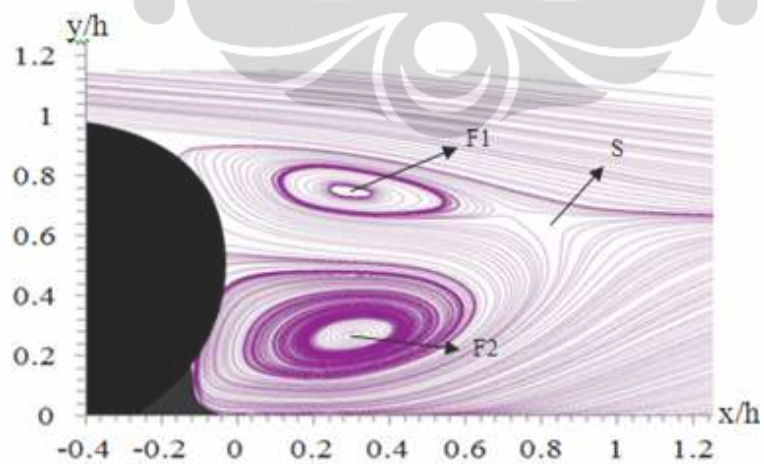
No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up circle</i>)			S (<i>saddle point</i>)	
		Posisi x/h	Posisi y/h	Panjang resirkulasi/h	Posisi x/h	Posisi y/h	Panjang resirkulasi/h	Posisi x/h	Posisi y/h
1	11.1	0.38	0.82	0.90	0.27	0.31	0.67	0.69	0.38
2	13.9	0.37	0.82	0.84	0.24	0.32	0.65	0.67	0.35
3	16.7	0.34	0.83	0.84	0.23	0.32	0.59	0.65	0.34



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

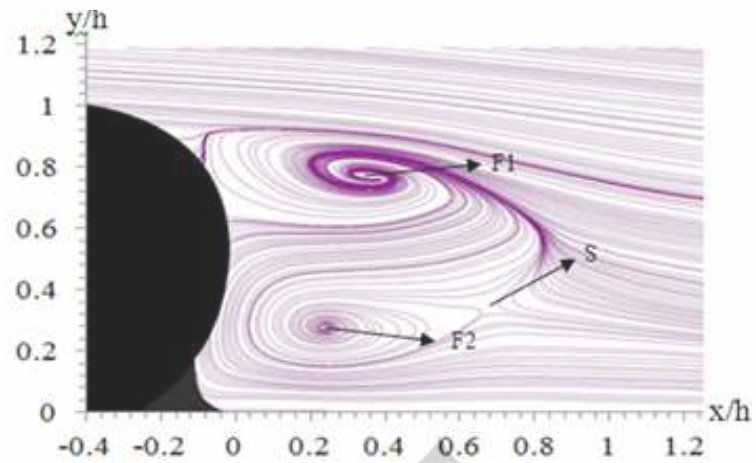


b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9$ m/s

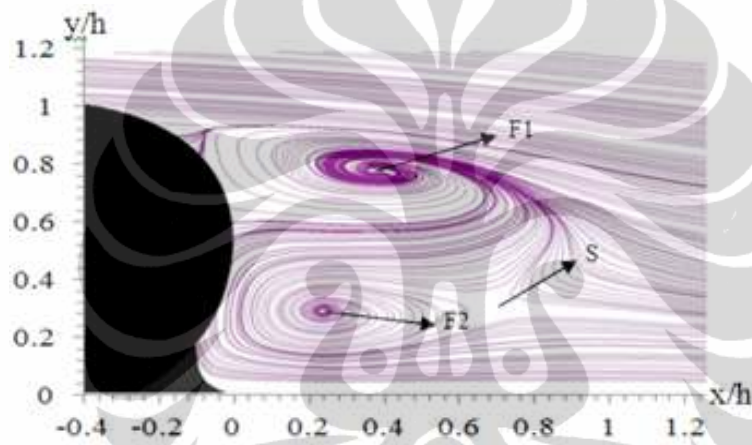


c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

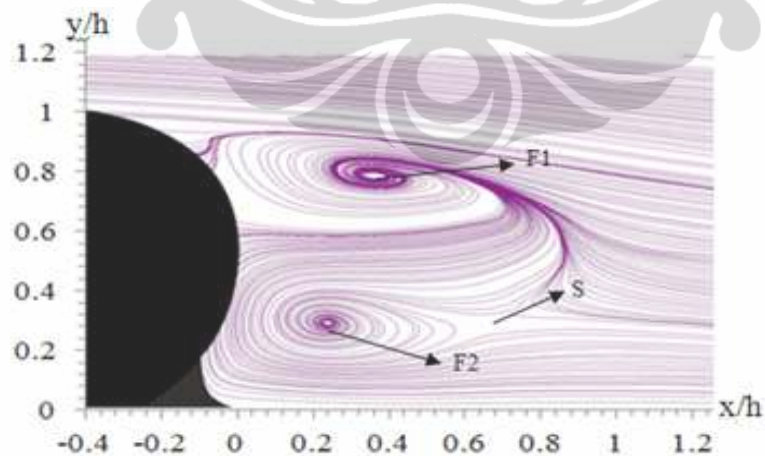
Gambar 4.43 *Streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$



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

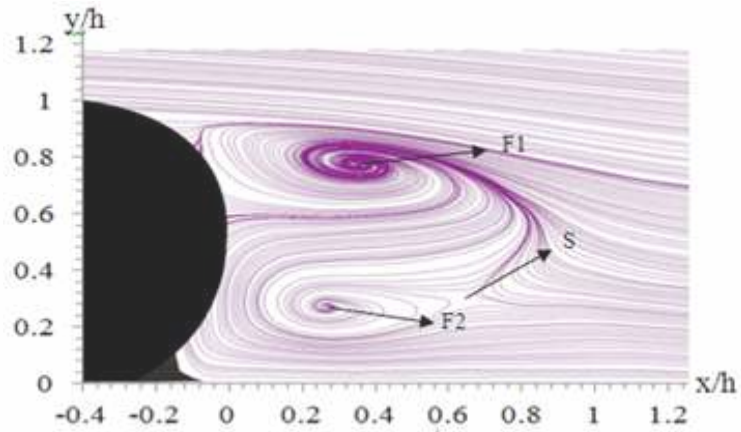


b. Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9$ m/s

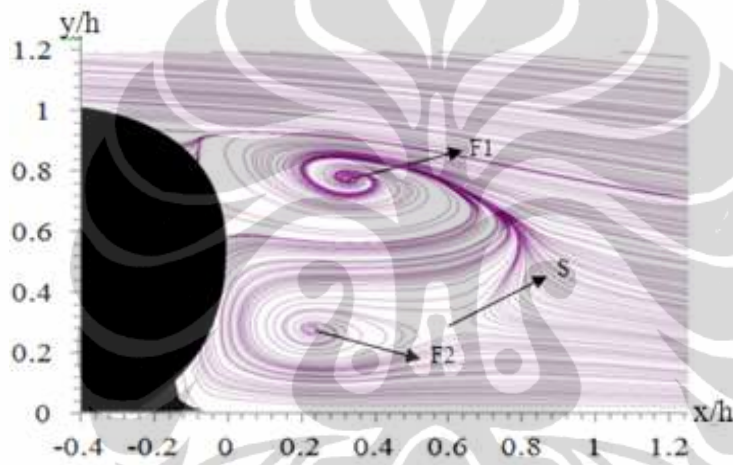


c. Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7$ m/s

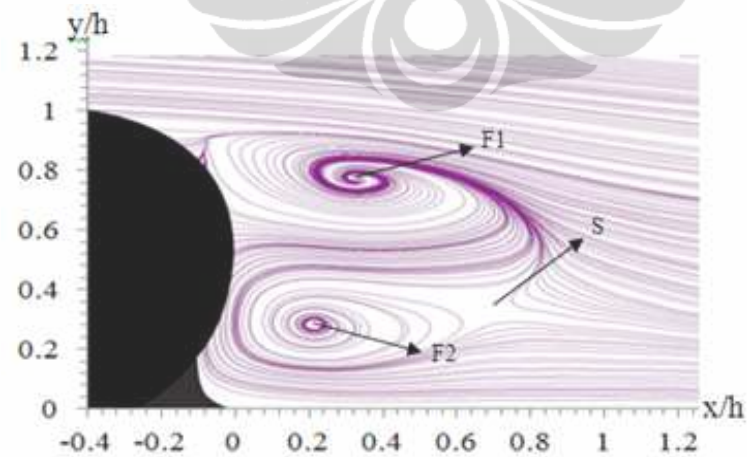
Gambar 4.44 *Streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$



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



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



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

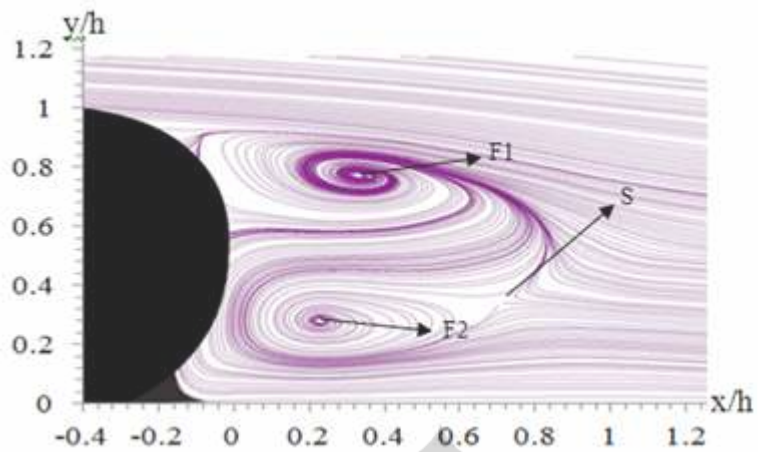
Gambar 4.45 *Streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

Streamline rata-rata dengan kontrol aliran *blowing* yang ditempatkan di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$ (bidang yang mengenai kontrol aktif aliran) diperlihatkan pada Gb. 4.45. Kecepatan *blowing* adalah 1.0 m/s dengan kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Penempatan *blowing* tersebut memberikan pengaruh terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan. Gb. 4.45 memperlihatkan bahwa *large reverse flow region* pada bagian belakang dari model uji terlihat jelas. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta *saddle point* (S) ditunjukkan pada Tabel 4.41.

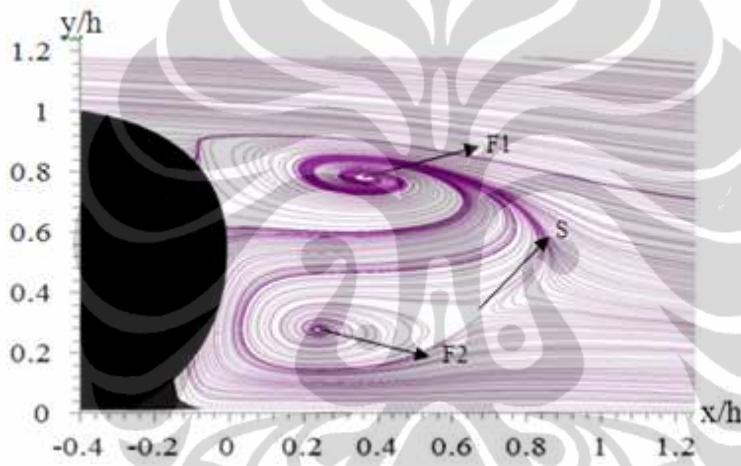
Tabel 4.41 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang $z = 0.5$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up 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	0.35	0.83	0.82	0.27	0.30	0.63	0.64	0.34
2	13.9	0.33	0.82	0.85	0.24	0.31	0.59	0.62	0.32
3	16.7	0.32	0.82	0.86	0.22	0.31	0.57	0.65	0.35

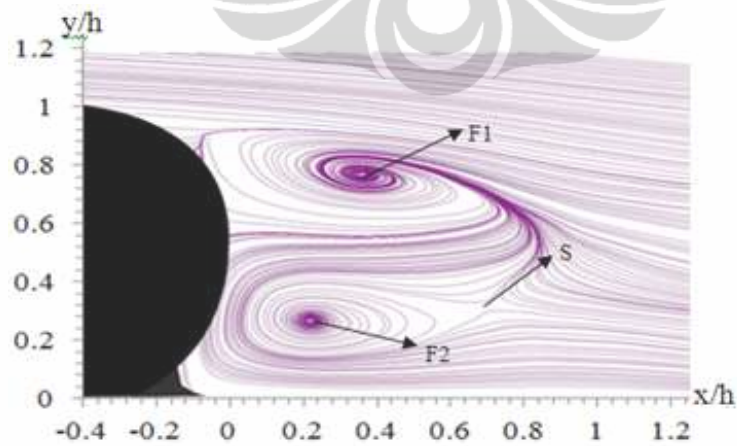
Pada Gb. 4.45 dan Tabel 4.41 diperoleh gambaran bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Dan hal yang sama juga terjadi untuk titik F2. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 16.72%, 15.24% dan 23.25% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Sebaliknya panjang resirkulasi untuk F2 mengalami penurunan masing-masing sekitar 44.67%, 47.95% dan 36.91%. Untuk posisi *saddle point* (S) cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.



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



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



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

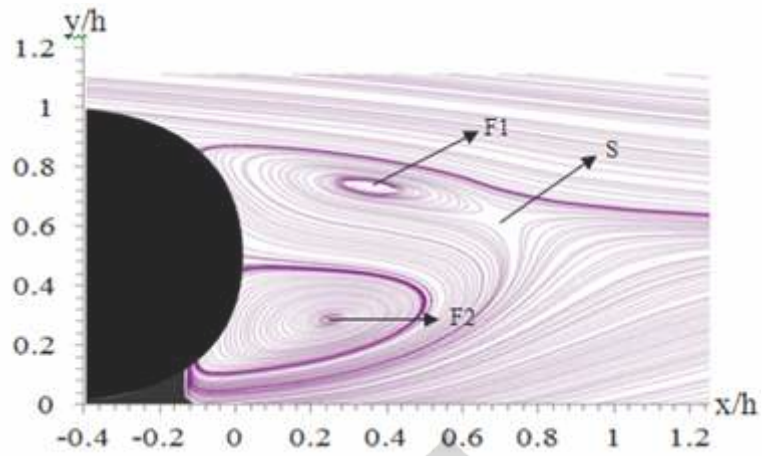
Gambar 4.46 *Streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

Pengaruh kontrol aliran *blowing* terhadap *streamline* rata-rata yang dihasilkan pada bagian belakang dari model uji pada bidang $z = 0.5$ (bidang yang mengenai kontrol aktif aliran) diperlihatkan pada Gb. 4.46. Kecepatan *blowing* diset pada 0.5 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.46 tampak bahwa *large reverse flow region* terlihat jelas pada bagian belakang dari model. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya *saddle point* (S) diberikan pada Tabel 4.42.

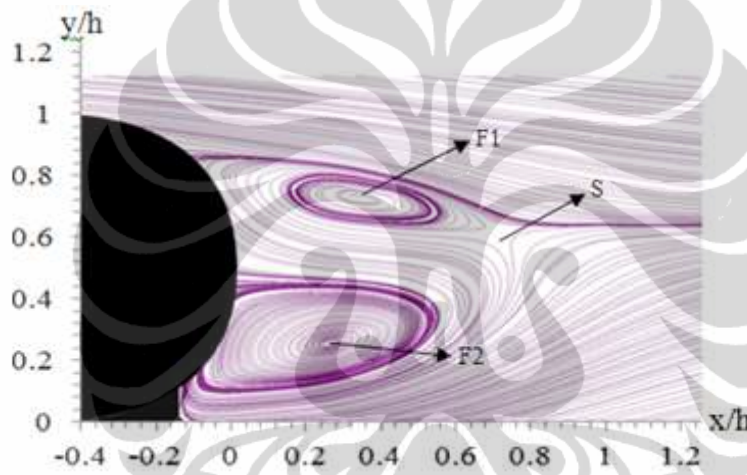
Tabel 4.42 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang $z = 0.5$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up 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	0.33	0.82	0.83	0.24	0.31	0.67	0.68	0.39
2	13.9	0.36	0.83	0.86	0.24	0.31	0.61	0.64	0.36
3	16.7	0.36	0.82	0.86	0.23	0.30	0.60	0.67	0.35

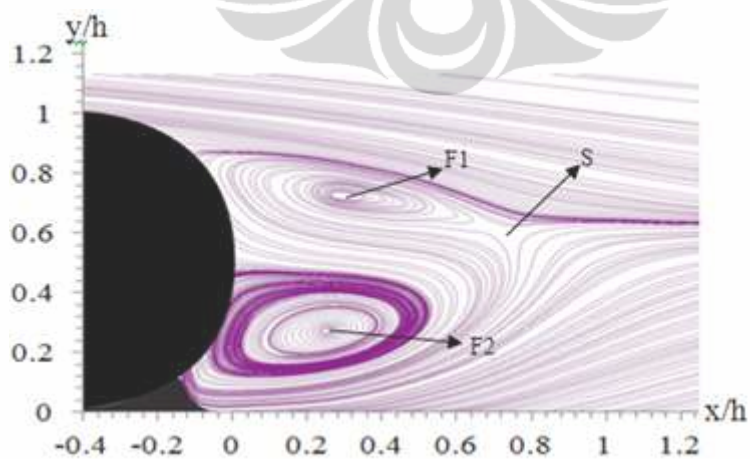
Pada Gb. 4.46 dan Tabel 4.42 dilaporkan bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 ke arah bawah dan sebaliknya untuk titik F2 cenderung mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami peningkatan sekitar 17.72%, 16.52% dan 23.70% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Sebaliknya panjang resirkulasi untuk F2 mengalami penurunan masing-masing sekitar 34.67%, 43.18% dan 30.11%. Untuk posisi *saddle point* (S) juga cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.



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



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



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

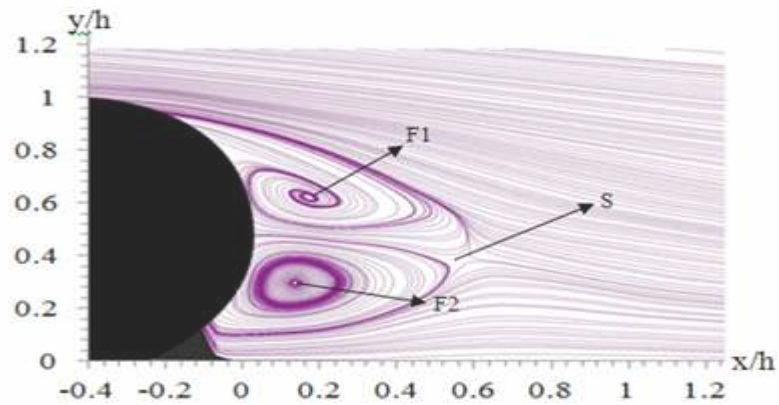
Gambar 4.47 Streamline dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

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. 4.47. 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. 4.47 tampak bahwa *large reverse flow region* terlihat jelas pada bagian belakang dari model. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya *saddle point* (S) dirangkum pada Tabel 4.43.

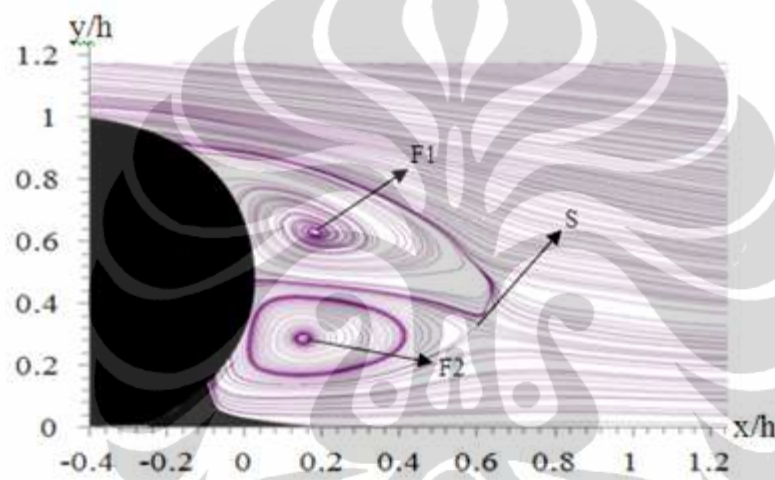
Tabel 4.43 Posisi dan panjang resirkulasi *streamline* dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	F1 (<i>down circle</i>)			F2 (<i>up 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	0.35	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

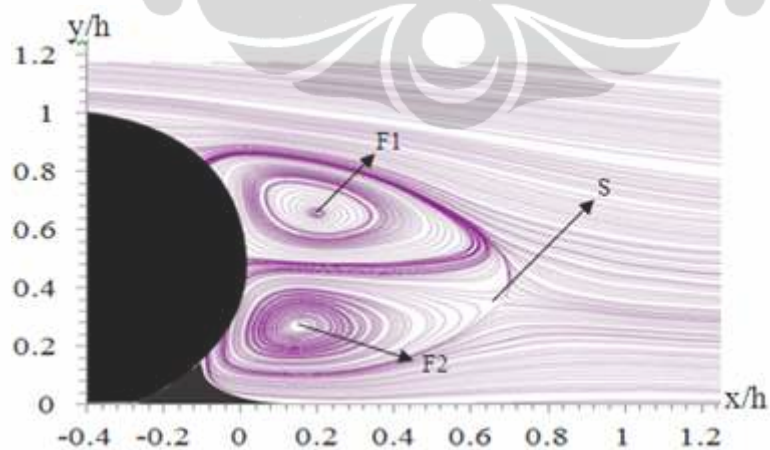
Pada Gb. 4.47 dan Tabel 4.43 diberikan informasi bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Dan hal yang serupa juga terjadi untuk titik F2. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami penurunan sekitar 3.29% dan 4.88% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s dan sebaliknya untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s justru mengalami peningkatan panjang resirkulasi sebesar 1.38%. Panjang resirkulasi untuk F2 mengalami penurunan masing-masing sekitar 21.99%, 16.14% dan 3.83% untuk kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Untuk posisi *saddle point* (S) cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.



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



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



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

Gambar 4.48 *Streamline* dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

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. 4.48. Dengan ditematkannya *synthetic jet* tersebut, memberikan efek terhadap *streamline* rata-rata yang diperoleh. Pada Gb. 4.48 diperoleh informasi tentang *large reverse flow region* yang terlihat jelas pada bagian belakang dari model uji. Titik F1 dan titik F2 dengan panjang daerah resirkulasinya serta *saddle point* (S) diberikan pada Tabel 4.44.

Tabel 4.44 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>up 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

Pada Gb. 4.48 dan Tabel 4.44 diperoleh gambaran bahwa ada kecenderungan posisi titik F1 mendekati (arah ke depan dan bawah) *reversed Ahmed model* pada daerah hilir dibandingkan tanpa kontrol aliran. Dan hal yang sama juga terjadi untuk titik F2. Panjang resirkulasi (L_r) untuk F1 mengalami penurunan sekitar 4.73% dan 7.44% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 13.9 m/s. Sedangkan untuk kecepatan *upstream* 16.7 m/s mengalami peningkatan panjang resirkulasi sekitar 2.28%. Panjang resirkulasi untuk F2 mengalami penurunan masing-masing sekitar 69.88%, 58.54% dan 29.69% untuk masing-masing kecepatan *upstream* 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Untuk posisi *saddle point* (S) cenderung mengalami pergeseran ke arah yang mendekati (ke arah depan dan bawah) *reversed Ahmed model* jika dibandingkan tanpa kontrol aliran pada daerah hilir.

Gb. 4.49 menampilkan *vorticity* 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. Panjang *vorticity* positif (bagian bawah) dan *vorticity* negatif (bagian atas) diberikan pada Tabel 4.45.

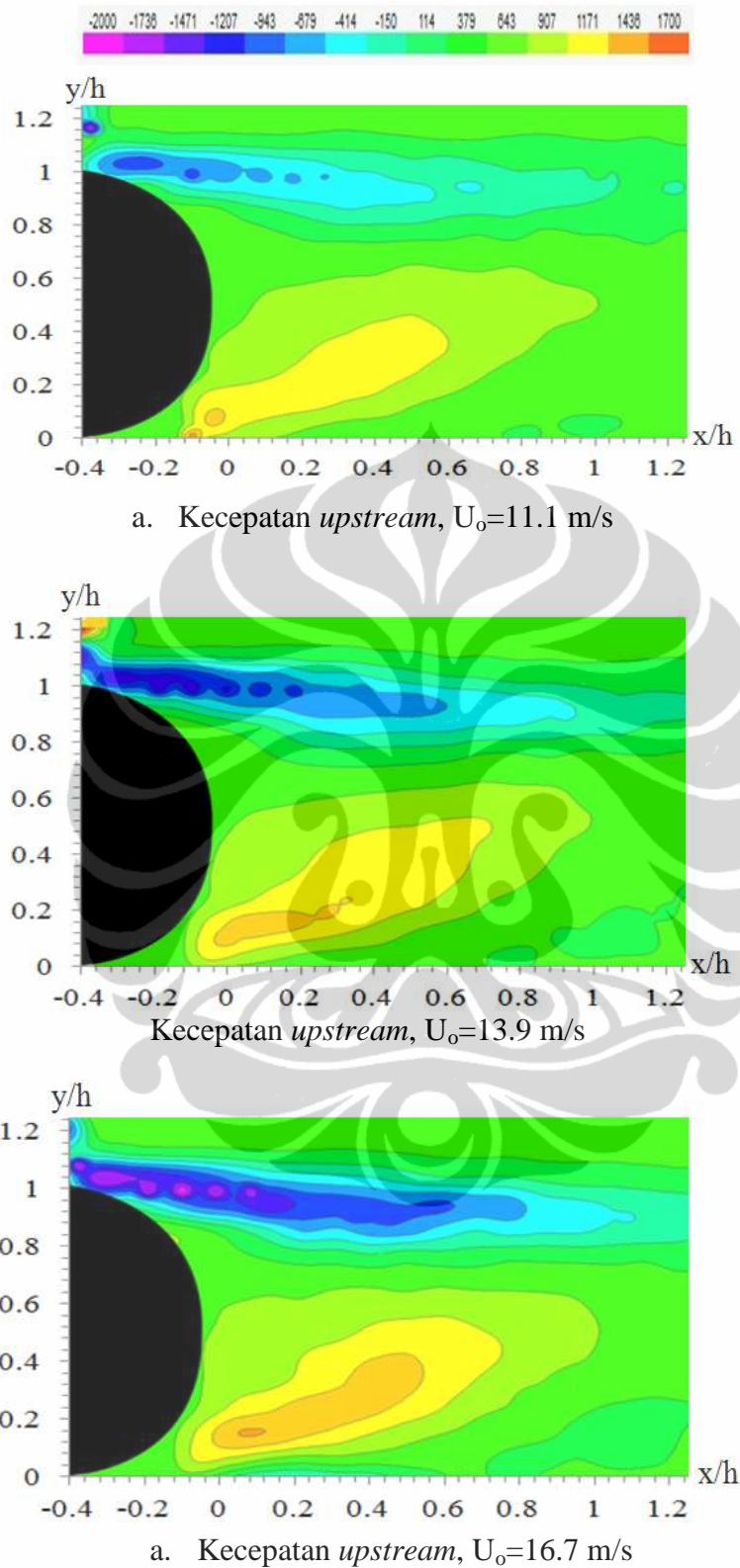
Tabel 4.45 Panjang *vorticity* tanpa kontrol aliran dibagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$.

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	1.26	0.81	1.45	0.95
2	13.9	1.18	0.92	1.46	1.24
3	16.7	1.22	0.90	1.95	1.50

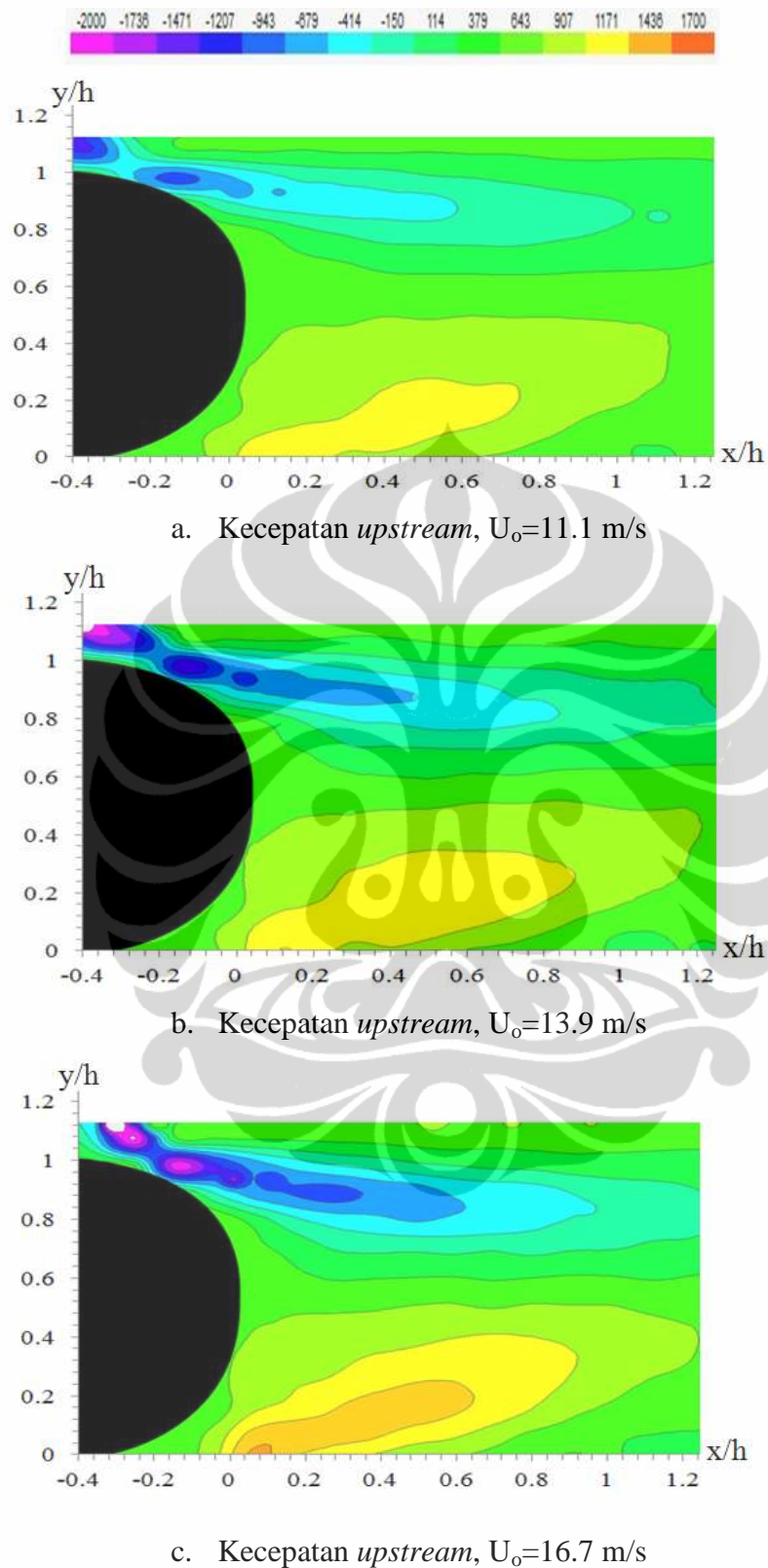
Vorticity rata-rata dengan kontrol aliran *suction* yang ditempatkan di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 4.50. Kecepatan *suction* adalah 1.5 m/s dengan kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Penempatan *suction* tersebut memberikan pengaruh terhadap panjang *vorticity* positif dan *vorticity* negatif yang dihasilkan dan dirangkum pada Tabel 4.46. Pengurangan panjang *vorticity* positif terbesar terjadi kecepatan *upstream* 11.1 m/s yaitu 8.66% dan 13.71% untuk bagian dalam dan luar. Dan untuk *vorticity* negatif bagian dalam dan luar adalah sebesar 16.76% dan 16.01% terjadi pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s.

Tabel 4.46 Panjang *vorticity* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	1.15	0.70	1.28	0.88
2	13.9	1.22	0.81	1.52	1.12
3	16.7	1.28	0.93	1.62	1.26



Gambar 4.49 *Vorticity* tanpa kontrol aliran di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$



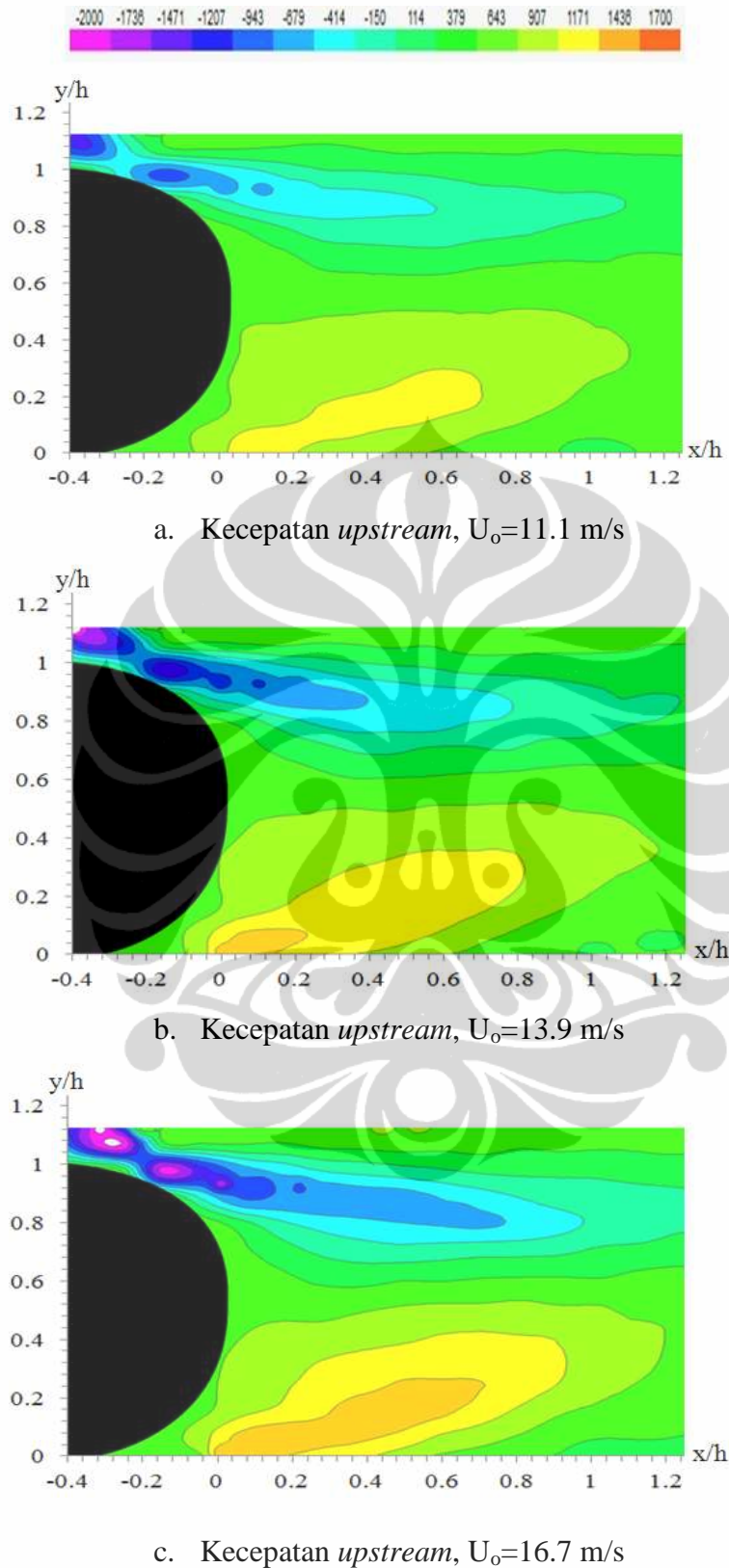
Gambar 4.50 *Vorticity* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

Pengaruh kontrol aliran *suction* terhadap *vorticity* rata-rata yang dihasilkan pada bagian belakang dari model uji pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ diperlihatkan pada Gb. 4.51. Kecepatan *suction* yang diberikan adalah 1.0 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. *Suction* yang ditempatkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap panjang *vorticity* positif dan *vorticity* negatif yang diperoleh seperti yang terlihat pada Tabel 4.47. Pengurangan panjang *vorticity* positif terbesar terjadi kecepatan *upstream* 11.1 m/s yaitu 9.45% dan 17.13% untuk bagian dalam dan luar. Dan untuk *vorticity* negatif bagian dalam dan luar adalah sebesar 11.41% dan 15.61% terjadi pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s.

Tabel 4.47 Panjang *vorticity* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	1.14	0.67	1.36	0.90
2	13.9	1.25	0.87	1.51	1.12
3	16.7	1.21	0.94	1.73	1.27

Kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 0.5 m/s yang ditempatkan di bagian belakang pada bidang simetrik $z = 0$ dengan 3 tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s memperlihatkan *vorticity* rata-rata yang diperoleh, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 4.52. Pengaplikasian *suction* tersebut memberikan pengaruh terhadap panjang *vorticity* positif dan *vorticity* negatif yang diperoleh dan hasilnya diberikan pada Tabel 4.48. Pengurangan panjang *vorticity* positif terbesar terjadi kecepatan *upstream* 11.1 m/s yaitu 11.02% dan 18.14% untuk bagian dalam dan luar. Dan untuk *vorticity* negatif bagian dalam dan luar adalah sebesar 19.39% dan 17.53% terjadi pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s.



Gambar 4.51 *Vorticity* dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

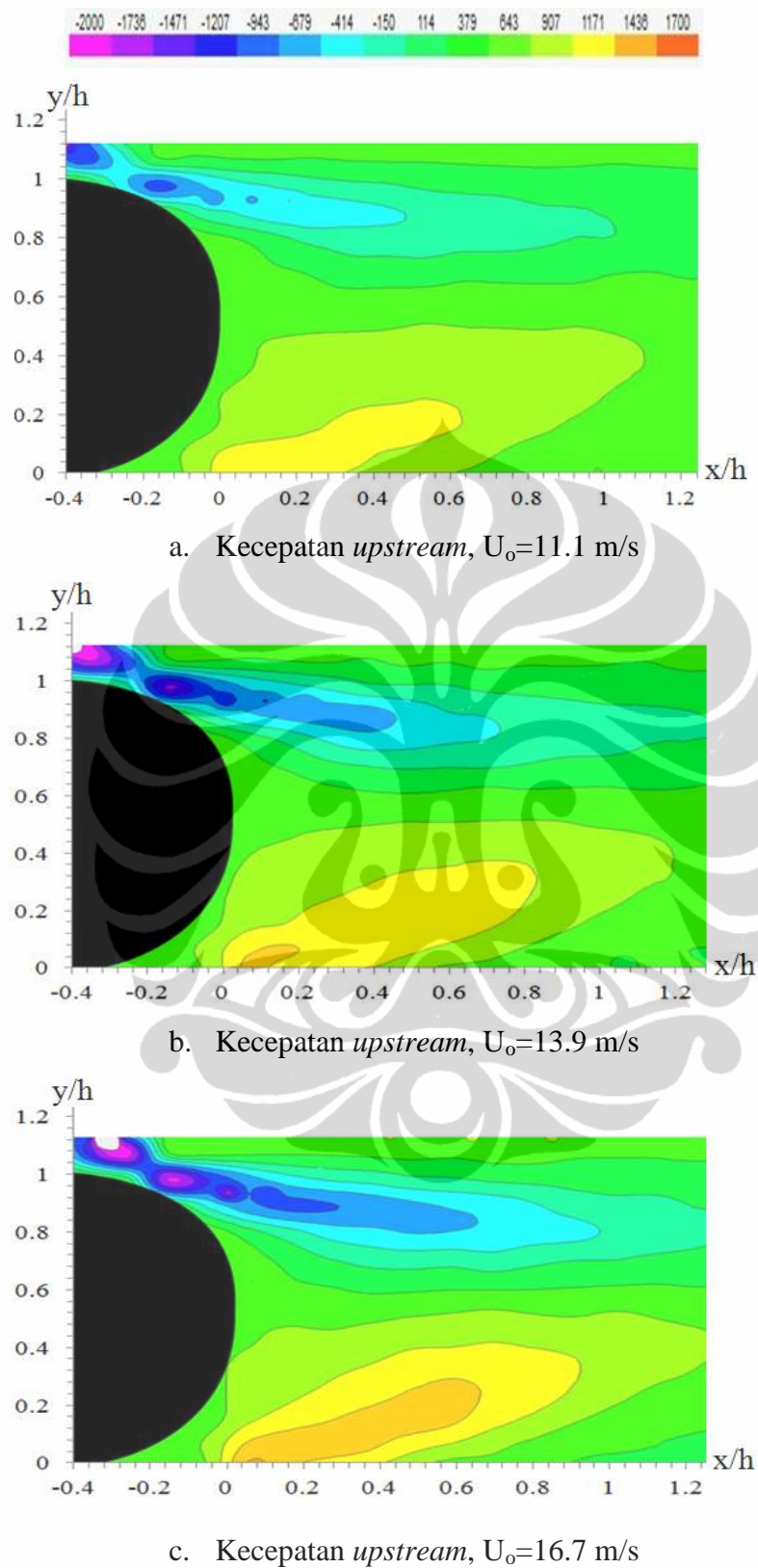
Tabel 4.48 Panjang *vorticity* dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	1.12	0.67	1.40	0.87
2	13.9	1.22	0.83	1.58	1.05
3	16.7	1.30	0.90	1.57	1.24

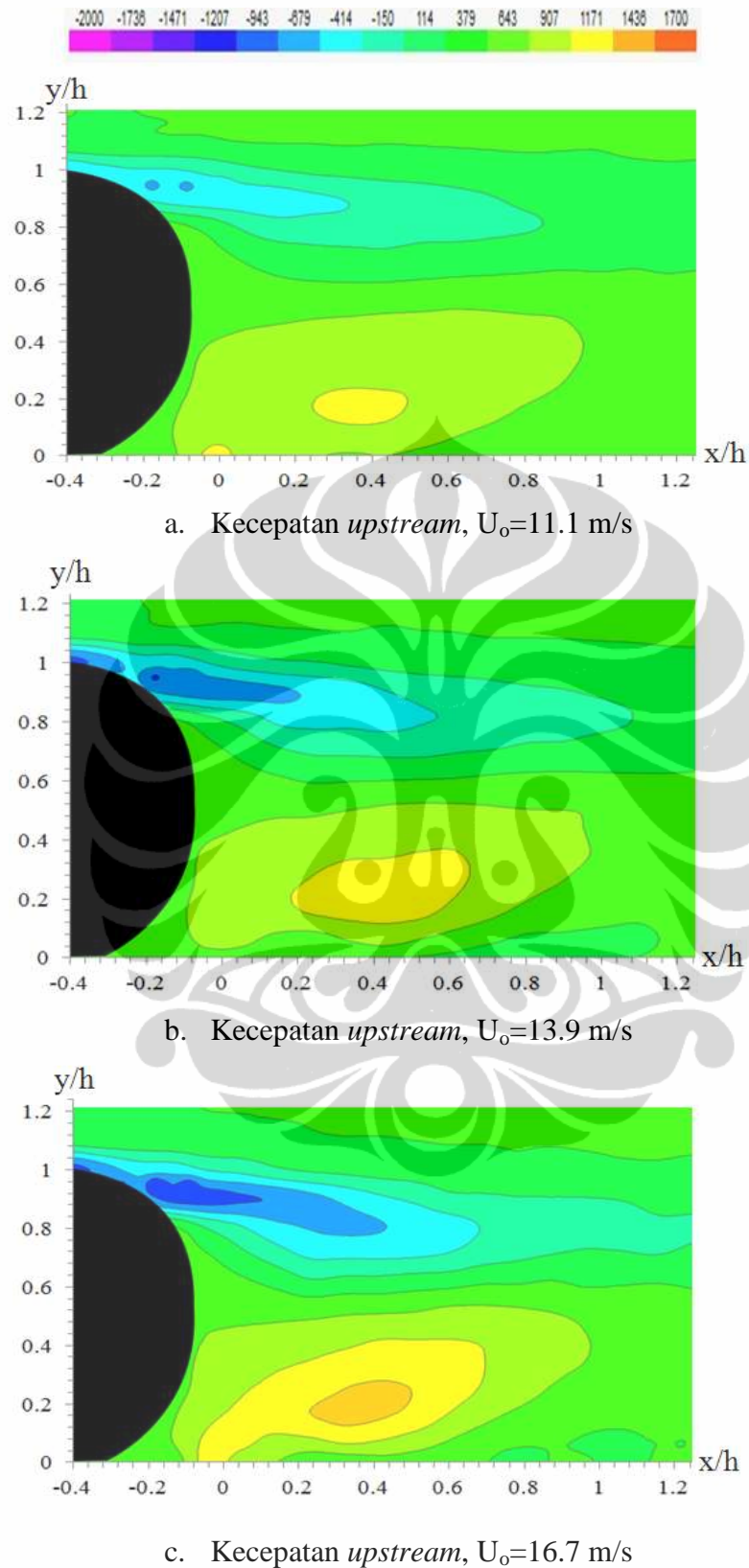
Penggunaan kontrol aliran *blowing* pada bagian belakang dari model uji pada bidang simetrik vertikal $z = 0$ memberikan pengaruh terhadap *vorticity* rata-rata yang dihasilkan seperti yang ditampilkan pada Gb. 4.52. Kecepatan *Blowing* yang diberikan adalah 1.5 m/s dengan kecepatan *upstream* masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. *Bowing* yang ditempatkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap panjang *vorticity* positif dan *vorticity* negatif yang diperoleh seperti yang dirangkum pada Tabel 4.49. Pengurangan panjang *vorticity* positif terbesar terjadi kecepatan *upstream* 11.1 m/s yaitu 23.73% dan 69.36% untuk bagian dalam dan luar. Dan untuk *vorticity* negatif bagian dalam dan luar adalah sebesar 27.32% dan 55.96% terjadi pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan 16.7 m/s.

Tabel 4.49 Panjang *vorticity* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	0.96	0.25	1.07	0.54
2	13.9	0.97	0.49	1.29	0.77
3	16.7	0.98	0.70	1.63	0.66



Gambar 4.52 *Vorticity* dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$



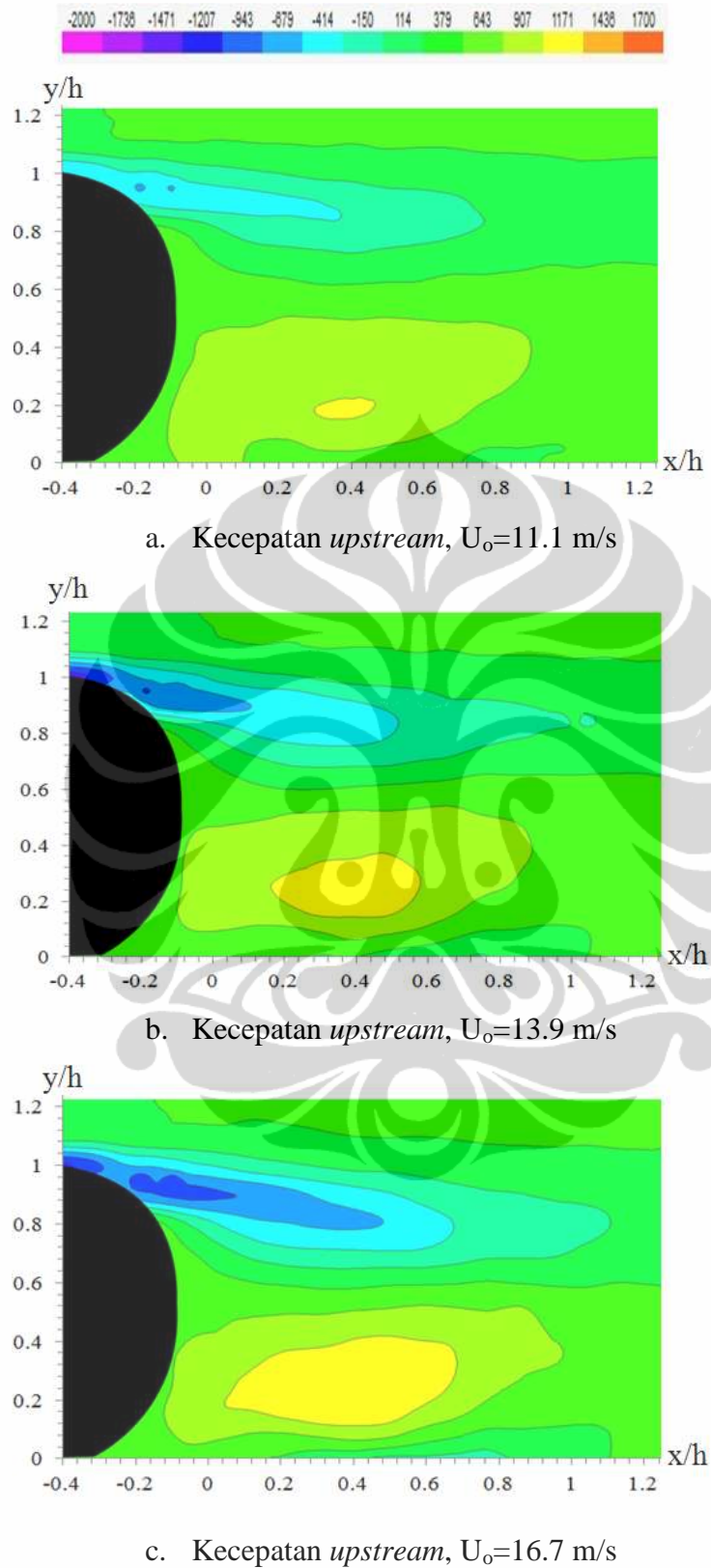
Gambar 4.53 *Vorticity* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

Pengaruh *blowing* terhadap *vorticity* rata-rata dengan kecepatan 1.0 m/s yang ditempatkan di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik $z = 0$ dengan 3 tingkat kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s ditunjukkan pada Gb. 4.54. Pengaplikasian *blowing* tersebut memberikan pengaruh terhadap panjang *vorticity* positif dan *vorticity* negatif yang diperoleh dan hasilnya dilaporkan pada Tabel 4.50. Pengurangan panjang *vorticity* positif terbesar terjadi kecepatan *upstream* 11.1 m/s yaitu 28.27% dan 78.26% untuk bagian dalam dan luar. Dan untuk *vorticity* negatif bagian dalam dan luar adalah sebesar 30.04% dan 38.63% terjadi pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s.

Tabel 4.50 Panjang *vorticity* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	0.90	0.18	1.01	0.61
2	13.9	0.90	0.44	1.28	0.77
3	16.7	0.99	0.66	1.36	0.92

Kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 0.5 m/s yang ditempatkan di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik $z = 0$ dengan 3 variasi kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s memberikan pengaruh terhadap *vorticity* rata-rata yang diperoleh seperti yang diperlihatkan pada Gb. 4.55. Penempatan *blowing* tersebut memberikan pengaruh terhadap panjang *vorticity* positif dan *vorticity* negatif yang diperoleh dan hasilnya dirangkum pada Tabel 4.51. Pengurangan panjang *vorticity* positif terbesar terjadi kecepatan *upstream* 11.1 m/s yaitu 22.46% dan 69.14% untuk bagian dalam dan luar. Dan untuk *vorticity* negatif bagian dalam dan luar adalah sebesar 32.69% dan 51.56% juga terjadi pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s.



Gambar 4.54 *Vorticity* dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

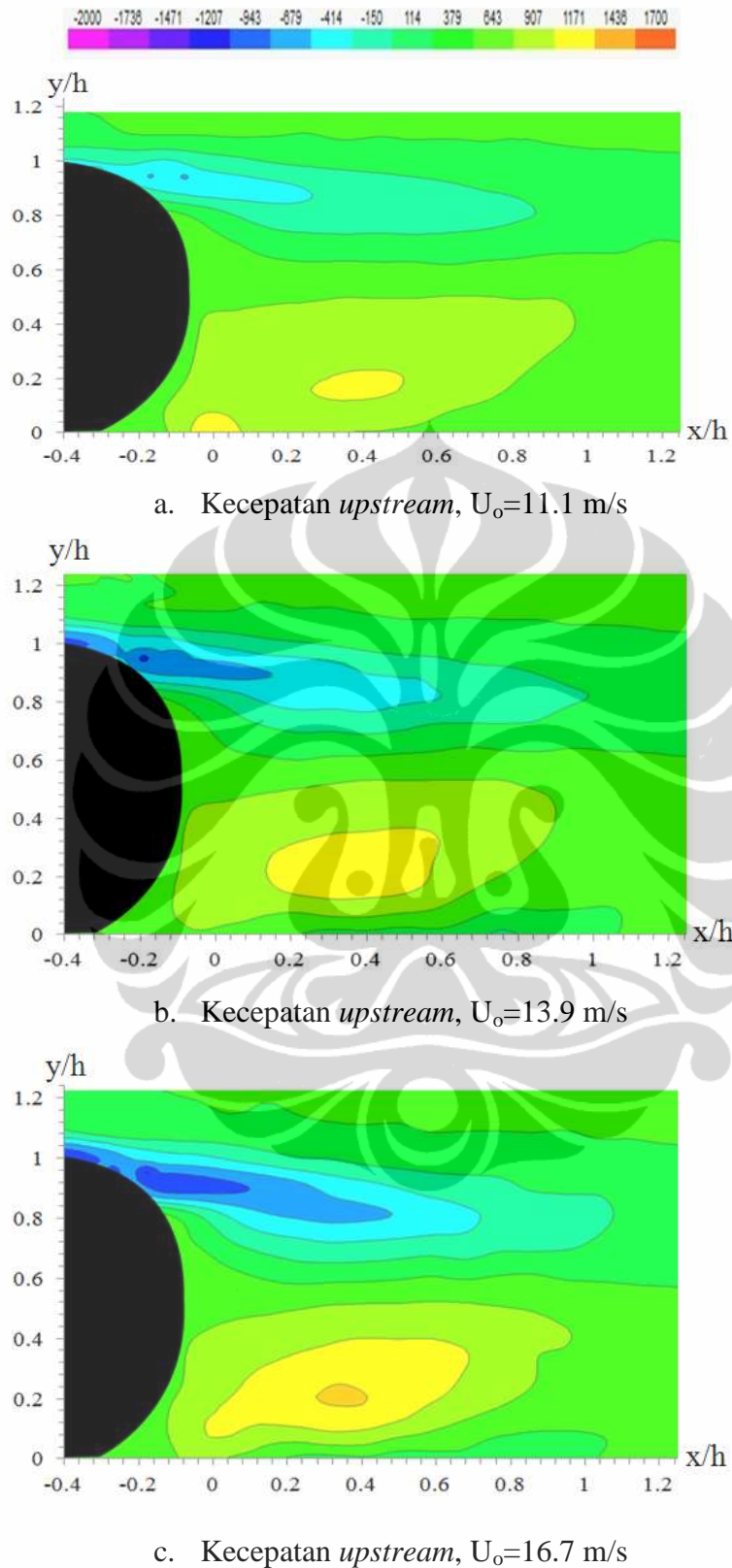
Tabel 4.51 Panjang *vorticity* dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	0.98	0.25	0.97	0.46
2	13.9	0.91	0.48	1.24	0.84
3	16.7	0.97	0.68	1.33	0.96

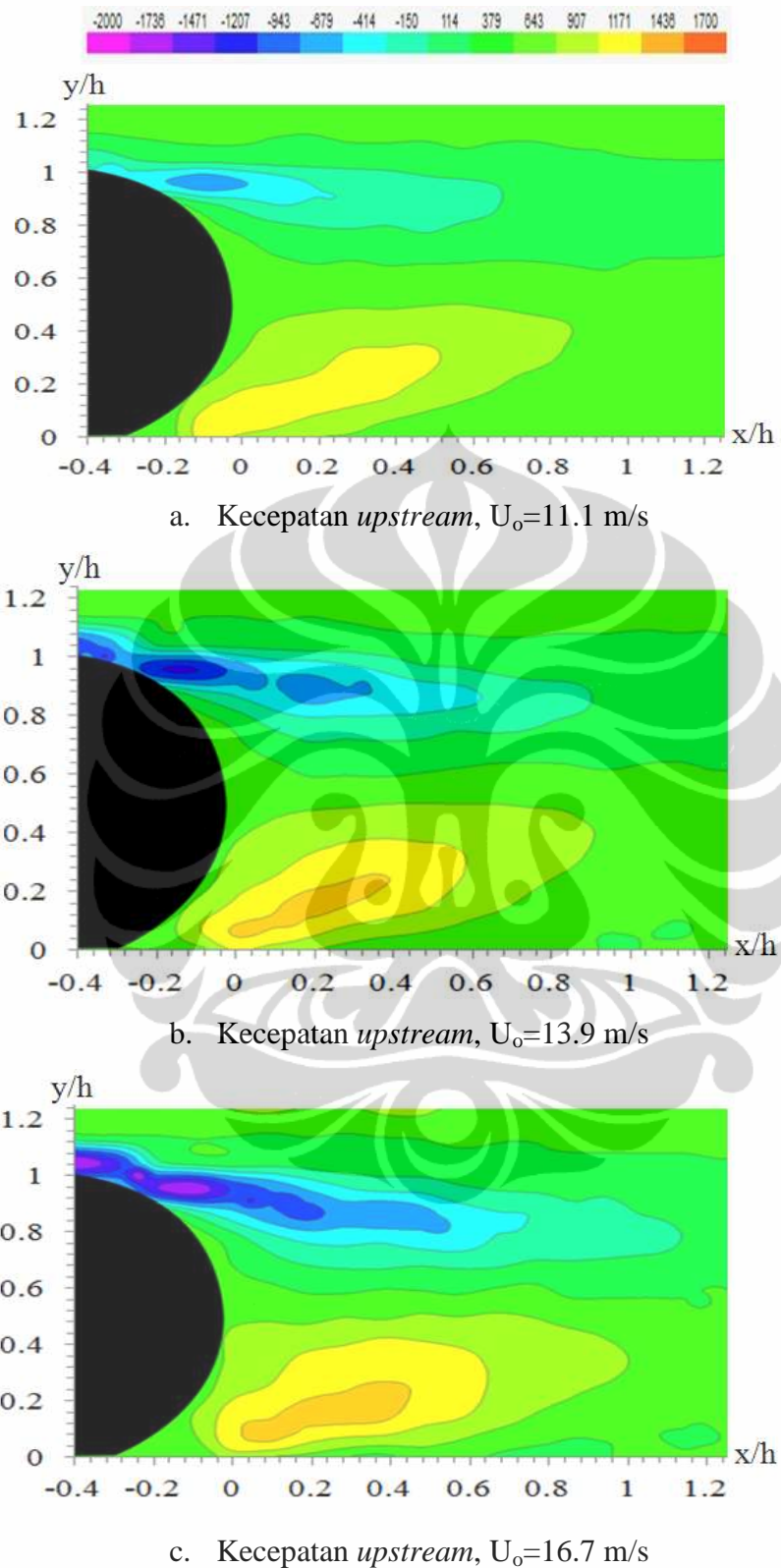
Penempatan kontrol aliran *synthetic jet* dengan kecepatan 2.0 m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik $z = 0$ dengan 3 variasi kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s memberikan pengaruh terhadap *vorticity* rata-rata yang diperoleh, seperti yang diperlihatkan pada Gb. 4.56. Adanya *synthetic jet* tersebut memberikan pengaruh terhadap panjang *vorticity* positif dan *vorticity* negatif yang diperoleh dan hasilnya dirangkum pada Tabel 4.52. Pengurangan panjang *vorticity* positif maksimum terjadi kecepatan *upstream* 11.1 m/s yaitu 15.65% dan 33.13% untuk bagian dalam dan luar. Dan untuk *vorticity* negatif bagian dalam dan luar adalah sebesar 26.18% dan 31.01% juga terjadi pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s.

Tabel 4.52 Panjang *vorticity* dengan *synthetic jet*, di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , (m/s)	Panjang <i>vorticity</i> positif/h		Panjang <i>vorticity</i> negatif/h	
		Bagian luar	Bagian dalam	Bagian luar	Bagian dalam
1	11.1	1.06	0.54	1.07	0.65
2	13.9	1.07	0.70	1.30	1.03
3	16.7	1.07	0.70	1.53	1.15



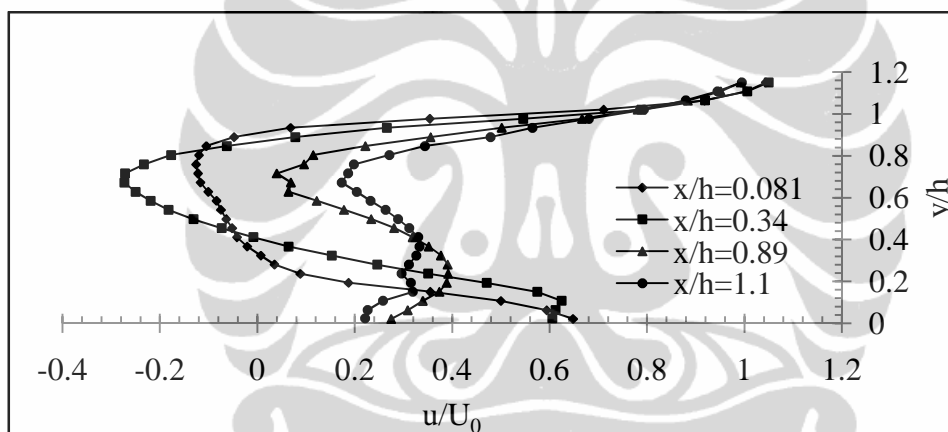
Gambar 4.55 *Vorticity* dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5$ m/s di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* bidang simetrik vertikal $z = 0$



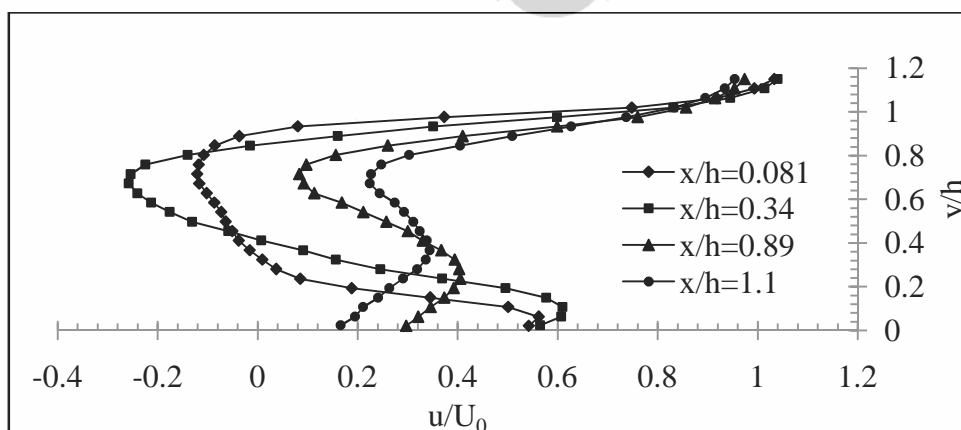
Gambar 4.56 *Vorticity* dengan *synthetic jet* di bagian belakang dari *reversed Ahmed body* pada bidang simetrik vertikal $z = 0$

4.3.2 Profil Kecepatan – Pengukuran PIV

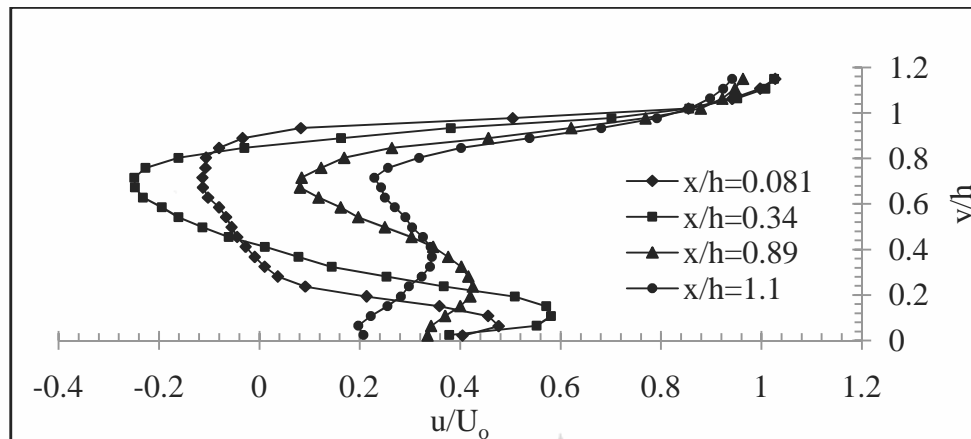
Gb. 4.57 memperlihatkan profil kecepatan rata-rata pada bagian belakang *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran dengan variasi 3 (tiga) kecepatan upstream yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Daerah yang diamati pada bagian belakang model uji adalah pada posisi $x/h = 0.081$, $x/h = 0.34$, $x/h = 0.89$ dan $x/h = 1.1$. Pada posisi $x/h = 0.081$ dan $x/h = 0.34$ terjadi aliran balik karena mengalami penurunan kecepatan ketika mengalir sepanjang permukaan model uji sehingga mengakibatkan perbedaan kecepatan yang tinggi antara daerah olakan dengan lapisan batas dan akhirnya berhenti sesaat di tempat lapisan batas memisahkan diri. Sementara pada posisi $x/h = 0.89$ dan $x/h = 1.1$ tidak terjadi aliran balik karena pada posisi tersebut aliran sudah berada di daerah *reattachment flow*.



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

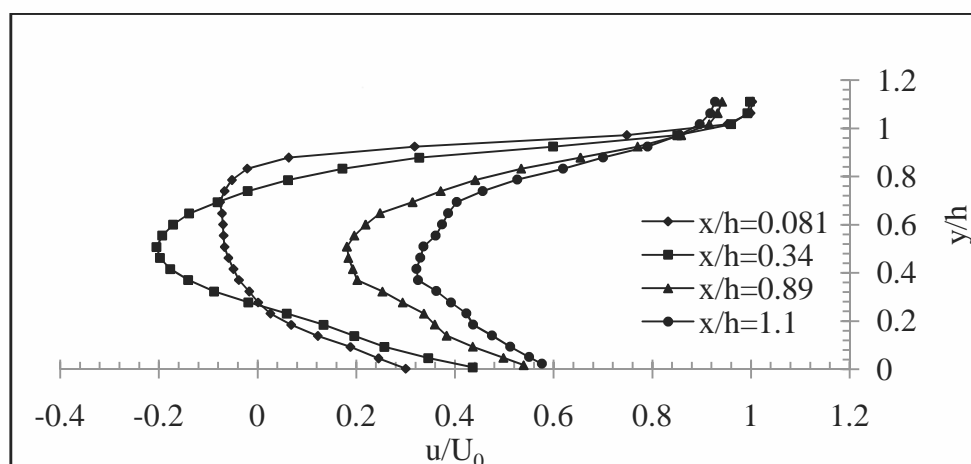


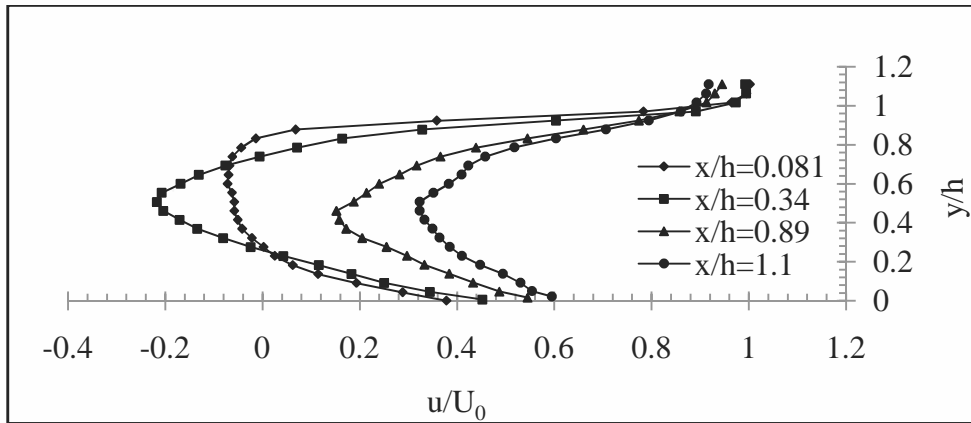
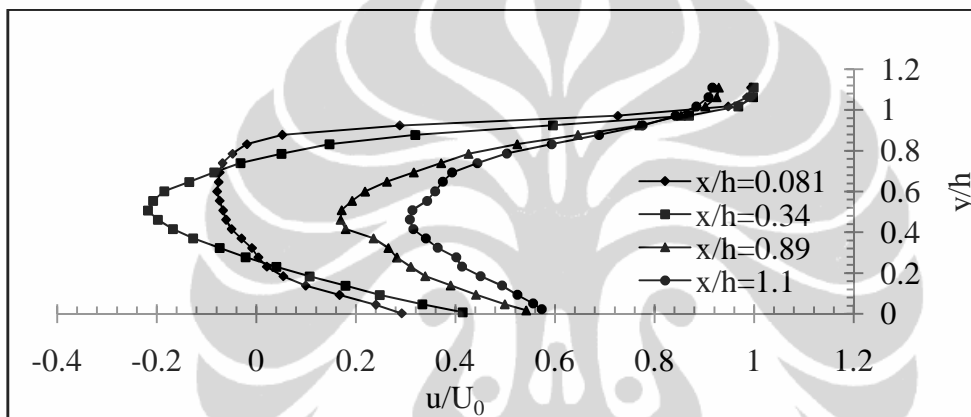
(b). Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9\text{m/s}$

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

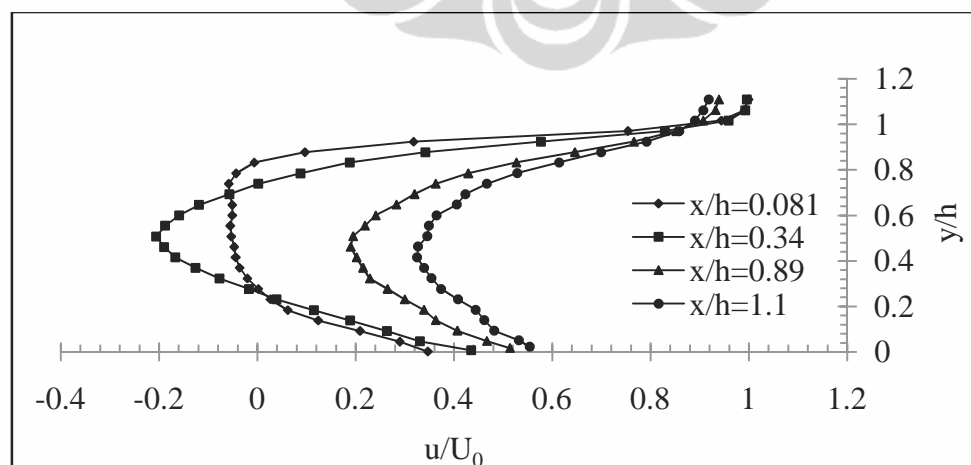
Gambar 4.57 Profil kecepatan tanpa kontrol aliran pada bagian belakang *reversed Ahmed body*

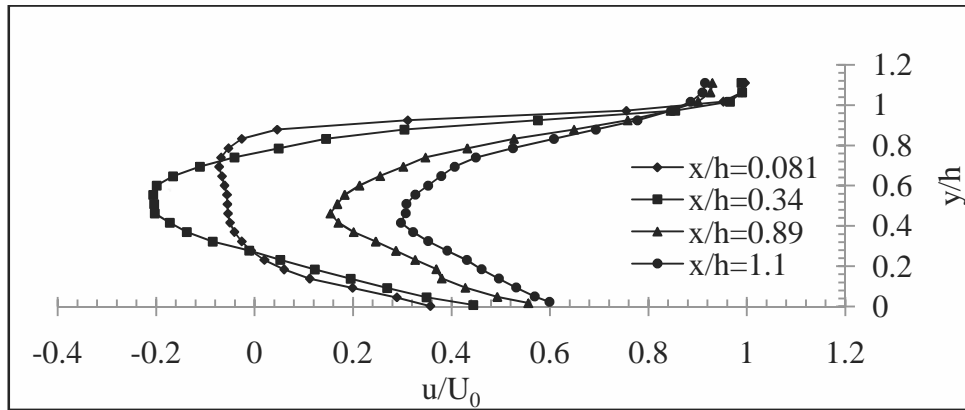
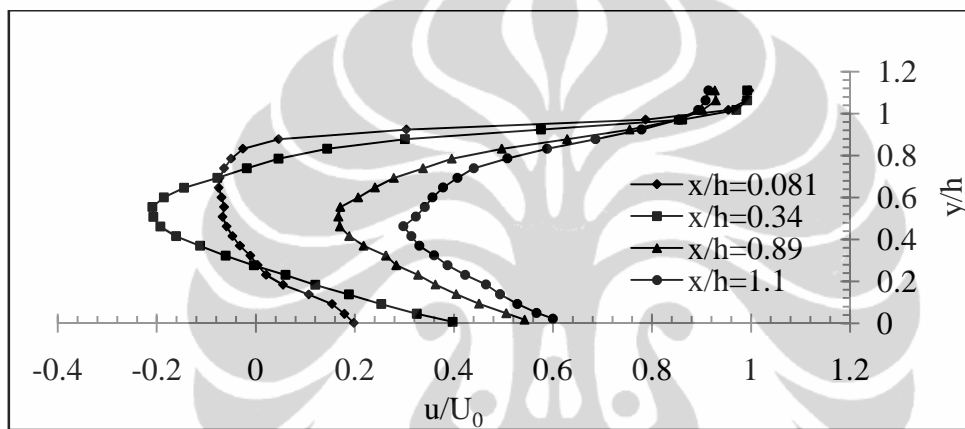
Profil kecepatan rata-rata dengan menggunakan kontrol aliran *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s yang ditempatkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* ditampilkan pada Gb. 4.58. Kecepatan *upstream* yang diberikan adalah 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Sementara untuk kecepatan *suction* 1 m/s dan 0.5 m/s ditunjukkan pada Gb. 4.59 dan Gb. 4.60. Secara umum terlihat bahwa dengan adanya *suction* tersebut mengakibatkan profil kecepatan rata-rata khususnya pada posisi $x/h = 0.081$ dan $x/h = 0.34$ mengalami pergeseran ke arah positif. Hal tersebut menandakan bahwa pada kedua posisi tersebut mengalami peningkatan kecepatan. Pergeseran tersebut terjadi karena adanya tambahan energi dari *suction* sehingga aliran terus bergerak melawan gradien tekanan balik.

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

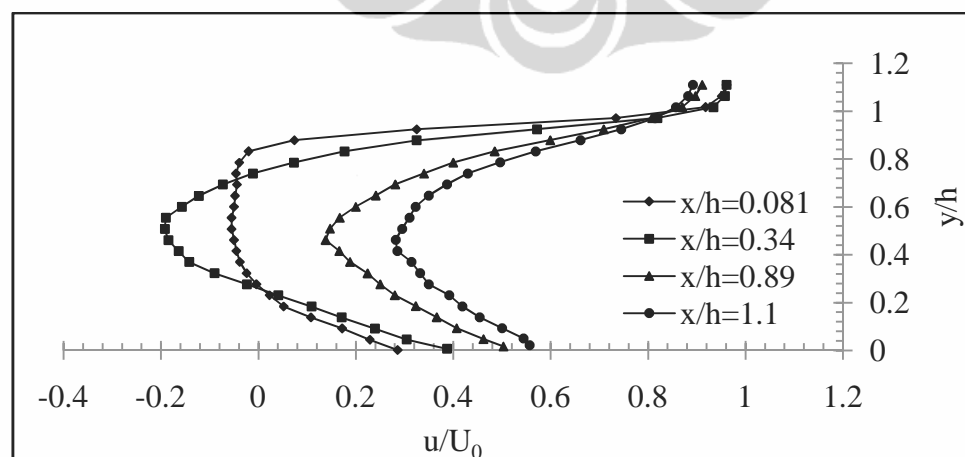
(b). Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9\text{m/s}$ (c). Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7\text{m/s}$

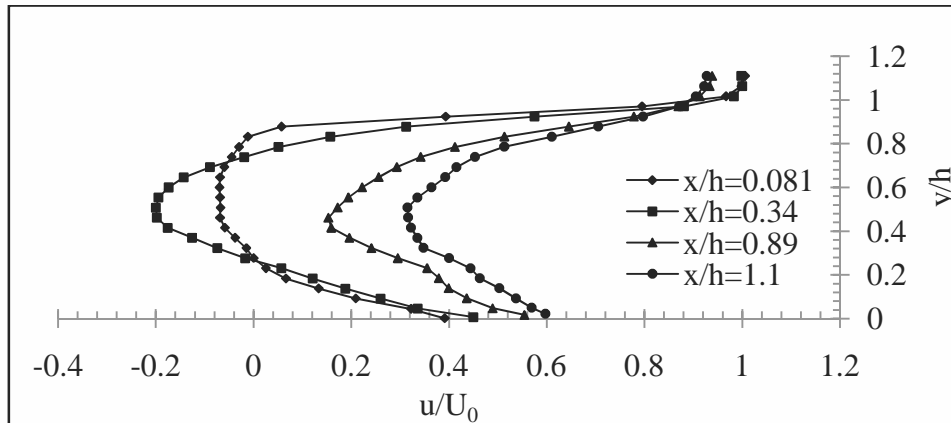
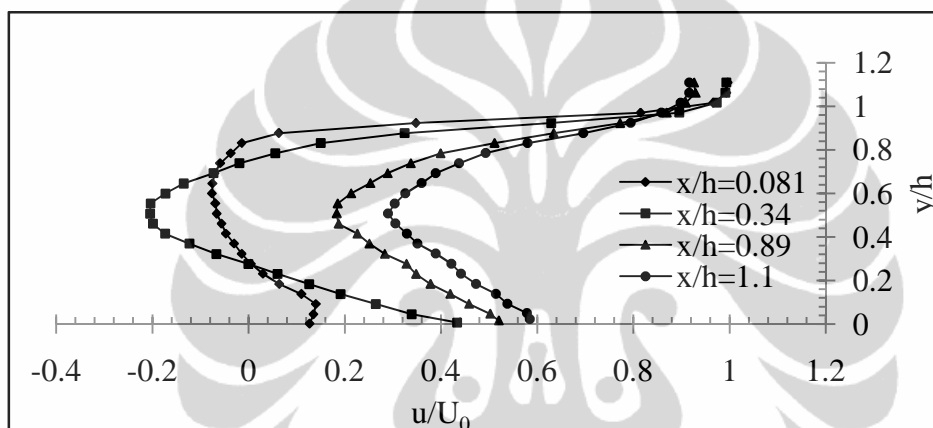
Gambar 4.58 Distribusi koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.5 \text{ m/s}$ di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

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

(b). Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9\text{m/s}$ (c). Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7\text{m/s}$

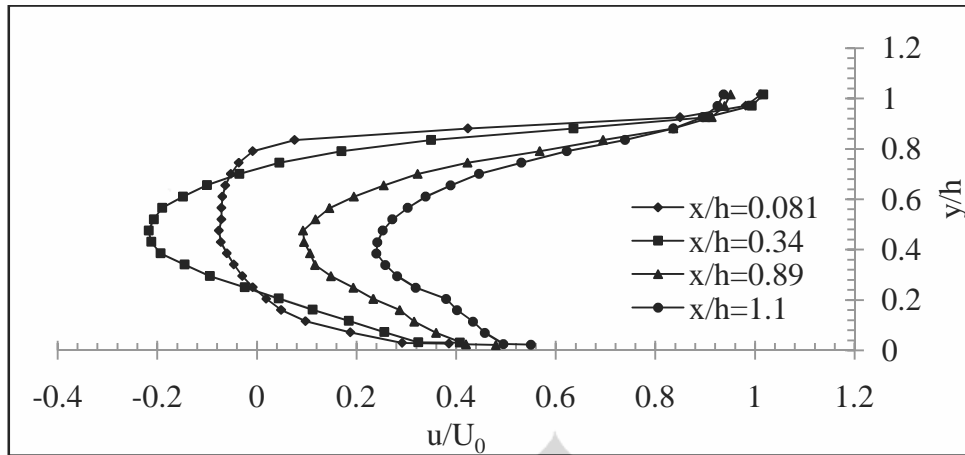
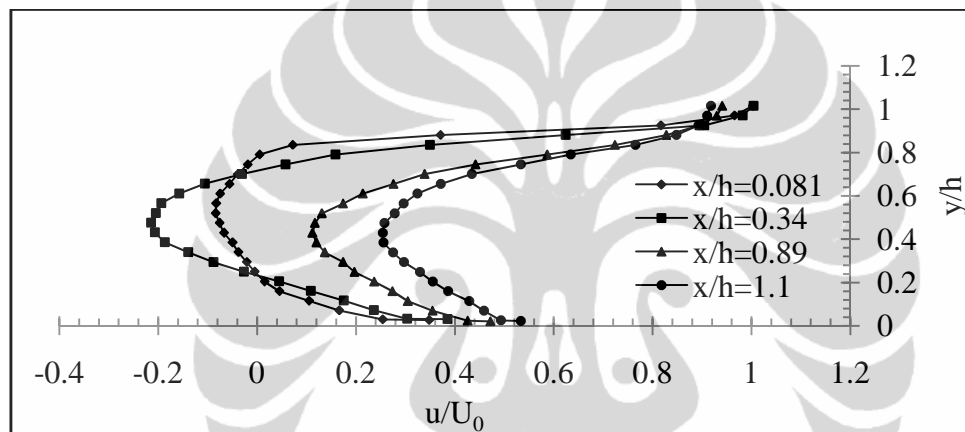
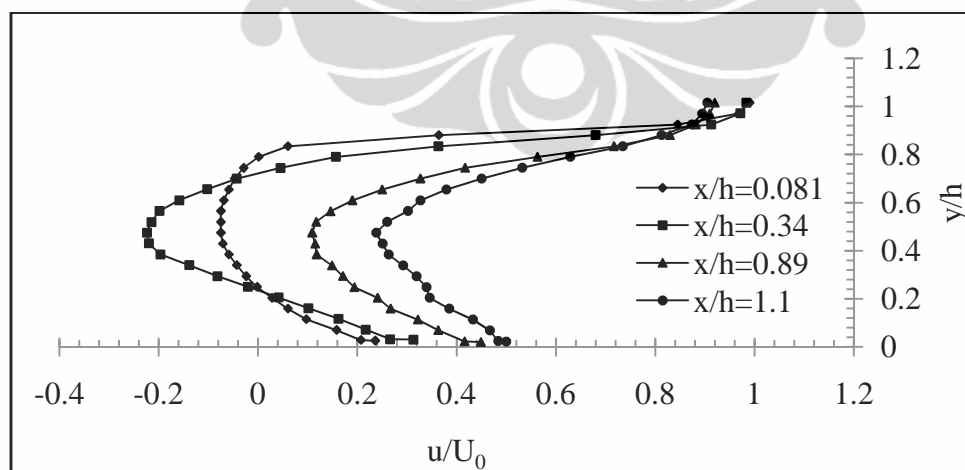
Gambar 4.59 Distribusi koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 1.0 \text{ m/s}$ di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

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

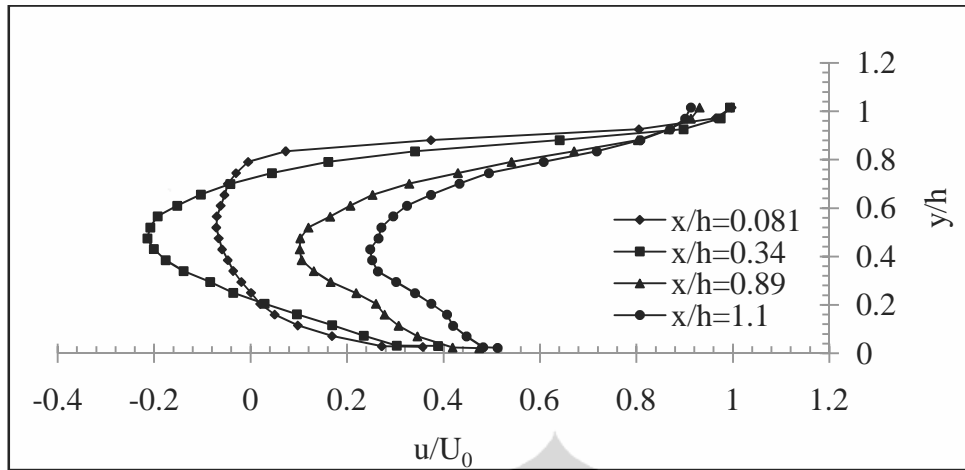
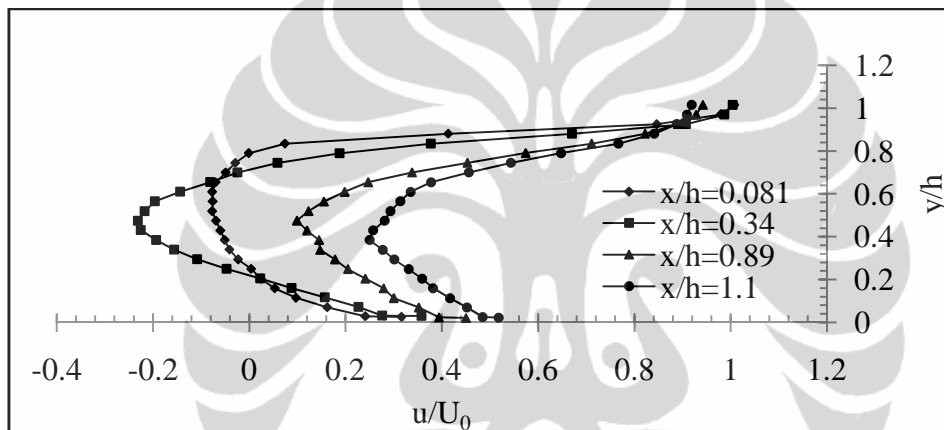
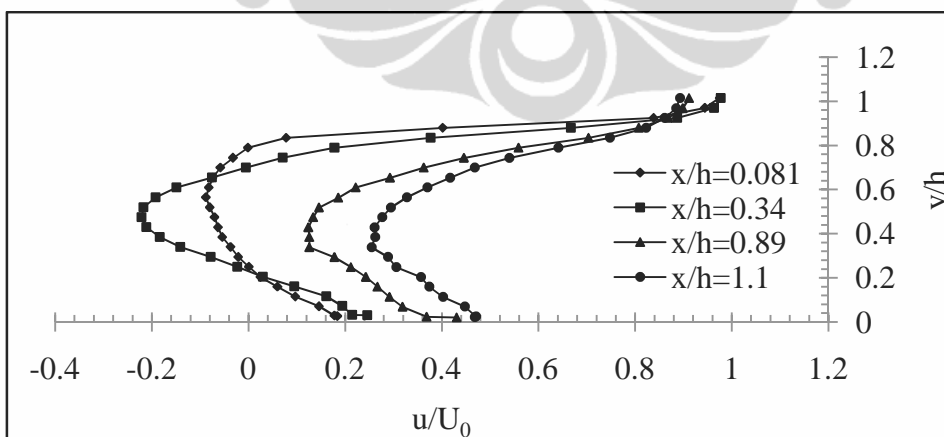
(b). Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9\text{m/s}$ (c). Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7\text{m/s}$

Gambar 4.60 Distribusi koefisien tekanan dengan *suction*, $U_{sc} = 0.5 \text{ m/s}$ di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

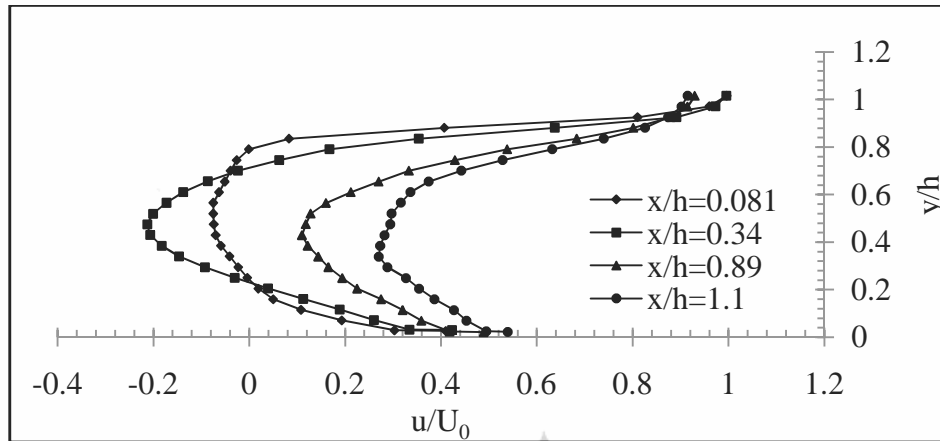
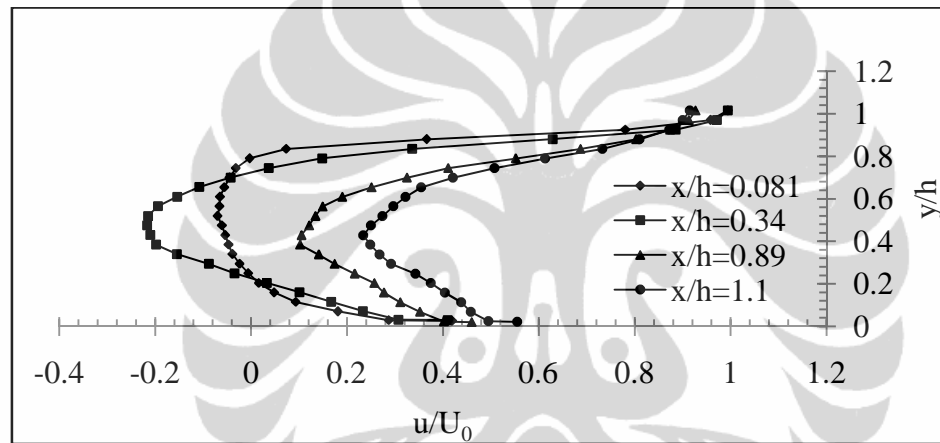
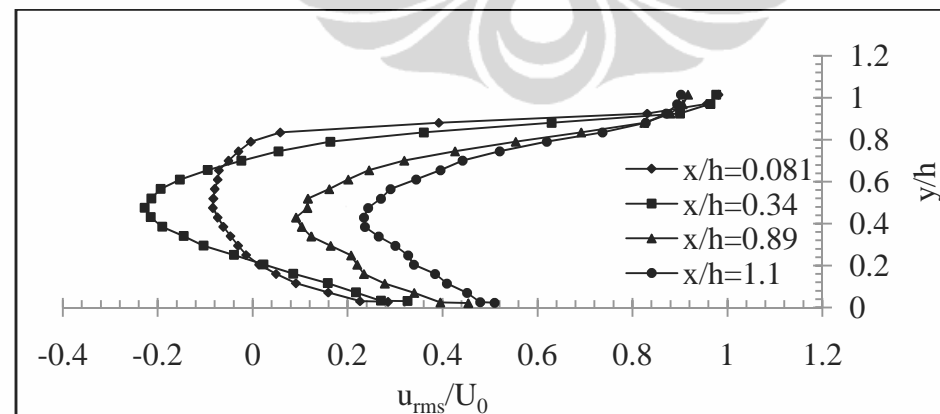
Pengaruh penempatan *blowing* terhadap profil kecepatan rata-rata pada bagian belakang *reversed Ahmed body* dengan kecepatan 1.5 m/s diperlihatkan pada Gb. 4.61. Kecepatan *upstream* yang diberikan adalah 11.1 m/s , 13.9 m/s dan 16.7 m/s . Gb. 4.62 dan Gb. 4.63 memperlihatkan pengaruh *blowing* dengan kecepatan masing-masing 1.0 m/s dan 0.5 m/s . Secara umum juga memperlihatkan bahwa dengan adanya *blowing* yang diletakkan pada bagian belakang model uji memberikan pengaruh terhadap profil kecepatan rata-rata, dimana terlihat bahwa pada posisi $x/h = 0.081$ dan $x/h = 0.34$ terjadi pergeseran ke arah positif. Hal tersebut memberikan suatu gambaran bahwa pada kedua posisi tersebut terjadi peningkatan kecepatan sehingga aliran akan terus bergerak melawan gradien tekanan karena adanya tambahan energi dari *blowing*.

(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 4.61 Distribusi koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.5 \text{ m/s}$ di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

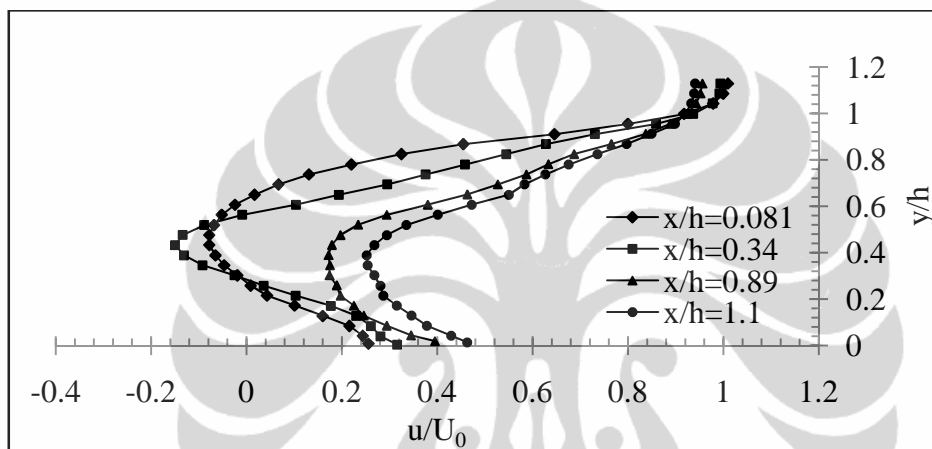
(a). Kecepatan *upstream*, $U_0=11.1\text{m/s}$ (b). Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9\text{m/s}$ (c). Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7\text{m/s}$

Gambar 4.62 Distribusi koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0 \text{ m/s}$ di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

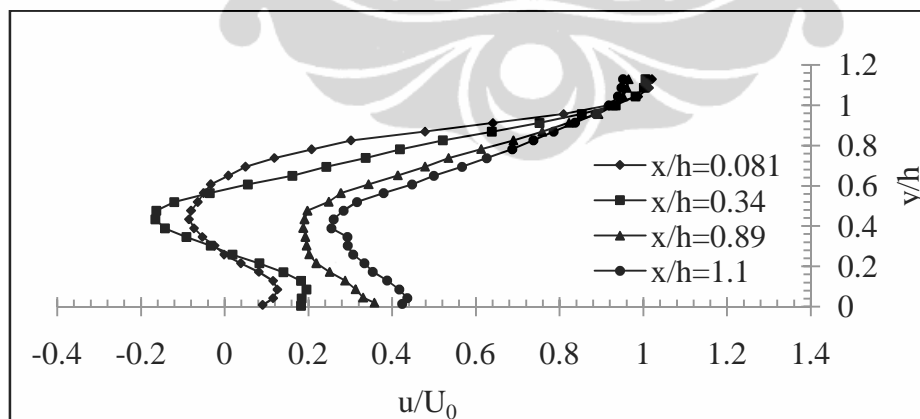
(a). Kecepatan *upstream*, $U_0=11.1\text{m/s}$ (b). Kecepatan *upstream*, $U_0=13.9\text{m/s}$ (c). Kecepatan *upstream*, $U_0=16.7\text{m/s}$

Gambar 4.63 Distribusi koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl} = 0.5 \text{ m/s}$ di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang $\theta = 0.5$

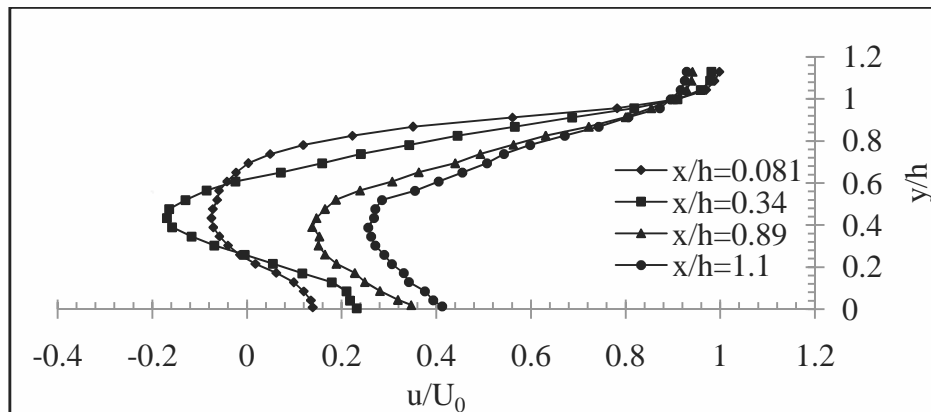
Synthetic jet dengan kecepatan 2 m/s yang ditempatkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap profil kecepatan rata-rata, seperti yang tampak pada Gb. 4.64. Kecepatan *upstream* yang diberikan adalah 11.1 m/s, 13 m/s dan 16.7 m/s. Pada Gb. 4.64, terlihat bahwa dengan adanya *synthetic jet*, profil kecepatan rata-rata khususnya pada posisi $x/h = 0.081$ dan $x/h = 0.34$ mengalami pergeseran ke arah positif. Hal tersebut memberikan informasi bahwa pada kedua posisi tersebut terjadi peningkatan kecepatan karena adanya tambahan energi dari *synthetic jet* sehingga aliran akan terus bergerak melawan gradient tekanan.



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



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

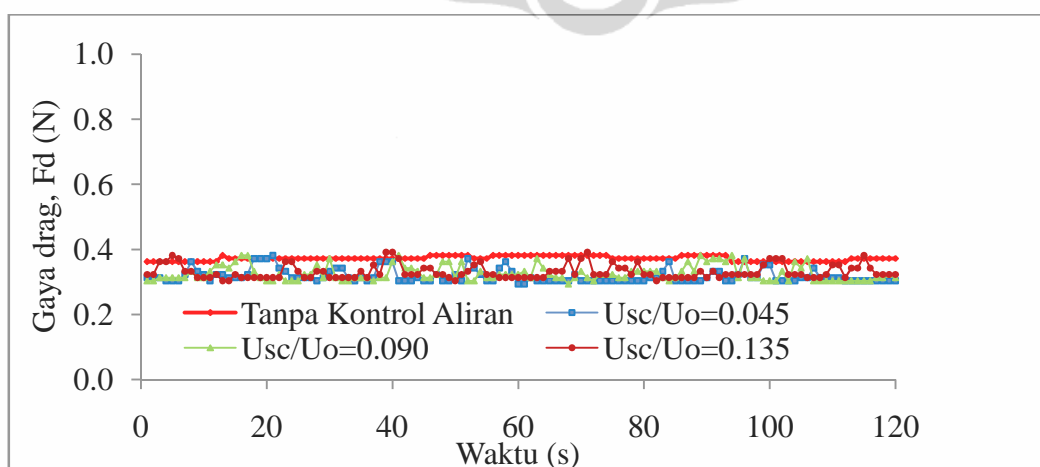


(c). Kecepatan *upstream*, $U_o=16.7\text{m/s}$

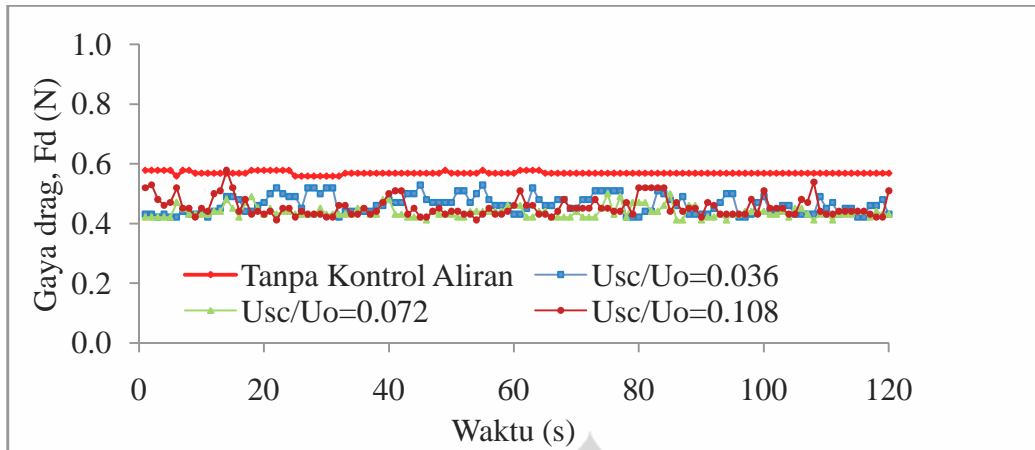
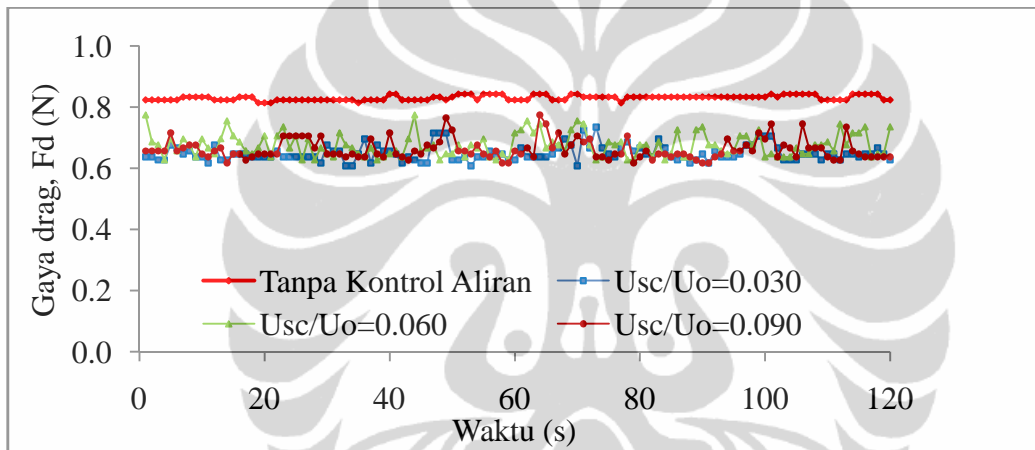
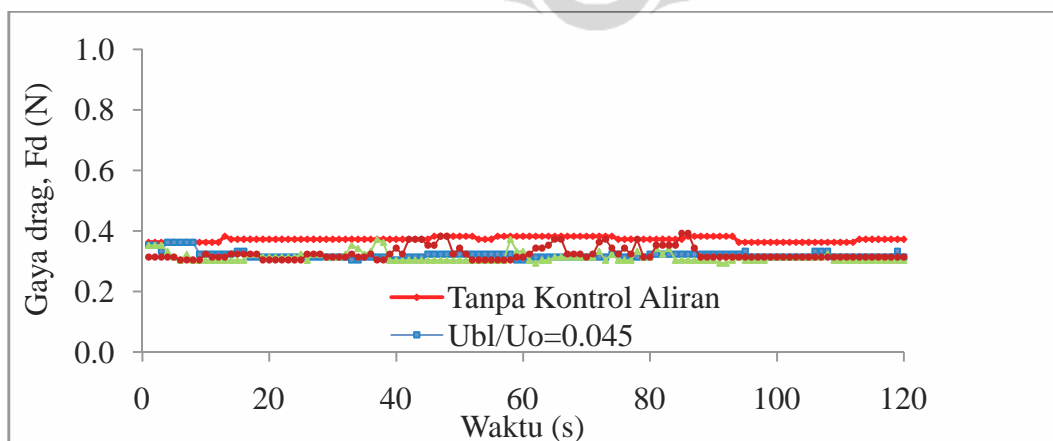
Gambar 4.64 Distribusi koefisien tekanan dengan *synthetic jet*, $U_{sj} = 2 \text{ m/s}$ di bagian belakang *reversed Ahmed body* pada bidang $z = 0.5$

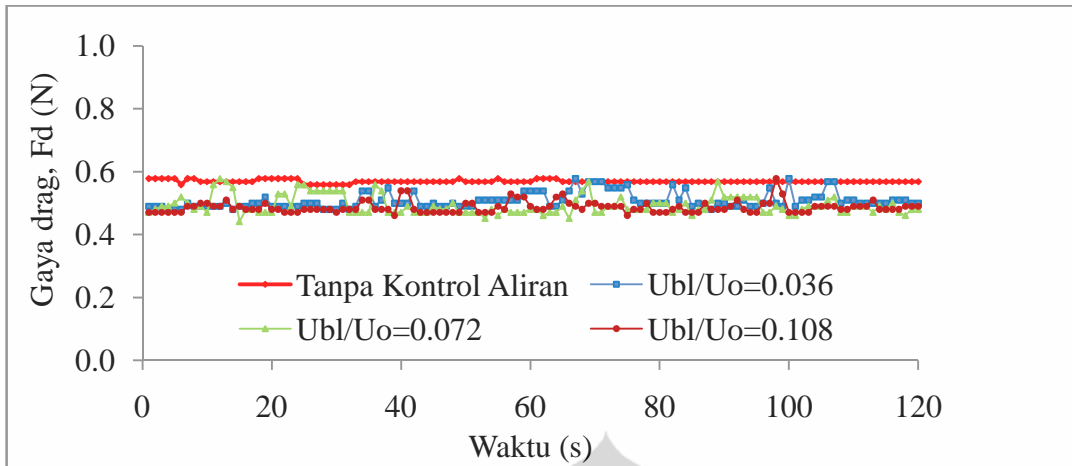
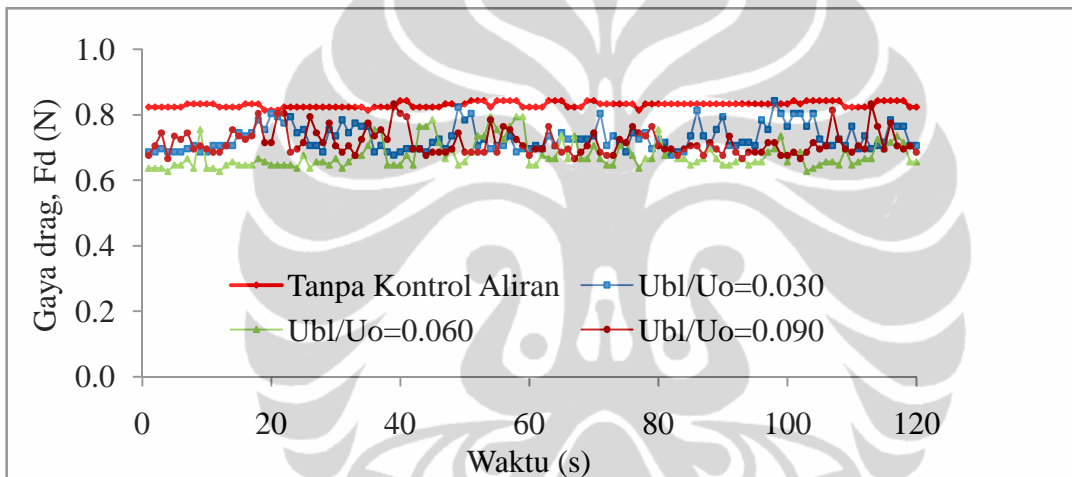
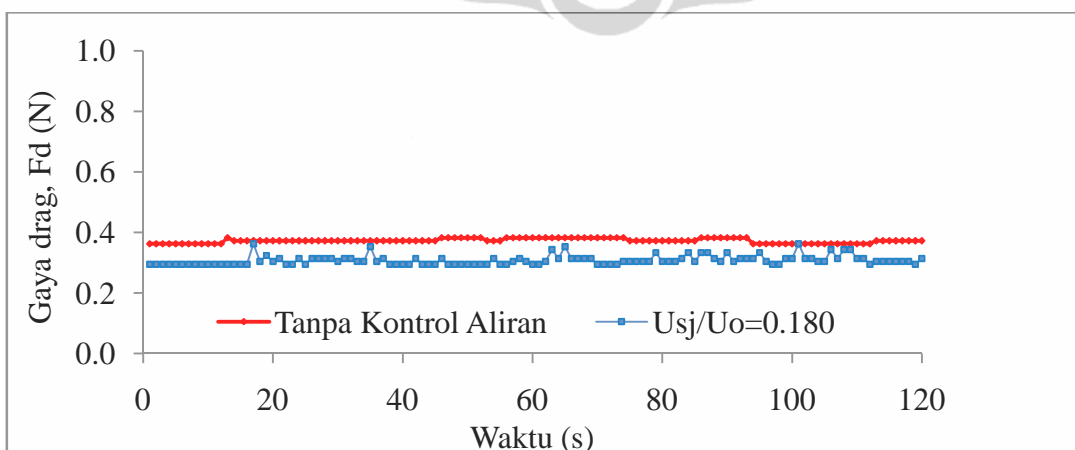
4.3.3 Pengurangan Drag (*Drag Reduction*) – Pengukuran Load Cell

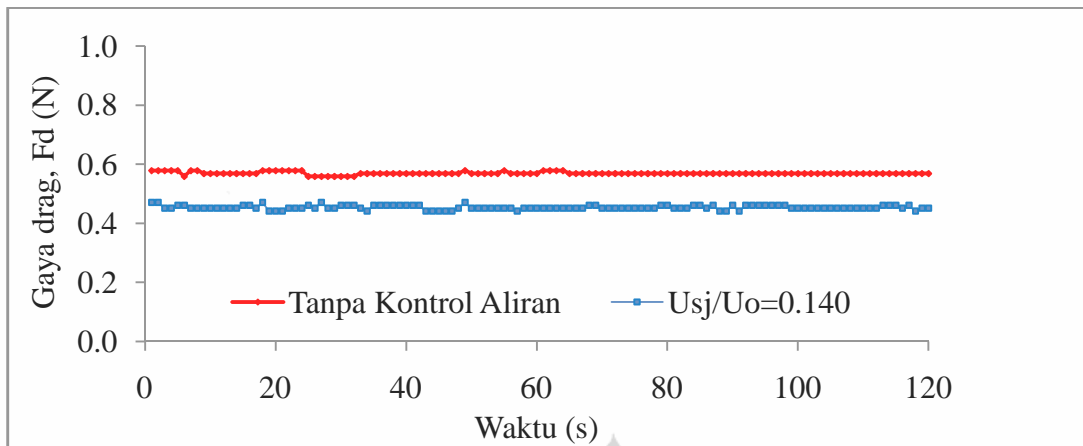
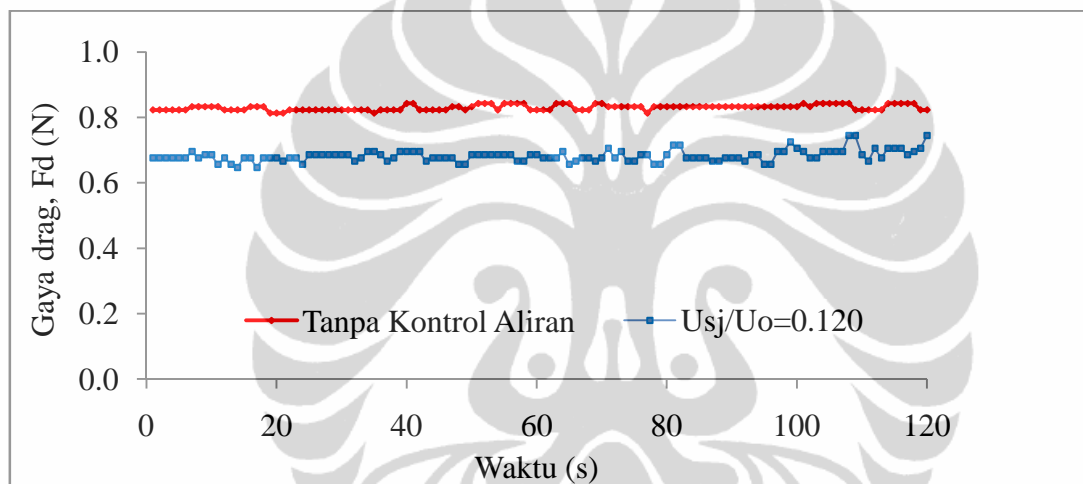
Untuk memvalidasi hasil komputasi numerik *drag* aerodinamika yang telah diperoleh, maka digunakan *load cell*. Data gaya drag yang diambil adalah sebanyak 120 buah untuk setiap 3 variasi perbandingan kecepatan *suction* dengan kecepatan *upstream* dan 3 variasi perbandingan kecepatan *blowing* dengan kecepatan *upstream* serta perbandingan kecepatan *synthetic jet* dengan kecepatan *upstream* dengan interval waktu pengambilan data adalah 120 detik. Data yang diperoleh berfluktuasi, seperti diperlihatkan pada Gb. 4.65, 4.66 dan 4.67 masing-masing untuk kontrol aliran *suction*, *blowing* dan *synthetic jet*.



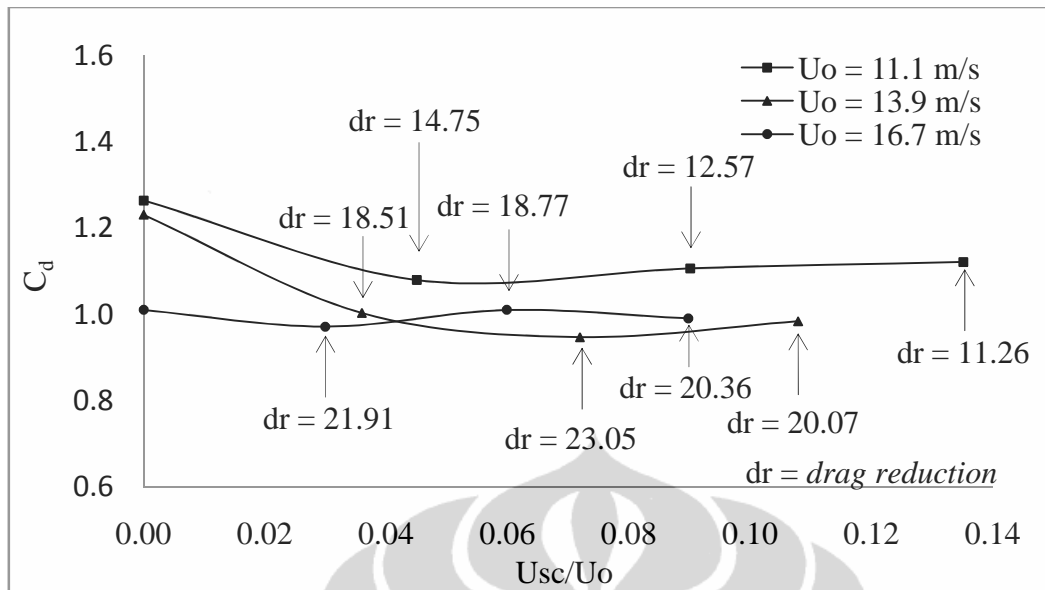
(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1 \text{ m/s}$

(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/sGambar 4.65 Fluktuasi data gaya *drag* dengan varisasi kecepatan *upstream*, *suction*(a). Kecepatan *upstream*, $U_o = 11.1$ m/s

(b). Kecepatan *upstream*, $U_o = 13.9$ m/s(c). Kecepatan *upstream*, $U_o = 16.7$ m/sGambar 4.66 Fluktuasi data gaya *drag* dengan varisai kecepatan *upstream*, *blowing*(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/sGambar 4.67 Fluktuasi data gaya *drag* dengan varisasi kecepatan *upstream*, *synthetic jet*

Gambar 4.68. memberikan suatu gambaran tentang koefisien drag sebagai fungsi dari kecepatan *suction* dari hasil eksperimental dengan kecepatan *upstream* yang berbeda yaitu 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s. Tabel 4.53 dan 4.54 menampilkan nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* yang diperoleh dari eksperimental.



Gambar 4.68 Koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *suction*, Eksperimen

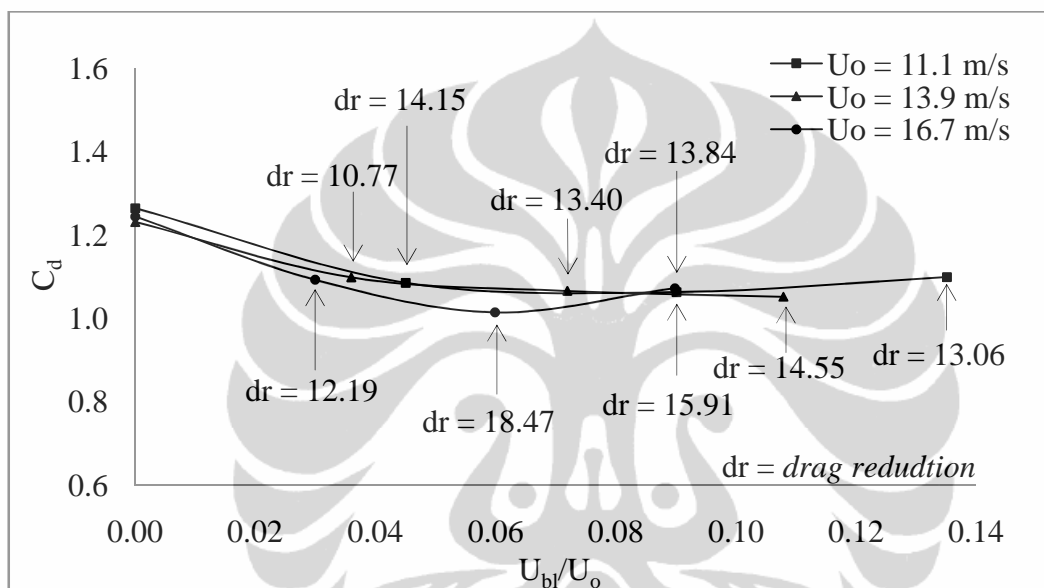
Tabel 4.53 Nilai koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *suction*, Eksperimen

No.	Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Koefisien <i>drag</i> , C_d			
		Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>suction</i> , U_{sc} (m/s)		
			0.5	1.0	1.5
1	11.1	1.264	1.080	1.107	1.121
2	13.9	1.231	1.004	0.948	0.984
3	16.7	1.244	0.972	1.011	0.991

Tabel 4.54 Nilai pengurangan *drag* (*drag reduction*) dengan *suction*, Eksperimen

No.	Kecepatan upstream, U_o (m/s)	Pengurangan <i>drag</i> (%)		
		Kecepatan <i>suction</i> , U_{sc} (m/s)		
		0.5	1.0	1.5
1	11.1	14.57	12.45	11.26
2	13.9	18.51	23.05	20.07
3	16.7	21.91	18.77	20.36

Pada Gb. 4.68 dan Tabel 4.53 dan 4.54 terlihat bahwa penambahan kontrol aliran berupa *suction* dengan kecepatan 1.5 m/s, 1.0 m/s dan 0.5 m/s yang dipasang pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* mempunyai pengaruh terhadap nilai koefisien *drag* rata-rata dan pengurangan *drag* dengan peningkatan kecepatan *upstream* yang diberikan yaitu 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s. Untuk model *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran, koefisien *drag* terkecil terjadi pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s yaitu 1.231.



Gambar 4.69 Koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *blowing*, Eksperimen

Pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s, *suction* diberikan dengan kenaikan 0.045 U_{sc}/U_o , pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *suction* 1.5 m/s atau $U_{sc}/U_o = 0.045$ yaitu 14.57%. Pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s, *suction* diberikan dengan kenaikan 0.036 U_{sc}/U_o , pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *suction* 1 m/s atau $U_{sc}/U_o = 0.072$ yaitu 23.05%. Pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s, *suction* diberikan dengan kenaikan 0.030 U_{sc}/U_o , dan pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *suction* 1.5 m/s atau $U_{sc}/U_o = 0.030$ yaitu 21.91%.

Demikian pula halnya, pada Gb. 4.69 ditunjukkan hasil eksperimen untuk koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *blowing* dengan variasi 3 (tiga) kecepatan *upstream* yaitu 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s. Penambahan kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 1.5 m/s, 1 m/s dan 0.5 m/s yang dipasang pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*, juga mempengaruhi nilai koefisien *drag* rata-rata

dan pengurangan *drag* dengan peningkatan kecepatan *upstream* yang diberikan yaitu 11.1 m/s, 13.6 m/s dan 16.7 m/s. seperti yang tampak dalam Gb. 4.69 dan Tabel 4.55 dan 4.56.

Tabel 4.55 Nilai koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *blowing*, Eksperimen

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien <i>drag</i> , C_d			
		Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>blowing</i> , U_{bl} (m/s)		
			0.5	1	1.5
1	11.1	1.264	1.085	1.063	1.099
2	13.9	1.231	1.099	1.066	1.052
3	16.7	1.244	1.093	1.015	1.072

Tabel 4.56 Nilai pengurangan *drag* (*drag reduction*) dengan *blowing*, Eksperimen

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Pengurangan <i>drag</i> (%)		
		Kecepatan <i>blowing</i> , U_{bl} (m/s)		
		0.5	1	1.5
1	11.1	14.15	15.91	13.06
2	13.9	10.77	13.40	14.55
3	16.7	12.19	18.47	13.84

Pada kecepatan *upstream* 11.1 m/s, *blowing* diberikan dengan kenaikan 0.045 U_{bl}/U_o , pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *blowing* 1.0 m/s atau $U_{bl}/U_o = 0.090$ yaitu 15.91%. Pada kecepatan *upstream* 13.9 m/s, *blowing* diberikan dengan kenaikan 0.036 U_{bl}/U_o , pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *blowing* 0.5 m/s atau $U_{bl}/U_o = 0.108$ yaitu 14.55%. Pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s, *blowing* diberikan dengan kenaikan 0.030 U_{bl}/U_o , dan pengurangan *drag* maksimum terjadi pada kecepatan *blowing* 1.0 m/s atau $U_{bl}/U_o = 0.060$ yaitu 18.47%.

Untuk kontrol aliran berupa *synthetic jet*, nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* yang diperoleh dari eksperimental diringkas dalam Tabel 4.57 dan Tabel 4.58.

Tabel 4.57 Nilai koefisien *drag* sebagai fungsi kecepatan *synthetic jet*, Eksperimen

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Koefisien <i>drag</i> , C_d	
		Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s
1	11.1	1.264	1.043
2	13.9	1.231	0.981
3	16.7	1.244	1.022

Tabel 4.58 Nilai pengurangan *drag* (*drag reduction*) dengan *synthetic jet*, Eksperimen

No.	Kecepatan <i>upstream</i> , U_o (m/s)	Pengurangan <i>drag</i> (%)
		Kecepatan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s
1	11.1	17.53
2	13.9	20.37
3	16.7	17.83

Pada Tabel 4.57 dan Tabel 4.58 terlihat bahwa dengan adanya kontrol aliran *synthetic jet* yang dipasang pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap nilai koefisien *drag* rata-rata dan pengurangan *drag* dengan perbandingan kecepatan *synthetic jet* terhadap kecepatan *upstream* yang diberikan yaitu $U_{sj}/U_o = 0.18$, 0.14 dan 0.12 . Pada $U_{sj}/U_o = 0.18$, pengurangan *drag* terbesar diperoleh pada $U_{sj}/U_o = 0.14$ sebesar 20.37%. Untuk $U_{sj}/U_o = 0.18$ dan $U_{sj}/U_o = 0.12$, pengurangan *drag* yang dihasilkan adalah masing-masing 17.53% dan 17.83%.

Tabel 4.59. Perbandingan pengurangan drag yang diperoleh dengan pendekatan komputasional dan eksperimental, *Suction*

Pengurangan Drag (%)	Kec. <i>suction</i> , $U_{sc} = 0.5$ m/s			Kec. <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.0$ m/s			Kec. <i>suction</i> , $U_{sc} = 1.5$ m/s		
	Perbandingan kec. <i>suction</i> terhadap kec. <i>upstream</i> , U_{sc}/U_0								
Komputasi	0.05	0.04	0.03	0.09	0.07	0.06	0.14	0.11	0.09
Eksperimen	13.00	13.78	14.73	13.08	13.86	14.70	13.36	14.17	14.84
Perbedaan	14.57	18.51	21.91	12.45	23.05	18.77	11.26	20.07	20.36
	-1.57	-4.72	-7.18	0.63	-9.19	-4.07	2.10	-5.89	-5.52

Tabel 4.60. Perbandingan pengurangan drag yang diperoleh dengan pendekatan komputasional dan eksperimental, *Blowing*

Pengurangan Drag (%)	Kec. <i>blowing</i> , $U_{bl} = 0.5$ m/s			Kec. <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1$ m/s			Kec. <i>blowing</i> , $U_{bl} = 1.5$ m/s		
	Perbandingan kec. <i>blowing</i> terhadap kec. <i>upstream</i> , U_{bl}/U_0								
Komputasi	0.05	0.04	0.03	0.09	0.07	0.06	0.14	0.11	0.09
Eksperimen	12.98	13.92	14.83	12.73	13.70	14.38	12.67	13.78	14.72
Perbedaan	14.15	10.77	12.19	15.91	13.40	18.47	13.06	14.55	13.84
	-1.17	3.15	2.64	-3.18	0.30	-4.09	-0.39	-0.77	0.88

Baik pada pendekatan komputasi maupun eksperimental diperoleh informasi bahwa perubahan koefisien *drag* yang sangat signifikan antara tanpa kontrol aliran dengan saat diaplikasikannya kontrol aktif berupa *blowing* dan *suction*, $U_{ac}/U_o = 0.045$ dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s. Sementara untuk variasi kecepatan berikutnya, $U_{ac}/U_o = 0.090$ dan 0.135 cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan seperti variasi kecepatan yang sebelumnya. Hal ini membuat variasi kecepatan saat $U_{ac}/U_o < 0.045$ menjadi penting untuk diinvestigasi lebih lanjut sehingga didapatkan perubahan koefisien *drag* yang terjadi sebelumnya. Hal yang sama juga terjadi untuk $U_{ac}/U_o = 0.036$ dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s. Untuk variasi kecepatan berikutnya, $U_{ac}/U_o = 0.072$ dan 0.108 juga cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan seperti variasi kecepatan yang sebelumnya, sehingga saat $U_{ac}/U_o < 0.036$ juga menjadi penting untuk dilakukan investigasi lebih lanjut. Demikian pula untuk $U_{ac}/U_o = 0.030$ dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s. Untuk variasi kecepatan $U_{ac}/U_o = 0.060$ dan 0.090, juga cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan seperti variasi kecepatan yang sebelumnya. Hal tersebut membuat saat $U_{ac}/U_o < 0.030$ juga menjadi penting untuk dilakukan investigasi lebih lanjut.

Perbandingan pengurangan *drag* yang diperoleh dengan menggunakan pendekatan komputasi dan eksperimental ditampilkan dalam Tabel 4.59 untuk kontrol aliran *suction* dan Tabel 4.60 untuk kontrol aliran *blowing* serta Tabel 4.61 untuk kontrol aliran *synthetic jet*. Pada Tabel 4.59 terlihat bahwa persentase perbedaan hasil pengurangan *drag* yang diperoleh dengan pendekatan komputasi dan eksperimental tertinggi dengan menggunakan kontrol aliran berupa *suction* terjadi pada $U_{sc}/U_o = 0.14$ dengan kecepatan *suction* 1.5 m/s sebesar 2.10% dan terendah sebesar -9.19% (tanda (-) menandakan bahwa hasil eksperimen lebih besar dibanding hasil komputasi) yang diperoleh pada $U_{sc}/U_o = 0.07$ dengan kecepatan *suction* 1 m/s. Dan pada Tabel 4.60, diperoleh perbedaan hasil tertinggi untuk penggunaan kontrol aliran *blowing* sebesar 3.15% terjadi pada $U_{bl}/U_o = 0.04$ dengan kecepatan *blowing* 0.5 m/s dan terendah diperoleh pada $U_{bl}/U_o = 0.06$ dengan kecepatan *blowing* 1.0 m/s sebesar -4.09%. Dan pada Tabel 4.61 diperoleh perbedaan hasil tertinggi untuk penggunaan kontrol aliran berupa *synthetic jet* sebesar 0.66% terjadi pada $U_{sj}/U_o = 0.12$ dengan dan terendah diperoleh pada $U_{sj}/U_o = 0.14$ sebesar -2.22% dengan kecepatan *synthetic jet* 2 m/s.

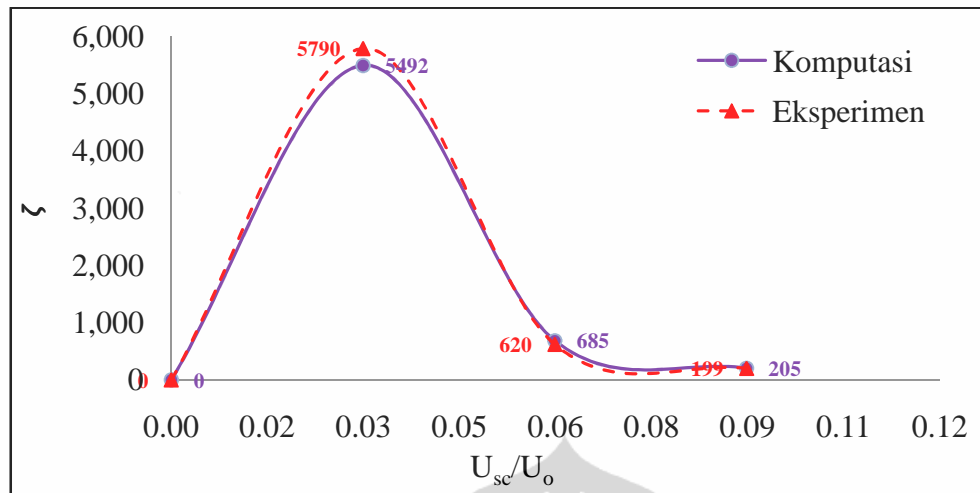
Tabel 4.61 Perbandingan pengurangan drag yang diperoleh dengan pendekatan komputasional dan eksperimental, *synthetic jet*

Pengurangan Drag (%)	Perbandingan kec. <i>synthetic jet</i> terhadap kec. <i>upstream</i> , U_{sj}/U_o (Kec. <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2$ m/s)		
	0.18	0.14	0.12
Komputasi	18.16	18.15	18.49
Eksperimen	17.52	20.37	17.83
Perbedaan	0.64	-2.22	0.66

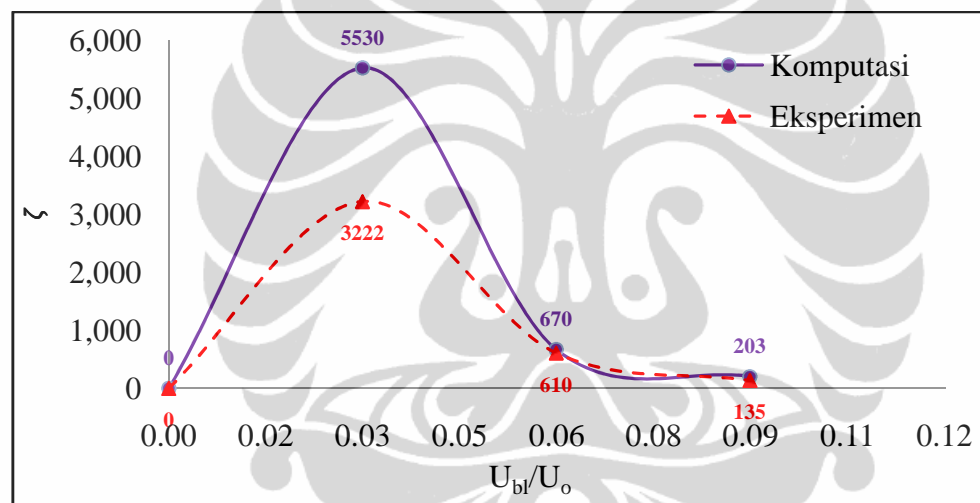
4.4 Efisiensi Energi Kontrol Aktif

Aplikasi kontrol aktif aliran pada dasarnya memanfaatkan sumber energi eksternal, oleh karena itu perlu diperhitungkan efisiensi energi dari penambahan kontrol aktif tersebut. Efisiensi kontrol aktif aliran (ζ) merupakan jumlah energi yang telah dihemat melalui pengurangan *drag* aerodinamika (P_{ec}) dibandingkan dengan konsumsi energi aktuator kontrol aktif aliran itu sendiri (P_c), seperti yang dinyatakan pada pers. (2.11). Pada bagian ini akan dibahas hasil untuk kontrol aktif *suction* dan *blowing* dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s untuk mengetahui sejauh mana efisiensi energi dari penambahan kontrol aktif tersebut. Pengaruh penggunaan kontrol aliran *suction* dan *blowing* terhadap efisiensi energi ditampilkan pada Gb. 4.70 dan Gb. 4.71.

Gb.4.70 menunjukkan efisiensi energi penggunaan kontrol aktif *suction* pada *reversed Ahmed body* dari hasil pendekatan komputasi dan eksperimen. Pada Gb. 4.70 tersebut terlihat bahwa hasil yang diperoleh melalui pendekatan komputasi mendekati hasil dari pendekatan eksperimen untuk semua variasi kecepatan kontrol aktif *suction*. Sementara itu efisiensi energi penggunaan kontrol aktif *blowing* pada *reversed Ahmed body* dari hasil pendekatan komputasi dan eksperimen ditunjukkan pada Gb.4.71. Dari Gb. 4.71 tersebut terlihat bahwa hasil yang diperoleh melalui pendekatan komputasi mendekati hasil dari pendekatan eksperimen untuk $U_{bl}/U_o = 0.06$ dan 0.09 . Berbeda halnya saat $U_{bl}/U_o = 0.03$, efisiensi hasil komputasi memiliki selisih yang cukup besar dengan efisiensi hasil eksperimen.



Gambar 4.70 Efisiensi energi penggunaan *suction* pada *reversed Ahmed body*



Gambar 4.71 Efisiensi energi penggunaan *blowing* pada *reversed Ahmed body*

Pada Gb.4.70 dan Gb.4.71 diperoleh informasi bahwa perubahan efisiensi energi yang sangat signifikan antara keadaan tanpa kontrol aktif aliran (*suction* dan *blowing*) dengan saat diaplikasikannya kontrol aktif berupa *suction* dan *blowing* ($U_{ac}/U_o = 0.03$). Sementara untuk variasi kecepatan berikutnya ($U_{ac}/U_o = 0.06$ dan 0.09) tidak mengalami perubahan yang sangat signifikan seperti variasi kecepatan yang sebelumnya. Hal ini membuat variasi kecepatan saat $U_{ac}/U_o < 0.03$ menjadi penting untuk diinvestigasi juga sehingga didapatkan perubahan besaran efisiensi energi kontrol aktif yang terjadi sebelumnya. Dimana perubahan tersebut akan dijadikan acuan dan sangat mempengaruhi besaran efisiensi energi kontrol aktif untuk variasi kecepatan berikutnya.

Informasi yang lain yang dapat diperoleh dari Gb. 4.70 dan Gb. 4.71 adalah bahwa efisiensi akan menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan kontrol aktif, karena semakin tinggi kecepatan kontrol aktif maka akan semakin besar energi yang dibutuhkan oleh aktuatornya. Hasil yang didapatkan diperkuat oleh hasil yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Roumeas, M. et al. 2008). Penelitian tersebut menggunakan model *Ahmed body* orisinal dengan variasi kecepatan kontrol aktif *suction* $U_{sc}/U_o = 0.375, 0.6, 1$ dan 1.5 . Mereka mendapatkan efisiensi tertinggi = 41 pada kondisi $U_{sc}/U_o = 0.375$.

Untuk mendapatkan efisiensi kontrol aktif yang lebih baik maka penggunaan kontrol *timing* pada kontrol aktif akan sangat membantu. Dimana dengan adanya kontrol *timing* tersebut, pengaktifan kontrol aktif aliran pada kecepatan kendaraan tertentu dapat diatur.

4.5 Mekanisme Pengurangan Drag di Bawah Pengaruh Kontrol Aktif

Penelitian tentang kajian kontrol aktif separasi aliran turbulen pada aerodinamika *bluff body* model kendaraan dilakukan dengan menggunakan metode komputasional dan eksperimental. Pendekatan komputasional menggunakan model turbulensi *k-epsilon standard* dan pendekatan eksperimental menggunakan pengukuran dengan teknik PIV (*particle image velocimetry*) dan *load cell*. Model uji yang digunakan adalah *bluff body* model kendaraan yang disederhanakan dengan memodifikasi *Ahmed body* dengan mengubah orientasi aliran dari bentuk aslinya (modifikasi *Ahmed body/reversed Ahmed body*). Model uji didekati dengan model *reversed Ahmed body* karena mempunyai kemiripan yang sangat dekat dengan disain dasar dari berbagai bentuk *body* kendaraan keluarga yang dewasa ini diproduksi di Indonesia. Pada penelitian ini, diaplikasikan kontrol aktif aliran berupa *suction*, *blowing*, dan *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*. Parameter yang dikaji adalah medan aliran dan gaya-gaya aerodinamika. Berikut diuraikan mekanisme pengurangan *drag* di bawah pengaruh kontrol aktif aliran.

a. Modus kontrol aliran *suction*

Separasi aliran adalah sebuah kondisi dimana aliran udara yang mengalir di sepanjang permukaan benda tidak mampu lagi menempel pada permukaan tersebut dan mengakibatkan 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). Pada aplikasi kendaraan, daerah bertekanan rendah ini menyebabkan perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang model kendaraan yang merupakan kontributor utama dari keseluruhan *drag*. Dari hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan secara umum terlihat bahwa terjadi peningkatan distribusi koefisien tekanan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* karena adanya energi tambahan dari *suction* sehingga terjadi penundaan separasi aliran di lapisan batas dari *reversed Ahmed body* dimana aliran terus bergerak melawan gradien tekanan balik. Penundaan separasi juga ditandai dengan bergesernya titik pusat resirkulasi bagian bawah F1 dan bagian atas F2 serta *saddle point* (S) yang menandakan titik berakhirnya resirkulasi mempunyai kecenderungan ke arah yang lebih menjauhi *reversed Ahmed body* pada daerah hilir. Zona resirkulasi yang terbentuk pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran mengakibatkan total tekanan jatuh sehingga dengan adanya kontrol aktif *suction* yang ditempatkan pada bagian belakang model uji mampu menggeser titik pusat resirkulasi ke arah yang menjauhi model uji dan mengurangi total tekanan jatuh. Hasil zona resirkulasi yang diperoleh dari penelitian ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan Roumeas et al. (2009). Roumeas et al mengaplikasikan kontrol aktif *suction* yang penempatannya di bagian atas dari jendela belakang (*rear window*) pada geometri mobil *fastback* yang disederhanakan. Hasil yang diperoleh juga menunjukkan pergeseran titik pusat resirkulasi F1 dan F2 ke arah yang lebih menjauhi model uji pada daerah hilir jika dibandingkan dengan tanpa kontrol aliran. Peningkatan panjang resirkulasi juga diperoleh untuk F1 dan F2 pada daerah hilir dari model uji.

Pada daerah *downstream* yang ditunjukkan oleh medan kecepatan aliran (*streamlines*) tanpa kontrol aliran terlihat adanya suatu struktur olakan yang terjadi pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*. 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. Olakan (*wake*) yang terjadi pada model uji tanpa kontrol aliran didominasi *vortex longitudinal* yang merupakan efek dari samping *reversed Ahmed body* seperti yang terlihat pada Gb. 4.6. *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. Dengan adanya *suction* yang diposisikan pada tepi atas bagian belakang dari *reversed Ahmed body* maka olakan yang diakibatkan oleh *vortex* longitudinal menjadi berkurang. Selain itu, juga terlihat bahwa aliran pada bagian tengah model uji mengalir lebih teratur jika dibandingkan dengan tanpa kontrol aliran sehingga *vortex* transversal yang terbentuk akibat aliran dari atas dan bawah model uji juga menjadi berkurang. Pengurangan olakan yang diperoleh dengan menerapkan *suction* akan berakibat pada berkurangnya *drag* yang terjadi pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*. Hasil yang diperoleh sejalan dengan pendapat Duppen & Ward V. (2009) bahwa untuk dapat mengurangi *drag* dapat dilakukan dengan mengurangi atau menghilangkan *vortex* longitudinal dengan mengurangi area olakan.

Pengurangan *drag* yang diperoleh dari hasil penelitian ini sebagai akibat peningkatan distribusi koefisien tekanan, pengurangan olakan (*wake*) dan berkurangnya zona resirkulasi pada bagian belakang *reversed Ahmed body* dengan menerapkan kontrol aliran *suction*. Pada penelitian ini diperoleh pengurangan *drag* maksimum sebesar 23.05% yang terjadi pada perbandingan kecepatan *suction* dengan kecepatan *upstream*, $U_{sc}/U_o = 0.07$ dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s. Hal ini disebabkan karena pada perbandingan kecepatan tersebut, peningkatan rata-rata distribusi koefisien tekanan dan pengurangan rata-rata intensitas turbulensi yang ditinjau pada bagian belakang model uji cenderung tertinggi. Penerapan kontrol aktif *suction* yang diletakkan di bagian atas dari jendela belakang (*rear window*) pada geometri mobil *fastback* yang disederhanakan juga telah dilakukan Roumeas et al. (2009), dimana mampu menghilangkan separasi dan memperoleh pengurangan *drag* aerodinamis sebesar 17%.

b. Modus kontrol aliran *blowing*

Strategi kontrol aliran untuk mengurangi *drag* aerodinamika sebuah benda pada dasarnya berlandaskan pada upaya memodifikasi timbulnya separasi aliran di lapisan batas dari permukaan padat sebuah benda yang berakibat pada terbentuknya aliran balik di sekitar benda tersebut. Aliran yang sedang bergerak maju secara teratur terpecah saat terjadinya separasi dan mengakibatkan perubahan drastis pada distribusi tekanan dan menimbulkan gaya hambat (*drag*). Oleh karena itu, pada banyak aplikasi aerodinamika

sangat diperlukan pengendalian terhadap aliran pada lapisan batas untuk mencegah atau menunda terjadinya separasi sejauh mungkin. Kontrol aliran *blowing* yang diaplikasikan pada penelitian ini memberikan hasil yang menggambarkan terjadinya penundaan separasi pada bagian belakang *reversed Ahmed body*. Hal tersebut terlihat dari pengurangan zona aliran resirkulasi yang terbentuk jika dibandingkan dengan tanpa kontrol aliran. Pengurangan zona aliran resirkulasi dengan mengaplikasikan kontrol aliran *blowing* merupakan salah satu faktor yang berperan sehingga terjadi pengurangan *drag*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa terlihat adanya pergeseran titik pusat resirkulasi bagian atas F1 dan bagian bawah F2 dengan peningkatan panjang resirkulasi serta *saddle point* yang mempunyai kecenderungan ke arah yang menjauhi *reversed Ahmed body*. Dengan bergesernya titik pusat resirkulasi pada bagian *downstream* mengakibatkan total tekanan jatuh menjadi berkurang. Hal tersebut terlihat dari peningkatan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh pada bagian belakang *reversed Ahmed body*. Peningkatan distribusi koefisien tekanan yang dihasilkan karena adanya energi tambahan dari kontrol aliran *blowing* sehingga juga berperan terhadap terjadinya penundaan separasi aliran di lapisan batas dari *reversed Ahmed body* dimana aliran terus bergerak melawan gradien tekanan balik dan mengakibatkan terjadinya pengurangan *drag*.

Peningkatan distribusi tekanan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* menyebabkan aliran terus bergerak melawan gradien tekanan sehingga olakan yang terbentuk menjadi berkurang. Parameter intensitas turbulensi digunakan untuk menyatakan besaran kuantitatif dari struktur olakan yang terbentuk akibat *vortex* longitudinal yang terlihat pada model uji tanpa kontrol aliran dan dengan *blowing*. Secara umum diperoleh penurunan intensitas turbulensi dan hal ini dapat dilihat dengan berkurangnya *vortex* longitudinal yang terjadi pada bagian belakang *reversed Ahmed body*. Demikian pula untuk aliran pada bagian tengah model uji mengalir lebih teratur jika dibandingkan dengan tanpa kontrol aliran sehingga *vortex* transversal yang terbentuk akibat aliran dari atas dan bawah model uji juga menjadi berkurang. Hal tersebut memberikan suatu indikasi bahwa pengurangan olakan yang diperoleh dengan penempatan *blowing* pada bagian belakang *reversed Ahmed body* akan mengakibatkan terjadinya pengurangan *drag*. Pengurangan olakan juga diperoleh oleh Roumeas, et.al. (2009) dengan mengaplikasikan *blowing* di belakang model *generic square back*.

Parameter yang berpengaruh terhadap pengurangan *drag* yang diperoleh pada penelitian ini dengan menempatkan *blowing* pada bagian belakang *reversed Ahmed body* adalah peningkatan distribusi koefisien tekanan, pengurangan olakan yang ditandai dengan berkurangnya intensitas turbulensi dan pengurangan zona aliran resirkulasi. Pada penelitian ini diperoleh pengurangan *drag* maksimum yang terjadi pada perbandingan kecepatan *blowing* dengan kecepatan *upstream*, $U_{bl}/U_o = 0.06$ dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s sebesar 18.47%. Hal ini disebabkan karena pada perbandingan kecepatan tersebut, peningkatan rata-rata distribusi koefisien tekanan pada bagian belakang model uji cenderung tertinggi. Hasil pengurangan *drag* juga diperoleh Roumeas et al (2009) dengan menempatkan kontrol aktif aliran *continous blowing* pada bagian belakang dari *generic squareback bluff body* sekitar 20%. Demikian pula yang dilakukan Bruneau C.H. et al (2009), dimana kontrol aktif aliran yang digunakan adalah tiga kombinasi penempatan *suction* dan *blowing* pada bagian belakang dari *Ahmed model*. Hasil pengurangan *drag* terbaik yang diperoleh sebesar 13%.

c. Modus kontrol aliran *synthetic jet*

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 gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*). Secara konseptual, lapisan batas yang mengalami retardasi ini diberikan energi tambahan dan digantikan dengan fluida berenergi tinggi sehingga memungkinkan aliran terus bergerak melawan gradien tekanan balik tanpa mengalami separasi. Salah satu kontrol aktif yang melibatkan penambahan aliran adalah *synthetic jet*. Pada penelitian ini juga digunakan *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*. Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa dengan mengaplikasikan *synthetic jet* secara umum terjadi peningkatan distribusi koefisien tekanan karena adanya energi tambahan dari *synthetic jet* secara *intermitten* sehingga aliran terus bergerak melawan gradien tekanan balik. Peningkatan distribusi tekanan berkaitan dengan dinamika zona resirkulasi yang terjadi pada bagian belakang *reversed Ahmed body* yang berakibat pada perubahan zona resirkulasi. Secara umum terlihat bahwa pergeseran posisi titik pusat resirkulasi dan *saddle point* serta perubahan

panjang resirkulasinya ke arah yang mendekati *reversed Ahmed body*. Hal ini merupakan kebalikan dari fenomena yang terjadi dengan penerapan *suction* dan *blowing*. Penggunaan *synthetic jet* mengakibatkan area aliran resirkulasi yang dihasilkan ternyata lebih kecil jika dibandingkan dengan adanya *suction* dan *blowing*. Selain itu, juga dapat dilihat dari hasil intensitas turbulensi yang diperoleh dimana menunjukkan bahwa pengurangan intensitas turbulensi yang diperoleh dengan aplikasi *synthetic jet* lebih besar dibandingkan dengan *suction* dan *blowing*. Dengan demikian, kedua hal tersebut yang mengakibatkan terjadinya pengurangan *drag*. Menurut Glazer et al (2003), *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 kenyataannya, *synthetic jet fluid* sebenarnya mempenetrasi lapisan batas untuk memberikan efek medan aliran secara keseluruhan terhadap *solid body*.

Olakan yang terjadi pada bagian belakang *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran didominasi oleh *vortex longitudinal* akibat aliran dari samping model uji. Selain itu, juga terlihat *vortex transversal* akibat aliran dari atas dan bawah model uji. Dengan penggunaan *synthetic jet* pada bagian belakang *reversed Ahmed body* terlihat bahwa *vortex longitudinal* berkurang baik pada kondisi hisapan maupun tiupan seperti yang terlihat pada Gb. 4.13, 4.14 dan 4.15. Demikian pula untuk *vortex transversal* juga berkurang dan hal tersebut dapat dilihat dimana aliran pada bagian tengah dari model uji mengalir lebih teratur. Untuk menyatakan besaran olakan yang dihasilkan maka intensitas turbulensi merupakan parameter yang digunakan untuk besaran olakan yang terbentuk. Dari hasil penelitian yang diperoleh diinformasikan bahwa secara umum terjadi penurunan intensitas turbulensi pada bagian belakang *reversed Ahmed body*. Pengurangan olakan tersebut juga memberikan suatu indikasi bahwa akan diperoleh pengurangan *drag*. 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 gradien tekanan balik.

Pada penelitian ini, pengurangan *drag* yang diperoleh dengan mengaplikasikan *synthetic jet* pada bagian belakang *reversed Ahmed body* dipengaruhi oleh peningkatan distribusi koefisien tekanan, pengurangan olakan dan zona resirkulasi. Pengurangan

drag maksimum sebesar 20.37% terjadi pada perbandingan kecepatan *synthetic jet* dengan kecepatan *upstream*, $U_{sj}/U_o = 0.14$ dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s. Hal ini disebabkan karena pada perbandingan kecepatan tersebut peningkatan rata-rata koefisien tekanan dan pengurangan rata-rata intensitas turbulensi yang diperoleh tertinggi pada bagian belakang model uji. Hasil pengurangan *drag* juga dilaporkan Kourta dan Gillieron (2009) dengan menggunakan kontrol aktif *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian atas jendela belakang *Ahmed model* sebesar 13%.



BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil komputasional dan eksperimental yang diperoleh maka dapat diambil suatu kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Olakan yang terbentuk pada bagian belakang *bluff body* model kendaraan didominasi oleh *vortex* longitudinal akibat aliran dari samping model uji.
- 2) Parameter yang memberikan pengaruh terhadap pengurangan *drag* yang terjadi pada *bluff body* model kendaraan dengan penerapan kontrol aktif berupa *suction*, *blowing* dan *synthetic jet* adalah peningkatan distribusi koefisien tekanan, pengurangan olakan (*wake*) dan berkurangnya zona resirkulasi pada bagian belakang dari model uji.
- 3) Penggunaan kontrol aliran aktif berupa *suction*, *blowing* dan *synthetic jet* pada *bluff body* model kendaraan memberikan hasil yang menggambarkan terjadinya penundaan separasi pada bagian belakang *bluff body* model kendaraan.
- 4) Penerapan kontrol aliran *suction* dan *blowing* pada bagian belakang *bluff body* model kendaraan mengakibatkan pergeseran titik pusat resirkulasi bagian atas (F1) dan bagian bawah (F2) disertai peningkatan panjang resirkulasinya dan *saddle point* mempunyai kecenderungan menjauhi model uji pada daerah hilir. Mekanisme sebaliknya terjadi dengan penggunaan *synthetic jet*.
- 5) Pengurangan *drag* terbaik yang diperoleh dengan menggunakan kontrol aktif berupa *suction*, *blowing* dan *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian belakang *bluff body* model kendaraan adalah 18.47% sampai 23.05%.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed S.R., G. Ramm and G. Faltin., 1984, SAE paper, Detroit, Michigan, USA, 840300-01
- Aider J.L., Beaudoin J.F., and Wesfreid J.E., 2009, Drag and Lift Reduction of a 3D Bluff-Body using Active Vortex Generators, *Experimental in Fluids*, Springer.
- Anderson, J.D., 2001, *Fundamental of Aerodynamics* (3rd ed), Singapore, McGraw-Hill
- Bak, C., Fuglsang, P., Johansen, J., and Antoniou, I., 2000, Risoe National Laboratory, Technical Report No. Risoe-R-1193.
- Bearman, P. W., 1965, Investigation of the Flow Behind a Two-Dimensional Model With a Blunt Trailing Edge with Splitter Plates, *J. Fluid Mech.*, 21, pp.241-255.
- Bearman, P. W., and Harvey, J. K., 1993, Control of Circular Cylinder Flow by the Use of Dimples, *AIAA J.*, 31, pp. 1753-1756.
- Bruneau C. H., 2010, Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body, *Computers & Fluids* 39, pp. 1875-1892.
- Bruneau C.H., Creuse E., Depeyras D., Gillieron P., and Mortazavi I., 2009, *International Journal Aerodynamics*, Inderscience Enterprises Ltd.
- Brunn A. & Nitschew, 2005, Active Control of Turbulent Separated Flows by Means of Large Scale Vortex Excitation. In: RODI W. and MULAS M. (Eds.) *Engineering Turbulence Modelling and Experiments* 6, Elsevier Science Ltd., 555–564
- Brunn A., Wassen E., Sperber D., Nitsche W., and Thiele F., 2007, Active Drag Control for a Generic Car Model, *Active Flow Control*, NNFM 95, pp. 247–259.
- Conan B., Anthoine J., and Planquart P., 2011, Experimental aerodynamic study of a car-type bluff body, *Experimental in Fluids*, 50, pp. 1273–1284
- Cooper, K. P., 1985, SAE Paper No. 850288.
- 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

- Fares E., 2006, Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach, *Computers and Fluids*, 35, pp. 940-950
- Fieldler, H. E., and Fernholz, H. H., 1990, On Management and Control of Turbulent Shear Flows, *Prog. Aerospace Sci.* 27, pp. 305-387
- Fourrie G, Keirsbulck L., Labraga L. & Gillie´ron P., 2011, Bluff-body drag reduction using a deflector, *Experimental in Fluids*, 50, pp. 385–395
- Franck G. & D’Elia J., 2004, CFD modeling of the flow around the Ahmed vehicle model, <http://www.cimec.org.ar>
- Gad-El-Hak, M., 1996, Modern Development in Flow Control, *Appl. Mech. Rev.*, 9, pp. 365-379
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) (2001). "Bilan 2001 des changements climatiques : Les elements scientifiques", 3èmerapport evaluation 2001, http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/french/pdf/wg1sum.pdf.
- Geropp, D. and Odenthal , H. J., 2000, Drag Reduction of Motor Vehicle by Active Flow Control Using the Coanda Effect, *Experimental in Fluids*, 28, pp. 74-85.
- Gillieron, P., 2003, Detailed Analysis of the Overtaking Process, *J. Mech. Eng.*, 53, pp. 1-17.
- Gillieron P. and Kourta A., 2010, Aerodynamic drag reduction by vertical splitter plates, *Experimental in Fluids*, 48, pp. 1–16
- Glazer A & Amitay M., 2003, Modification of Fluid Flow About Bodies and Surfaces Through Virtual Aero-Shaping of Airfoils with Synthetic Jet Actuator, United State Patent.
- Harinaldi, Budiarmo, Tarakka R., and Simanungkalit S.P.. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*.11(03) (2011) 24-30.
- Hinterberger C., Villalba M. G. & Rodi W., 2004, Large eddy simulation of flow around the Ahmed body, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany

- Honohan et al., 2000, Aerodynamic Control Using Synthetic Jet, AIAA.
- How Strain Gages Work, Strain Gage Bonding Manual, Kyowa.
- Hucho, W. H., 1998, Aerodynamics of Road Vehicle, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 25, pp. 485-537.
- Hucho. W.H., 2002, Aerodynamik der stumpfen Körper - Physikalische Grundlagen und Anwendung in der Praxis, Vieweg-Verlag
- IEA, 2007, World Energy Outlook 2007, Executive Summary, China and India insights, International Energy Agency IEA, ISBN: 978-92-64-02730-5.
- Ivanic T & Gillieron P., 2004, Reduction of the aerodynamic drag due to cooling system: an analytical and experimental approach, SAE Paper 2005-01-1017
- Jean-Luc Aider, Jean-Francois Beaudoin, and Jose Eduardo Wesfreid., 2009, Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generator, *Journal of Experimental Fluids*, 9, pp. 365-379
- Kourta A. & Gillieron P., 2009, Impact of the Automotive Control on the Economic Issues, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 2, No. 2, pp. 69-75.
- Krajnović S. and Fernandes J., 2011, Numerical simulation of the flow around a simplified vehicle model with active flow control, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, Issue 1, pp. 192-200
- Krentel D., Muminovic R, Brunn A., Nitsche W., and King R., 2010, Application of Active Flow Control on Generic 3D Car Models, R. King (Ed.): *Active Flow Control II*, NNFM 108, pp. 223–239
- Lienhart H., Stoots C., and Becker S, 2002, Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified car Model (Ahmed Model), *Numerical and Experimental Fluid*.
- Mello, Miranda H.C., Catalano, Martini F., 2004, Study of the Effect of Synthetic Jet Actuators on the Delay of Transition of the Boundary Layer Developed on a Flat Plate, 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, pp. 1-9.

- Minguez M., Pasquetti R. & Serre E., 2008, High-order Large Eddy Simulation of Flow over the Ahmed Body” Car Model”, *Physics of Fluids*, 20
- Munson, B., 2002, *Mekanika Fluida* (Dr.Ir. Harinaldi & Ir. Budiarmo, M.Eng, Penerjemah), Erlangga, Jakarta.
- Nakayama, Y and R.F. Boucher., 1998, *Introduction to Fluid Mechanics*, Butterworth Heinemann Inc, Oxford.
- Olson R.M. and Wright S.J., 1993, *Dasar-dasar Mekanika Fluida Teknik* (Alex Tri Kantjono, Penerjemah), PT. Gramedia Pustaka, Jakarta.
- Onorato M, Costeli AF and Garonne A., 1984, Drag Measurement through wake analysis, SAE, SP-569., *International Congress and Exposition*, Detroit.
- Raffel M., Willert C., Wereley S. and Kompenhans J., 2007, *Particle Image Velocimetry A Practical Guide*, Second Edition, Springer, New York.
- Roumeas M., Gillieron P., and Kourta A., 2008, Separated Flow around the Rear Window of a Simplified Car Geometry, *Journal of Fluids Engineering*, 130.
- Roumeas M., Gillieron P., and Kourta A., 2009, Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry, *Computers & Fluids*, 38, pp. 60–70
- Roumeas M., Gillieron P., and Kourta A., 2009, Drag Reduction by Flow Separation Control on a Car after Body, *International Journal for Numerical Method in Fluids*, 60, pp. 1222-1240
- Tennekes, H. and Lumley J.L., 1972, *A First Course In Turbulence*, Massachusetts, MIT Press
- Uruba V., and Hladík O., 2009, On the Ahmed Body Wake, *Colloquium Fluid Dynamics*, Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., Prague.
- User’s Guide Manual of Fluent 6.3, September 2006
- Wassen E., Eichinger S., and Thiele F., 2010, Simulation of Active Drag Reduction for a Square-Back Vehicle, R. King (Ed.): *Active Flow Control II*, NNFM 108, pp. 241–255.

LAMPIRAN A

Publikasi Ilmiah

A. Jurnal Internasional

1. Harinaldi, Budiarmo, **Rustan Tarakka**, Sabar P. Simanungkalit, 2011, *Computational Analysis of Active Control to Reduce Aerodynamics Drag on a Van Model*, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS, Juni, Volume 11 Issue 03, pp. 24-30.
2. Harinaldi, Budiarmo, Warjito, Engkos A Kosasih, **Rustan Tarakka**, Sabar P. Simanungkalit, 2012, *Active Technique by Suction to Control the Flow Structure over a Van Model*, Journal of Engineering and Applied Sciences, February, Volume 7, Number 2, pp. 215-222.
3. Harinaldi, Budiarmo, **Rustan Tarakka**, Sabar P. Simanungkalit, 2012, *Effect of Active Control by Blowing To Aerodynamic Drag of Bluff Body Van Model*, International Journal of Fluid Mechanics Research, Begell House (dalam proses review).

B. Seminar Internasional

1. Harinaldi, Budiarmo, Engkos A Kosasih, Warjito, **Rustan Tarakka**, 2010, *Active Control for Separation in Turbulent Flow Formed in Bluff Body Geometry*, The International Conference, 3rd International Meeting of Advances In Thermofluids, Singapore, November 30.
2. Harinaldi, Budiarmo, Warjito, Engkos A Kosasih, **Rustan Tarakka**, Sabar P. Simanungkalit, 2011, *Active Technique by Suction to Control the Flow Structure over a Van Model*, Joint Poster Session for Ph.D Student in Invitation Program for East Asian Young Researchers, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, October 6.

C. Jurnal Nasional

1. Harinaldi, Budiarmo, Engkos A Kosasih, Warjito, **Rustan Tarakka**, 2011, *Analisis Pengaruh Penggunaan Blowing terhadap Medan Aliran dari Reversed Ahmed Body*, Jurnal Teknik Mesin Indonesia, Oktober, Volume 6, Nomor 2, pp. 124-131.

2. Harinaldi, Budiarmo, Warjito, Engkos Achmad Kosasih, **Rustan Tarakka**, Sabar Pangihutan Simanungkalit, I Gusti Made Fredy Lay Teryanto, 2012, *Modification of Flow Structure over a Van Model by Suction Flow Control to Reduce Aerodynamics Drag*, Jurnal Makara Seri Teknologi, Terakreditasi No. 110/Dikti/Kep/2009, Depok, Volume 16, Nomor 1, April.pp. 15-21.

D. Seminar Nasional

1. Harinaldi, Budiarmo, **Rustan Tarakka**, 2010, *Kajian Komputasi Pengaruh Geometri Muka Terhadap Medan Aliran Hilir dari Reversed Ahmed Body*, Seminar Nasional Thermofluid, Yogyakarta, 05 Agustus.
2. Harinaldi, Budiarmo, Engkos A Kosasih, Warjito, **Rustan Tarakka**, 2010, *Analisis Pengaruh Penggunaan Blowing terhadap Medan Aliran dari Reversed Ahmed Body*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9, Palembang, 13-15 Oktober.
3. Harinaldi, Budiarmo, **Rustan Tarakka**, Sabar P. Simanungkalit, 2011, *Pengaruh Model Turbulensi pada Analisis Komputasi Kontrol Aktif Aliran terhadap Drag Aerodinamika Reversed Ahmed Body*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-10, Malang, 2-3 November.
4. Harinaldi, Budiarmo, **Rustan Tarakka**, Sabar P. Simanungkalit, 2012, *Analisis Pengaruh Kontrol Aktif Aliran Blowing terhadap Pengurangan Drag Aerodinamika Van Model*, Seminar Nasional Teknologi Industri (SNTI) 2012, Jakarta, 28 Juni.