



TESIS - TM 142501

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK ALIRAN  
MELINTASI TIGA BUAH SILINDER SIRKULAR  
YANG TERSUSUN SECARA *EQUILATERAL*  
*TRIANGULAR* DENGAN PENAMBAHAN INLET  
DISTURBANCE BODY**

“Studi kasus Rasio jarak antar silinder  $S/D$  1.5, 2 dan 2.5 pada sudut pengganggu ( $\theta$ )  $30^0$ ”

INTAN HARDIATAMA  
NRP. 2113202001

Dosen Pembimbing  
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



TESIS - TM 142501

**EKSPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF  
FLOW ACROSS THREE CIRCULAR CYLINDER  
ARRANGED IN EQUILATERAL TRIANGULAR  
WITH ADDITION OF INLET DISTURBANCE  
BODY**

“Case study of the cylinder’s distance ratio  $S/D$  1,5; 2 and 2,5 at disturbance angle ( $\theta$ )  $30^0$ ”

INTAN HARDIATAMA  
NRP. 2113202001

Academic Advisor  
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

MASTER PROGRAM  
CONVERSION OF ENERGY ENGINEERING  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
Intan Hardiatama  
Nrp. 2113202001

Tanggal Ujian: 26 Juni 2015  
Periode Wisuda: September 2015

Disetujui oleh:

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

NIP. 1971 0405 1997021001

( Pembimbing )

2. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D.

NIP. 1964 1228 1990 031002

( Penguji )

3. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA.

NIP. 1960 0129 1987 011001

( Penguji )

4. Vivien Supandhani D., ST., M. Eng., Ph.D.

NIP. 1981 0529 2003 122001

( Penguji )

Direktur Program Pascasarjana,



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT

NIP. 1964 0405 1990 021001

# STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK ALIRAN MELINTASI TIGA BUAH SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN SECARA *EQUILATERAL TRIANGULAR* DENGAN PENAMBAHAN *INLET DISTURBANCE BODY*

Nama Mahasiswa : Intan Hardiatama  
NRP : 2113202001  
Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

## ABSTRAK

Aliran eksternal melintasi *bluff body* mengalami perkembangan pesat setelah ditemukan konsep *boundary layer* oleh Ludwig Prandtl (1904), seiring dengan pesatnya perkembangan aplikasi teknik dari aliran melintasi *bluff body* ini seperti aplikasi pada *heat exchanger*, bangunan penyangga jalan tol dan bangunan lepas pantai. Penelitian ini terfokus pada bilangan *Reynolds* tinggi sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik yang ada. Penelitian ini membahas tentang pengendalian pasif pada *bluff body* berupa silinder sirkular dengan metode penambahan bodi pengganggu pada masing – masing bagian *upstream* dari tiga buah silinder sirkular utama yang tersusun secara *equilateral triangular* dan variasi jarak S/D dari susunan ketiga buah silinder tersebut.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dan numerik. Tujuan dari penelitian ini secara eksperimen adalah mengetahui efektifitas teknik pengontrolan pasif lapis batas dari fluida, pengaruh *blockage ratio* terhadap kecepatan rata – rata pada *Re* konstan, menganalisis pola aliran pada permukaan silinder melalui koefisien *pressure drag* dan koefisien *pressure*. Sedangkan tujuan penelitian secara numerik untuk mengetahui efek *blockage* melalui visualisasi aliran yang terbentuk, sehingga dapat juga diketahui karakteristik *wake* yang terbentuk pada ketiga buah silinder yang tersusun secara *equilateral triangular* dengan penambahan dua buah pengganggu berbentuk silinder sirkular pada bagian *upstream* masing – masing silinder utama.

Penelitian secara eksperimen diawali dengan kalibrasi alat ukur dilanjutkan pengambilan data dengan mengukur tekanan yang terjadi sepanjang kontur silinder yang dipasang *pressure tap* dengan memutar silinder dari  $0^{\circ}$  –  $180^{\circ}$  pada interval  $5^{\circ}$ , kemudian mengukur profil kecepatan aliran dimulai dari dinding atas saluran uji sampai dinding bawah dengan interval 5 mm. Penelitian secara numerik diawali dengan tahap *pre-processing* yang meliputi pembuatan domain, *mesh* dan menentukan kondisi batas menggunakan CFD komersial Gambit 2.4.6, dilanjutkan tahap *processing* diawali dengan memasukkan parameter yang diperlukan untuk proses pengambilan data kemudian di *running* menggunakan CFD komersial Fluent 6.3.26. Tahap akhir adalah tahap *post-processing* yang merupakan tahap pengolahan data – data hasil *running* baik dalam bentuk visualisasi kontur maupun data kuantitatif yang kemudian diolah dalam bentuk grafik. Melalui penambahan dua buah pengganggu pada masing – masing bagian *upstream* dari *bluff body* utama dan variasi jarak S/D terhadap ketiga buah silinder yang tersusun secara *equilateral triangular* diharapkan dapat mempengaruhi

besarnya reduksi terhadap gaya *drag* yang terbentuk sehingga dapat meningkatkan *pressure drop*.

Dari hasil pengambilan data baik secara numerik maupun eksperimen menunjukkan adanya penurunan koefisien drag karena adanya penambahan silinder pengganggu (*inlet disturbance body*) pada bagian *upstream* masing – masing silinder dari kelompok silinder yang tersusun secara *equilateral triangular*. Koefisien drag terendah terjadi pada jarak *stagger*  $S/D = 2,5$  yang masih termasuk ke dalam kelompok *medium gap spacing* dimana pengaruh antar silinder masih sangat kuat. Hal ini juga dijelaskan pada penelitian Gu dan Sun (2000). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dengan melakukan pengendalian pasif melalui penambahan silinder pengganggu efektif dalam upaya mereduksi gaya drag.

**Kata kunci** : *bluff body*, *pressure tap*, silinder pengganggu, tiga *body* dikonfigurasi *equilateral triangular*, profil kecepatan.

# **EKSPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF FLOW ACROSS THREE CIRCULAR CYLINDER ARRANGED IN EQUILATERAL TRIANGULAR WITH ADDITION OF INLET DISTURBANCE BODY**

Name : Intan Hardiatama  
NRP : 2113202001  
Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

## **ABSTRACT**

External flow across bluff body has developed rapidly after the discovery of the concept of boundary layer by Ludwig Prandtl (1904), along with the rapid development of engineering applications of flow across bluff body, such as the heat exchanger applications, highways building and offshore buildings. This study focused on high Reynolds number according to the needs of existing engineering applications. This study discusses the passive control of the bluff body in the form of a circular cylinder with a method of adding inlet disturbance body on each upstream section of the three main circular cylinders arranged in equilateral triangular and variations within the  $S / D$  of the third arrangement of the cylinders.

This research was carried out experimentally and numerically. The purpose of this study was to determine the effectiveness of the experimental techniques of passive control of the fluid boundary layer, the effect of blockage ratio to average speed at constant  $Re$ , analyze the flow pattern on the surface of the cylinder through the pressure drag coefficient and the pressure coefficient. While the purpose of the study numerically to determine the effect of blockage through flow visualization formed, so it can also be known characteristics of the wake that formed on three cylinders are arranged in equilateral triangular with the addition of two circular cylinder inlet disturbance body on the upstream part of each main cylinder.

Experimental research begins with the calibration of measuring instruments, then collect data by measuring the pressure that occurs along the contour of the cylinder fitted with a rotating cylinder pressure tap of  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$  at intervals of  $5^{\circ}$ , then measure the flow velocity profile starting from the top wall of the test section until the bottom wall at intervals of 5 mm. Numerically study begins with the pre-processing stage that includes domain manufacture, manufacture of mesh and determine the boundary conditions using commercial CFD Gambit 2.4.6, then continue processing stage begins by entering parameters - parameters required for the retrieval of data later in the running using commercial CFD Fluent 3.6.26. The final stage is the post-processing stage which is the stage of data processing from the results of running either in the form of contour visualization and quantitative data are then processed in the form of graphs. Through the addition of two circular cylinder inlet disturbance body on each

upstream section of the main body bluff and variations within the  $S / D$  of the three cylinders are arranged in equilateral triangular expected to affect the magnitude of the reduction of the drag force is formed so as to increase the pressure drop.

From the captured data both numerically and experimentally showed a decrease in drag coefficient due to the addition of inlet disturbance body on the upstream of each cylinder in a group of cylinder arranged in equilateral triangular. Lowest drag coefficient occurs at a distance stagger  $S / D = 2.5$  which still belongs to the group of medium gap between the cylinder spacing where the influence is still very strong. It is also clear from the research Gu and Sun (2000). It can be concluded that the passive control through the addition of an effective inlet disturbance body in an attempt to reduce the drag force.

**Keywords** : bluff body, inlet disturbance body, pressure tap, equilateral triangular configuration, velocity profile.

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rasa syukur yang tiada terkira penulis haturkan hanya kepada Allah SWT atas ridhoNya tesis ini dapat terselesaikan dengan lancar. Pada kesempatan kali ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak – pihak yang telah membantu dan mendukung sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Ibu Sri Utami, mama yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberi semangat kepada penulis dalam keadaan apapun. Bapak Suhardi, papa yang selalu memberikan semangat, wejangan dan dukungan sehingga penulis bisa bersemangat dalam menyelesaikan tesis ini.
2. Destahandra Robby selaku adik penulis yang bisa memberikan semangat dan motivasi kepada penulis untuk menjadi orang sukses dan dapat menjadi panutan yang baik untuk adiknya.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo., ST., MT. selaku dosen pembimbing tesis yang telah sabar membimbing penulis, membagikan ilmu beliau serta memberikan saran dan motivasi kepada penulis sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.
4. Bapak Dr. Bambang Arip Dwiyanoro, ST., M.Eng. selaku dosen wali dari penulis yang telah memberikan wejangan, motivasi dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA., Bapak Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D., Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT., serta Ibu Vivien Supandhani D., ST., M. Eng., Ph.D. selaku tim dosen penguji yang telah banyak memberikan saran demi perbaikan tesis ini.
6. Keluarga tetibi, abida, ayu, idham dan septian yang selalu mendukung dan meyakinkan penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan kuliah dan tesis dengan baik.
7. Sahabat penulis, Muhammad Trifiananto yang selalu sabar mendukung dan memberi semangat kepada penulis dalam proses penyelesaian tesis ini.
8. Teman – teman Rekayasa Konversi Energi Teknik Mesin ITS 2013, Novi, Indah, Atik, Dini, Nisa, Eky, Wulan, Dio, Nanang, Masykur, Dory, Arip, Mas Suliono, Pak Setyo, Pak Dirman terima kasih atas waktu kebersamaan, perjuangan bersama selama dua tahun terakhir ini dan alhamdulillah kita bisa lulus bersama.
9. Teman – teman Laboratorium Mekanika Fluida yang telah banyak membantu dalam persiapan tesis ini.
10. Teman – teman seperjuangan seven engine Unej atas dukungan selama ini.
11. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademika jurusan Teknik Mesin ITS.

12. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademika jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.
13. Keluarga cemara keputih tegal timur 2 no. 15 atas waktu kebersamaan selama dua tahun ini.
14. Serta semua pihak yang turut membantu sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tesis ini, oleh karena itu saran dari semua pihak sangat penulis harapkan demi perbaikan penelitian – penelitian selanjutnya. Penulis berharap semoga Tesis ini dapat bermanfaat dalam perkembangan ilmu di dunia Teknik Mesin.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
2.1 Pengaruh <i>Disturbance Body</i> Terhadap Penurunan Gaya <i>Drag</i> Pada Silinder Sirkular Tunggal .....	7
2.2 Karakteristik Aliran Melalui Silinder Sirkular Dengan Susunan <i>Side by Side</i> .....	11
2.3 Karakteristik Aliran Melalui Silinder Sirkular Dengan Susunan <i>Staggered</i> .....	16
2.4 Karakteristik Aliran Melalui Tiga Buah Silinder Sirkular Dengan Susunan Equilateral Triangular.....	20
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b> .....	<b>29</b>
3.1 Desain Eksperimen.....	29
3.2 Perlengkapan Eksperimen .....	30
3.2.1 <i>Subsonic Open Circuit Wind Tunnel</i> .....	30
3.2.2 Alat Ukur.....	31
3.2.3 Benda Uji .....	32
3.3 Prosedur Eksperimen .....	33

3.3.1 Kalibrasi Alat Ukur .....	33
3.3.2 Pengambilan Data.....	35
3.4 Analisa Grup Tak Berdimensi Untuk Koefisien Tekanan	
Pada Silinder.....	36
3.5 Pengolahan Data Hasil Eksperimen .....	38
3.6 Permodelan dan Simulasi Numerik .....	40
3.7 <i>Pre Processing</i> .....	40
3.7.1 Domain Simulasi .....	40
3.7.2 <i>Meshing</i> dan Kondisi Batas .....	41
3.7.3 <i>Grid Independency Test</i> .....	42
3.8 <i>Processing</i> .....	43
3.8.1 Mengimpor dan Mengecek <i>mesh</i> .....	43
3.8.2 Konversi Satuan.....	44
3.8.3 Mendefinisikan Model.....	44
3.8.4 <i>Materials</i> .....	44
3.8.5 <i>Operating Conditions</i> .....	44
3.8.6 <i>Boundary Conditions</i> .....	44
3.8.7 <i>Solve &gt;&gt; controls &gt;&gt; solutions</i> .....	44
3.8.8 <i>Solve &gt;&gt; Initialize&gt;&gt;initialize</i> .....	45
3.8.9 <i>Solve &gt;&gt; Monitor &gt;&gt; Residual</i> .....	45
3.8.10 <i>Solve &gt;&gt; Iterate</i> .....	45
3.9 <i>Post processing</i> .....	45
3.10 Skema Penelitian .....	54
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>55</b>
4.1 Analisa Karakteristik Aliran Melalui Tiga Buah Silinder	
Berpengganggu Tersusun Equilateral Triangular Pada Variasi	
Jarak Stagger ( $S/D = 1,5$ ) .....	56
4.1.1 Grafik Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) dan Velocity Pathlines pada	
$S/D = 1,5$ .....	56
4.1.2 Profil Kecepatan pada $S/D = 1,5$ .....	67
4.2 Variasi Jarak Stagger ( $S/D = 2$ ).....	69
4.2.1 Grafik Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) dan Velocity Pathlines	

pada $S/D = 2$ .....	69
4.2.2 Profil Kecepatan pada $S/D = 2$ .....	78
4.3 Variasi Jarak Staggar ( $S/D = 2,5$ ) .....	79
4.3.1 Grafik Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) dan Velocity Pathlines pada $S/D = 2,5$ .....	79
4.3.2 Profil Kecepatan pada $S/D = 2,5$ .....	87
4.4 Analisa Koefisien Drag Pressure .....	88
4.4.1 Nilai Koefisien Drag Pressure pada Tiga Buah Silinder Berpengganggu Tersusun Secara Equilateral Triangular pada $S/D = 1.5$ .....	88
4.4.2 Nilai Koefisien Drag Pressure pada Tiga Buah Silinder Berpengganggu Tersusun Secara Equilateral Triangular pada $S/D = 2$ .....	90
4.4.3 Nilai Koefisien Drag Pressure pada Tiga Buah Silinder Berpengganggu Tersusun Secara Equilateral Triangular pada $S/D = 2.5$ .....	90
4.5 Analisa Nilai Angka Strouhal .....	91
4.6 Perbandingan dengan Tiga Buah Silinder Tanpa Pengganggu Tersusun secara Equilateral Triangular.....	92
4.6.1 Perbandingan Dengan Hasil Penelitian Gu dan Sun (2000)	92
4.6.2 Perbandingan Dengan Hasil Penelitian Bao, et al (2010) ....	93
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>97</b>
5.1 Kesimpulan .....	97
5.2 Saran.....	98
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>99</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>101</b>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Inverter .....	32
Table 3.2. Parameter yang berpengaruh.....	36
Tabel 3.3. Grid independensi tiga buah silinder sirkular tersusun <i>equilateral triangular</i> D = 25 mm pada $Re = 2,2 \times 10^4$ .....	43
Tabel 3.4. <i>Number of time step</i> pada $S/D = 2$ .....	48
Tabel 3.5 Nilai <i>Strouhal number</i> pada silinder 2 dan 3 .....	53
Tabel 3.6 Nilai <i>Strouhal number</i> dari <i>bistable flow</i> .....	53
Tabel 4.1 Nilai Koefisien Drag Pressure Pada Jarak Stagger ( $S/D = 1,5$ ) .....	89
Tabel 4.2 Nilai Koefisien Drag Pressure Pada Jarak Stagger ( $S/D = 2$ ) .....	90
Tabel 4.3 Nilai Koefisien Drag Pressure Pada Jarak Stagger ( $S/D = 2,5$ ) .....	90
Tabel 4.4 Perbandingan Nilai Angka Strouhal Antar Silinder Dengan Penambahan Inlet Disturbance Body pada Variasi Jarak Stagger tertentu ( $S/D = 1,5; 2$ dan $2,5$ ) .....	91
Tabel 4.5 Nilai Koefisien Drag Penelitian Gu dan Sun (2000).....	92
Tabel 4.6 Nilai Koefisien Drag Penelitian Ini.....	92
Tabel 4.7 Nilai Koefisien Drag Penelitian Bao, et al (2010) .....	94
Tabel 4.8 Nilai Strouhal Number Dengan Penambahan Inlet Disturbance Body Pada $Re 2,2 \times 10^4$ .....	94
Tabel 4.9 Nilai Strouhal Number Penelitian Bao, et al (2010) .....	95

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Pengaturan Letak <i>Disturbance Body</i> Terhadap Silinder Sirkular Utama (Alam, dkk. 2003).....	7
Gambar 2.2. Grafik Distribusi (a) <i>Time - averaged Pressure</i> dan (b) <i>Fluctuating Pressure</i> Pada Silinder Polos dengan ●, $\alpha = 30^0$ ; $\Delta$ , $\alpha = 40^0$ ; ▼, $\alpha = 60^0$ (Alam, dkk. 2003) .....	8
Gambar 2.3. Grafik Perubahan <i>Strouhal Number</i> Terhadap Perubahan Posisi Sudut <i>Disturbance Body</i> dengan $\Delta$ , $d/D = 0.08$ ( $d = 4$ mm); ●, $d/D = 0.10$ ( $d = 5$ mm); □, $d/D = 0.12$ ( $d = 6$ mm) (Alam, dkk. 2003) .....	8
Gambar 2.4. Grafik distribusi koefisien tekanan silinder sirkular tunggal dan silinder sirkular dengan variasi bodi pengganggu ( $d/D = 0,16$ ) (Wijanarko dan Widodo, 2013) .....	9
Gambar 2.5. Grafik <i>Strouhal number</i> silinder sirkular tunggal dan silinder sirkular dengan variasi bodi pengganggu ( $d/D = 0,16$ ) (Wijanarko dan Widodo, 2013) .....	10
Gambar 2.6. <i>Pathline</i> yang menunjukkan posisi <i>reattachment</i> dan separasi aliran (a) Pengganggu $30^0$ , (b) pengganggu $60^0$ .....	10
Gambar 2.7. Visualisasi aliran silinder susunan <i>side by side</i> pada <i>steady cross flow</i> dengan $T/D = 1.0$ : (a) <i>vortex sheeding</i> alternatif, $Re = 1320$ , (b) <i>irregular vortex shedding</i> , $Re = 820$ (Sumner, dkk. 1998).....	12
Gambar 2.8. Visualisasi aliran dua buah silinder yang tersusun secara <i>side by side</i> pada <i>setady cross flow</i> , dengan model aliran <i>bias</i> , pada $Re = 1000 - 3000$ : (a) $T/D = 1.5$ ; (b) $T/D = 2.0$ (Sumner, dkk. 1998) .....	13
Gambar 2.9. Sudut defleksi aliran pada gap ( $\delta$ ), ● = visualisasi aliran, ▲ = PIV, ○ = penelitian Kim dan Durbin (1988) (Sumner, dkk. 1998).....	13
Gambar 2.10. Visualisasi aliran dua buah silinder sirkular dalam <i>steady cross flow</i> pada $T/D$ besar (Sumner, dkk. 1998).....	14
Gambar 2.11 visualisasi aliran dua silinder tersusun <i>side by side</i> (Akilli, dkk. 2004).....	15
Gambar 2.12 Susunan silinder dan definisi dari simbol (Alam dan Meyer, 2013) .....	16
Gambar 2.13 Peta kontur dari (a) koefisien <i>lift</i> tengah terhadap waktu ( $C_L$ ) dan (b) koefisien <i>lift</i> fluktuatif ( $C_{Lf}$ ) dari silinder B (Alam dan Meyer, 2013) .....	17
Gambar 2.14 Daerah interaksi $T/D - \alpha$ , shear layer (SL), boundary layer (BL) (Alam dan Meyer, 2013) .....	19
Gambar 2.15 Konfigurasi tiga buah silinder dalam grup dengan konvensi tanda dari koefisien gaya fluida (Gu dan Sun, 2000).....	20
Gambar 2.16 Distribusi tekanan silinder tunggal dan tiga silinder dengan susunan <i>equilateral triangular</i> pada $N/d = 1.7$ dan $Re = 5.5 \times 10^4$ (Gu dan Sun, 2000) .....	21

Gambar 2.17 Ilustrasi skema model aliran pada kasus <i>small spacing ratio</i> (Gu dan Sun, 2000).....	21
Gambar 2.18 Gaya <i>drag</i> dan <i>lift</i> dari ketiga silinder dengan susunan <i>equilateral triangular</i> pada <i>spacing ratio</i> berbeda (Gu dan Sun, 2000).....	22
Gambar 2.19 Bentuk <i>meshing</i> komputasi disekitar silinder (Bao, dkk 2010) .....	23
Gambar 2.20 Kontur <i>vorticity</i> sesaat pada $s = 0,5$ (a) $\alpha = 0^0$ ; (b) $\alpha = 30^0$ dan (c) $\alpha = 60^0$ ( $Re = 100$ ) (Bao, dkk 2010) .....	24
Gambar 2.21 Posisi silinder pada beberapa sudut <i>incident angle</i> (Bao, dkk 2010).....	25
Gambar 2.22 Kontur <i>vorticity</i> sesaat pada $\alpha = 60^0$ , $Re = 100$ : (a) $s = 2$ ; (b) $s = 1,5$ ; (c) $s = 3$ ; (d) $s = 4$ (Bao, dkk 2010) .....	25
Gambar 2.23 Variasi koefisien gaya terhadap <i>gap spacing</i> pada $\alpha = 60^0$ : (a) <i>mean drag coefficient</i> ; (b) <i>mean lift coefficient</i> ; (c) nilai rms fluktuasi koefisien drag; (d) nilai rms fluktuasi koefisien <i>lift</i> (Bao, dkk 2010).....	26
Gambar 2.24 Variasi angka Strouhal terhadap <i>gap spacing</i> pada $\alpha = 60^0$ (Bao, dkk 2010).....	27
Gambar 3.1. Skema susunan silinder sirkular <i>equilateral triangular</i> .....	29
Gambar 3.2 Grafik validasi hubungan pengukuran manometer dengan arus dari <i>pressure transducer</i> .....	34
Gambar 3.3 Domain simulasi pada gambit untuk simulasi numerik beserta definisi batas ( <i>boundary</i> ).....	41
Gambar 3.4 Bentuk <i>Meshing quadrilateral map</i> .....	42
Gambar 3.5 <i>Lift Convergence History</i> .....	47
Gambar 3.6 Grafik Cl posisi pengambilan data average dalam satu periode.....	50
Gambar 3.7 Grafik fluktuasi koefisien lift beserta visualisasi aliran yang terbentuk.....	52
Gambar 3.8 Visualisasi bistable flow (a) narrow wake pada silinder 2, (b) narrow wake pada silinder 3 .....	52
Gambar 3.9 <i>Flow Chart</i> Penelitian .....	54
Gambar 4.1 Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 1 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 1,5$ .....	56
Gambar 4.2. Visualisasi (a) velocity pathlines silinder 1 pada $S/D = 1,5$ ; (b) <i>bubble separation</i> di dekat gap .....	57
Gambar 4.3. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 2 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 1,5$ .....	61
Gambar 4.4. Velocity pathlines silinder 2 pada $S/D = 1,5$ .....	62
Gambar 4.5. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 3 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 1,5$ .....	64
Gambar 4.6. Velocity pathlines silinder 3 pada $S/D = 1,5$ .....	65
Gambar 4.7. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan tiga buah Silinder Sirkular tersusun Equilateral Triangular dengan penambahan IDB secara (a) eksperimen, (b) numerik pada $S/D = 1,5$ .....	66
Gambar 4.8. <i>Velocity pathlines</i> pada $S/D = 1,5$ .....	67
Gambar 4.9. Grafik profil kecepatan tiga buah silinder sirkular tersusun equilateral triangular dengan penambahan IDB secara eksperimen dan numerik pada $S/D = 1,5$ .....	68
Gambar 4.10. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 1	

	(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 2$ .....	70
Gambar 4.11.	Velocity pathlines silinder 1 pada $S/D = 2$ .....	71
Gambar 4.12.	Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 2 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 2$ .....	72
Gambar 4.13.	Velocity pathlines silinder 2 pada $S/D = 2$ .....	73
Gambar 4.14.	Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 3 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 2$ .....	75
Gambar 4.15.	Velocity pathlines silinder 3 pada $S/D = 2$ .....	76
Gambar 4.16.	Grafik Distribusi Koefisien Tekanan tiga buah Silinder Sirkular tersusun Equilateral Triangular dengan penambahan IDB secara (a) eksperimen, (b) numerik pada $S/D = 2$ .....	77
Gambar 4.17.	<i>Velocity pathlines</i> ketiga silinder pada $S/D = 2$ .....	78
Gambar 4.18.	Grafik profil kecepatan tiga buah silinder sirkular tersusun equilateral triangular dengan penambahan IDB secara eksperimen dan numerik pada $S/D = 2$ .....	79
Gambar 4.19.	Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 1 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 2,5$ .....	80
Gambar 4.20.	<i>Velocity pathlines</i> silinder 1 pada $S/D = 2,5$ .....	81
Gambar 4.21.	Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 2 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 2,5$ .....	82
Gambar 4.22.	Velocity pathlines silinder 2 pada $S/D = 2,5$ .....	83
Gambar 4.23.	Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut $\theta$ pada silinder 3 (a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada $S/D = 2,5$ .....	84
Gambar 4.24.	<i>Velocity pathlines</i> silinder 3 pada $S/D = 2,5$ .....	85
Gambar 4.25.	Grafik Distribusi Koefisien Tekanan tiga buah Silinder Sirkular tersusun Equilateral Triangular dengan penambahan IDB secara (a) eksperimen, (b) numerik pada $S/D = 2,5$ .....	86
Gambar 4.26.	<i>Velocity pathlines</i> tiga buah silinder pada $S/D = 2,5$ .....	87
Gambar 4.27.	Grafik profil kecepatan tiga buah silinder sirkular tersusun equilateral triangular dengan penambahan IDB secara eksperimen dan numerik pada $S/D = 2,5$ .....	87
Gambar 4.28.	Grafik koefisien drag ( $C_d$ ) terhadap $S/D$ data numerik .....	89
Gambar 4.29.	Grafik koefisien drag ( $C_d$ ) terhadap $S/D$ data eksperimen .....	89
Gambar 4.30.	Nilai strouhal number silinder berkelompok susunan equilateral triangular pada variasi jarak stagger tertentu.....	91

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Mekanika fluida adalah disiplin ilmu bagian dari mekanika terapan yang mengkaji perilaku zat – zat cair dan gas dalam keadaan diam atau bergerak. Aliran eksternal merupakan salah satu komponen yang dipelajari dalam mekanika fluida. Aliran incompressible melintasi silinder sirkular yang merupakan aliran eksternal telah menjadi perhatian para peneliti dalam bidang fluida beberapa dekade ini. Aliran fluida melintasi *bluff body* baik dalam bentuk silinder sirkular atau elips mengalami perkembangan setelah ditemukan konsep *boundary layer* oleh Ludwig Prandtl pada tahun 1904 yang didalamnya menjelaskan bahwa aliran di dekat sebuah batas padat akan terbentuk sebuah lapisan fluida yang tipis (lapisan batas) dimana gesekan berperan penting, namun di luar lapisan ini fluida berperilaku menyerupai fluida tanpa gesekan. Contoh aplikasi *engineering* dari aliran eksternal antara lain seperti pada aplikasi *heat exchanger*, aliran di seputar *body* mobil, aliran di seputar *airfoil*, struktur penyangga bangunan lepas pantai, penyangga jalan tol dan lain – lain.

Cakupan aliran eksternal meliputi aliran - aliran dengan bilangan Reynolds rendah maupun tinggi. Pada penelitian ini difokuskan pada bilangan reynolds tinggi seperti disebutkan dalam contoh aplikasi *engineering* di atas. Aliran fluida *viscous* di sekitar *bluff body* mengalami beberapa fase sebelum terjadi perubahan tipe aliran, dari aliran laminar menjadi turbulen. Fase – fase tersebut antara lain: fase stagnasi, fase terbentuknya *boundary layer* akibat tegangan geser di permukaan *bluff body*, fase separasi, dan fase terbentuknya *wake* di belakang *bluff body* dimana terbentuk *vortex* di daerah tersebut yang menandakan aliran sudah turbulen penuh. Separasi aliran erat kaitannya dengan terjadinya gaya *drag* dan gaya *lift*, selain itu separasi aliranlah yang menyebabkan terbentuknya *wake* di belakang *bluff body*. Parameter – parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran dari *wake* antara lain: sudut serang, rasio sumbu, dan profil kecepatan.

Untuk teknik pengontrolan aliran fluida bisa menggunakan metode pengontrolan aktif dan metode pengontrolan pasif. Metode pengontrolan aktif adalah metode dengan menggunakan suplai energi dari luar seperti hembusan dari nozzle atau jet, sedangkan metode pengontrolan pasif bisa berupa penambahan kekasaran permukaan pada *bluff body* pada bagian *upstream* atau penambahan *inlet disturbance body*.

Agar gaya hambat yang mengenai aliran sebelum melewati *bluff body* kecil, maka diberikan *inlet disturbance body* pada daerah *upstream* dan variasi rasio jarak sumbu terhadap diameter silinder (S/D), sehingga diharapkan titik separasi pada *bluff body* bisa tertunda. Penundaan titik separasi ini disebabkan oleh karena terbentuknya aliran turbulen lebih awal saat melewati *bluff body*, dimana aliran turbulen lebih mampu menghadapi momentum gaya dari *bluff body* sehingga terbentuknya separasi tertunda lebih ke belakang dari *bluff body*. Penundaan titik separasi lebih ke belakang ini menghasilkan daerah *wake* yang lebih kecil.

Silinder sirkular yang digunakan sebagai *bluff body* dari penelitian ini merupakan salah satu contoh kontur dari berbagai macam *bluff body* yang ada. Silinder sirkular adalah *bluff body* yang memiliki kelengkungan kontur, kelengkungan kontur inilah yang menyebabkan menguatnya *adverse pressure gradien* (APG) sehingga APG inilah yang mempengaruhi terbentuknya *bubble separation* ketika fluida melintasi kontur ini.

**Alam, dkk (2003)** melakukan penelitian tentang pengaruh penggunaan dua *inlet disturbance body* berupa silinder sirkular terhadap silinder sirkular yang disusun secara tunggal, *side by side* dan tandem. Penambahan dua bodi pengganggu tersebut menggunakan sudut  $\alpha$  pada *upstream*, sehingga melalui penambahan bodi pengganggu tersebut terjadi fenomena *reattachment* pada beberapa variasi sudut. Fenomena *reattachment* menyebabkan separasi jauh lebih tertunda.

**Gu dan Sun (2000)** melakukan penelitian tentang klasifikasi model aliran tiga buah silinder sirkular dengan model susunan *equilateral triangular*

dengan variasi sudut putar dari gabungan ketiga silinder dan variasi  $N/d$  tertentu. Dari penelitian ini diketahui bahwa sudut putar dari gabungan ketiga silinder utama tersebut sangat berpengaruh terhadap distribusi tekanan pada masing – masing silinder, *shear layer* dan *wake* merupakan hal yang mempengaruhi distribusi tekanan pada silinder *downstream*, sehingga dapat diketahui fitur yang kompleks pada silinder *downstream*. Efek dari rasio jarak dekat, transisi, *medium* sampai *large spacing ratio* dapat diidentifikasi serta adanya fenomena *reattachment* dari *shear layer* yang terjadi pada silinder *downstream*.

**Tatsuno, dkk (1997)** membahas tentang efek dari pengaruh diantara ketiga silinder yang disusun secara *equidistant* pada aliran yang *uniform*. Penelitian ini menyatakan bahwa pada *small spacing ratio*, pengaruh aliran diantara ketiga silinder sangat berpengaruh. Ketika dua dari ketiga silinder tersebut berada pada posisi *side by side* baik pada saat di posisi *upstream* ataupun *downstream*, model alirannya tidak simetris begitu juga dengan koefisien *lift* maupun koefisien *drag* dari kedua silinder pada posisi *side by side* tersebut yang tidak selalu sama satu sama lain pada *small spacing ratio*. Kecenderungan besarnya sudut serang terhadap aliran sangat berpengaruh terhadap koefisien *drag* dan *lift*, arah gaya pada masing – masing silinder dan model aliran disekitar silinder. Ketika rasio jarak antar silinder semakin besar, aliran yang melewati ketiga silinder tersebut tidak saling mempengaruhi.

**Widodo dan Hidayat (2014)** melakukan penelitian secara eksperimen yang serupa dengan konfigurasi dari penelitian Alam, dkk (2003) tentang silinder sirkular tunggal pada lorong sempit dengan penambahan dua buah bodi pengganggu berbentuk silinder sirkular yang ditempatkan di bagian *upstream* pada dua ukuran silinder yang berbeda sebagai silinder utama dan pada  $Re$  hidraulik divariasikan. Hasil yang ditunjukkan adalah terjadi fenomena *reattachment* pada beberapa variasi sudut karena adanya penambahan dua bodi pengganggu, sehingga separasi dapat tertunda.

## 1.2 Rumusan Masalah

Ada berbagai tipe *bluff body*, salah satu bentuk *bluff body* yang banyak digunakan dalam aplikasi teknik adalah silinder sirkular. Aliran yang melintas

disekitar *bluff body* berbentuk silinder sirkular akan membentuk *streamline* yang simetris terhadap bagian *upper* dan *lower* dari bodi silinder tersebut. Apabila ditambahkan dua buah *inlet disturbance body* (silinder sirkular) posisi *stagger* ( $\theta = 30^\circ$ ) di bagian *upstream* dari sebuah silinder sirkular diduga dapat mengurangi gaya drag yang terjadi pada silinder sirkular utama karena adanya pengaruh penempatan silinder pengganggu. Diduga dengan adanya penambahan silinder pengganggu dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran, yang menyebabkan transisi lapis batas aliran dari laminar ke turbulen terjadi lebih cepat, sehingga bisa melawan *wall shear stress* ( $\tau_w$ ) dan *adverse pressure gradient*. Hal ini menyebabkan lebar *wake* semakin kecil karena separasi lebih tertunda ke belakang sehingga gaya drag yang terjadi pada silinder sirkular utama mengalami pengurangan.

Silinder sirkular yang disusun secara berkelompok lebih banyak digunakan pada aplikasi teknik, terutama dalam susunan *equilateral triangular*. Pada penelitian terdahulu telah disebutkan bahwa silinder sirkular yang tersusun berkelompok (*equilateral triangular*) tanpa bodi pengganggu pada jarak *stagger* (S/D) tertentu sudah mampu mereduksi gaya drag yang terbentuk pada masing – masing silinder dalam kelompok tersebut. Hal ini yang mengawali ide dari penulis untuk melakukan penelitian tentang silinder berkelompok tersusun secara *equilateral triangular* dengan diberikan penambahan silinder sirkular pengganggu pada variasi jarak *stagger* (S/D) divariasikan. *Reduksi drag* diduga akan berbeda – beda apabila jarak *stagger* antara ketiga silinder berpengganggu dalam susunan *equilateral triangular* divariasikan. Selain itu reduksi drag pada masing – masing silinder dalam kelompok tersebut diduga akan lebih optimum jika dilakukan penambahan silinder pengganggu pada masing – masing *upstream* dari silinder utama yang tersusun secara berkelompok (*equilateral triangular*). Hal ini diduga disebabkan karena silinder satu dengan yang lain saling berpengaruh dalam upaya mereduksi gaya drag, selain itu juga ditambah dengan pengaruh penambahan silinder pengganggu pada bagian *upstream* masing – masing silindernya. Sehingga berdasarkan dugaan tersebut diharapkan ketika kelompok silinder susunan *equilateral triangular* ditambahkan silinder pengganggu pada masing –

masing *upstreamnya* dapat lebih optimum dalam mereduksi gaya drag pada masing – masing silinder utama bila dibandingkan kelompok silinder tanpa pengganggu.

Berdasar pemahaman tersebut, maka penelitian ini menggunakan batang silinder sirkular berjumlah enam buah sebagai bodi pengganggu. Untuk pemilihan jarak disesuaikan dengan penelitian yang dilakukan oleh ( **Alam dkk, 2003**), yaitu pada jarak (*gap*) 0.4 mm. Pemilihan posisi sudut *inlet disturbance body* terhadap silinder utama ( $\theta$ ) dipilih pada sudut  $30^0$  berdasarkan hasil penelitian (**Alam dkk,2003**), sedangkan dasar pemilihan variasi S/D 1.5, 2 dan 2.5 berdasarkan penelitian dari (**Gu dan Sun, 2000**) dan (**Bao dkk, 2010**) yaitu pada variasi S/D 1.5, variasi S/D 2 dan 2.5. Hal ini untuk mengetahui distribusi koefisien tekanan pada silinder utama serta pengaruh dari penambahan silinder pengganggu dan variasi jarak *stagger* (S/D) terhadap kemampuan reduksi gaya drag pada silinder utama, sehingga dapat diketahui pada variasi jarak *stagger* (S/D) berapa yang paling optimal dalam mereduksi gaya drag.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian, untuk mengetahui dan menganalisis efektivitas pengendalian secara pasif lapisan batas dengan menempatkan enam buah batang *inlet disturbance body* dengan kontur silinder sirkular dengan diameter sebesar 4 mm di daerah *upstream* dari masing - masing *bluff body* utama.

Selain itu, penelitian ini juga dapat digunakan untuk mengetahui serta menganalisis karakteristik *wake* yang terbentuk karena adanya transisi lapisan batas yang terjadi pada kontur *inlet disturbance body* yang ditempatkan di daerah *upstream* dari *bluff body* yang kemudian melewati *bluff body* utama yang disusun secara *equilateral triangular*.

Di samping poin - poin yang sudah disebutkan sebelumnya, pengaruh variasi dari rasio jarak (S/D) terhadap karakteristik aliran yang terbentuk dan percepatan transisi lapisan batas yang disebabkan karena separasi yang terjadi pada *inlet disturbance body* kembali menempel ( *reattach* ) pada *bluff body* utama dengan melalui pengambilan data *velocity profile* yang dilakukan pada *inlet disturbance body* maupun *bluff body* utama juga dianalisis.

Selain tujuan umum seperti yang telah disebutkan diatas, tujuan khusus penelitian antara lain:

➤ Eksperimen

1. Mengetahui dan menganalisis korelasi fisis karakter aliran terhadap penyusunan secara *equilateral triangular* antar *bluff body* dengan pemberian *inlet disturbance body* pada masing - masing *bluff body*.
2. Menganalisis pengaruh dari *blockage ratio* yang terjadi pada angka *Reynolds* konstan terhadap distribusi kecepatan rata – rata.
3. Pada permukaan silinder untuk mengetahui pola aliran dan menganalisa koefisien *pressure drag* ( $C_{DP}$ ) dan pada bagian *upstream* dan *downstream* pada silinder sirkular untuk menganalisa koefisien *pressure* ( $C_P$ ).

➤ Permodelan Numerik

1. Mengetahui dan menganalisis visualisasi aliran yang terjadi disekitar tiga buah silinder berpengganggu tersusun secara *equilateral triangular*.

#### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah agar tetap fokus pada tujuan yang telah ditetapkan. Batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut:

➤ Eksperimen

1. Perpindahan panas yang terjadi karena adanya gesekan antara aliran dengan benda uji dan dinding dari *wind tunnel* tidak dibahas.
2. Fluida udara yang mengalir ke dalam *open - circuit subsonic wind tunnel* dalam kondisi *steady flow*, *uniform*, serta bersifat *incompressible flow* pada sisi *inlet test section*.
3. Benda uji berupa tiga buah silinder sirkular dan enam buah batang pengganggu berbentuk *circular* yang disusun secara *equilateral triangular*.

➤ Permodelan Numerik

1. Permodelan numerik dilakukan menggunakan CFD komersial dengan *software* Fluent 6.3.26 dan Gambit 2.4.6.
2. Penelitian secara numerik di running menggunakan *unsteady solver*.

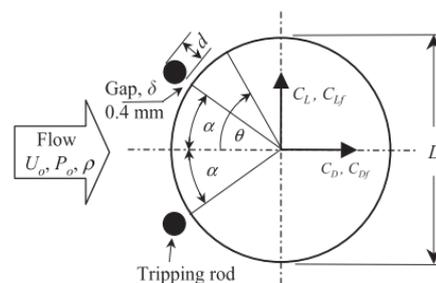
## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Ada beberapa referensi yang relevan dengan lingkup penelitian yang digunakan sebagai rujukan pustaka pada penelitian ini. Referensi disini diambil dari berbagai sumber antara lain buku teks, tesis, disertasi, jurnal dan informasi yang berkaitan dengan aliran melintasi silinder sirkular. Penelitian ini terfokus pada fenomena aliran melintasi tiga buah silinder sirkular susunan *equilateral triangular*, dengan penambahan *circular cylinder* pada daerah *upstream* sebagai upaya mereduksi gaya *drag* yang terjadi pada silinder utama. Beberapa penelitian yang bisa dijadikan referensi yang relevan dalam penelitian ini akan dijelaskan seperti di bawah ini :

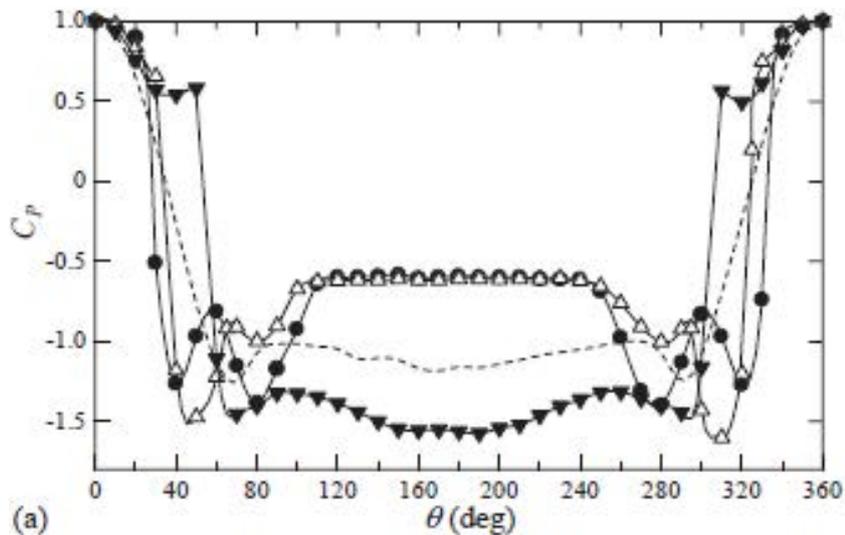
#### 2.1 Pengaruh *Disturbance Body* Terhadap Penurunan Gaya *Drag* Pada Silinder Sirkular Tunggal

Penelitian yang membahas tentang penurunan gaya *drag* melalui penambahan *disturbance body* telah dilakukan oleh Alam, dkk (2003). Penelitian ini membahas tentang reduksi *fluid forces* yang terjadi pada silinder sirkular tunggal dengan silinder sirkular sebagai *disturbance body*. Diameter *disturbance body* yang digunakan bervariasi antara lain 4 mm, 5mm dan 6 mm, sedangkan untuk diameter dari silinder sirkular utama sebesar 49 mm. Variasi sudut  $\alpha$  dari *disturbance body* yang digunakan adalah sebesar  $20^{\circ} - 60^{\circ}$ . Bilangan *Reynolds* yang digunakan sebesar  $5.5 \times 10^5$  dan ukuran gap ( $\delta$ ) pada penelitian ini berkisar antara 0.4 – 12 mm. Pengaturan letak *disturbance body* terhadap silinder sirkular utama pada proses pengujian seperti dijelaskan pada gambar di bawah ini:

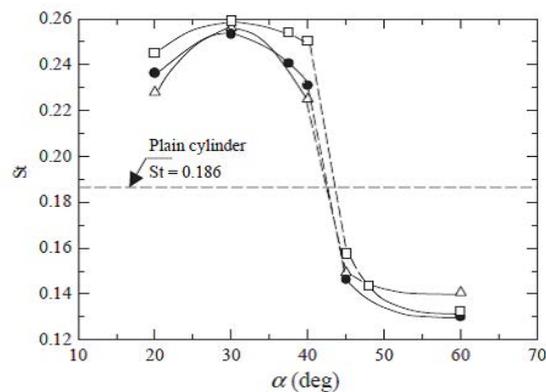


Gambar 2.1. Pengaturan Letak *Disturbance Body* Terhadap Silinder Sirkular Utama (Alam dkk., 2003)

Awal dari penelitian ini adalah melakukan investigasi terhadap gap ( $\delta$ ) dengan ukuran diameter pengganggu sebesar 5 mm dengan  $\alpha = 30^0$ . Pada investigasi selanjutnya gap dipertahankan pada posisi 0.4 mm pada sudut  $\alpha$ . Gambar 2.1 menunjukkan bahwa nilai  $C_D$  minimum terjadi pada saat  $\alpha = 30^0$  dan terjadi pengurangan gaya sebesar 67% pada saat menggunakan *disturbance body* berukuran 5 mm.



Gambar 2.2. Grafik Distribusi (a) *Time - averaged Pressure* Pada Silinder Polos dengan  $\bullet$ ,  $\alpha = 30^0$ ;  $\Delta$ ,  $\alpha = 40^0$ ;  $\blacktriangledown$ ,  $\alpha = 60^0$  (Alam dkk., 2003)

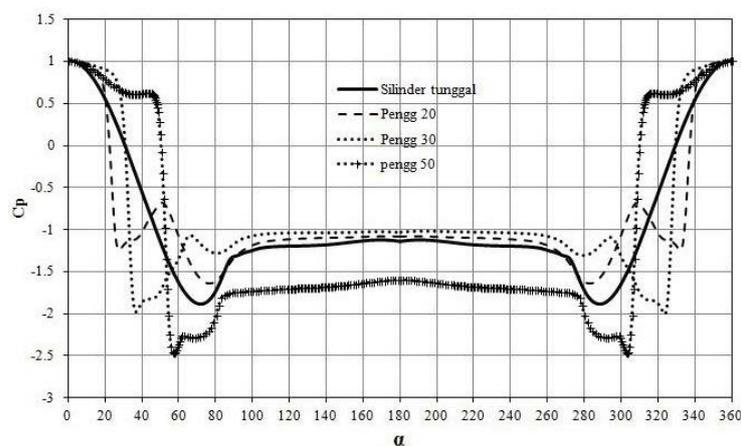


Gambar 2.3. Grafik Perubahan *Strouhal Number* Terhadap Perubahan Posisi Sudut *Disturbance Body* dengan  $\Delta$ ,  $d/D = 0.08$  ( $d = 4$  mm);  $\bullet$ ,  $d/D = 0.10$  ( $d = 5$  mm);  $\square$ ,  $d/D = 0.12$  ( $d = 6$  mm) (Alam dkk., 2003)

Gambar grafik 2.2 menjelaskan terjadinya penundaan separasi masif yang sangat signifikan terjadi pada sudut  $\alpha$  sebesar  $30^0$  yang disebabkan karena adanya *reattachment* aliran pada silinder utama akibat adanya penambahan *disturbance body*. Pada sudut  $60^0$ , setelah aliran melewati silinder langsung terseparasi tanpa adanya defleksi kembali ke silinder utama.

Gambar grafik 2.3 menunjukkan adanya pengaruh variasi *disturbance body* terhadap *Strouhal Number* (*St*). Nilai *Strouhal Number* tersebut berbanding terbalik terhadap nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ). Dari grafik diatas *disturbance body* dengan sudut  $\alpha = 30^0$  memiliki *Strouhal number* tertinggi, sedangkan pada *disturbance body* pada sudut  $\alpha = 60^0$  memiliki *strouhal number* terendah.

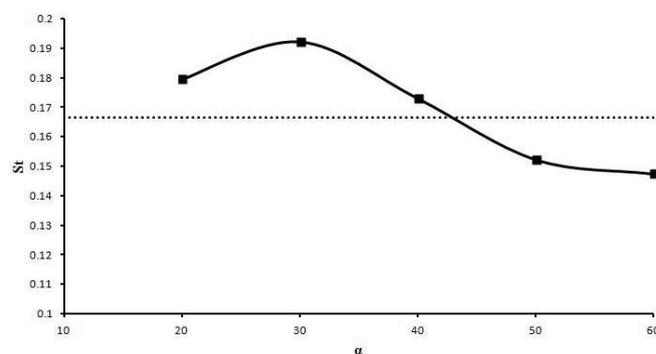
Penelitian secara numerik yang mengkaji karakteristik aliran melewati silinder sirkular dengan bodi pengganggu berupa silinder sirkular pada saluran sempit dilakukan oleh **Wijanarko dan Widodo (2013)**. Penelitian ini menggunakan variasi dari sudut bodi pengganggu mirip dengan penelitian yang dilakukan Alam dkk, yaitu pada  $\alpha = 20^0, 30^0, 40^0, 50^0$  dan  $60^0$  dengan bilangan *Reynolds* (*Re*) sebesar  $3,12 \times 10^4$  berdasar diameter silinder sirkular utama. Penelitian ini dilakukan pada *gap* ( $\delta$ ) konstan yaitu pada 0,4 mm. Pengaturan letak *disturbance body* terhadap silinder sirkular utama pada proses pengujian seperti dijelaskan pada gambar 2.1 milik penelitian Alam.



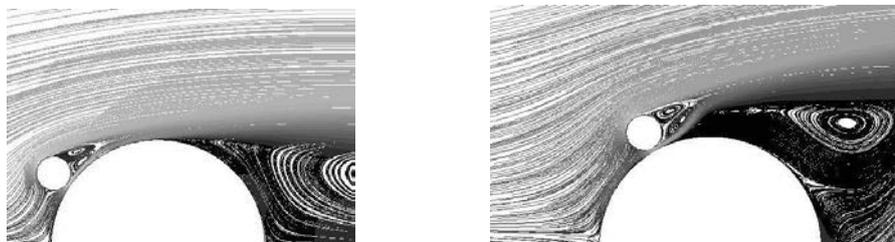
Gambar 2.4. Grafik distribusi koefisien tekanan silinder sirkular tunggal dan silinder sirkular dengan variasi bodi pengganggu ( $d/D = 0,16$ )

(Wijanarko dan Widodo, 2013)

Berdasarkan gambar 2.4 terlihat bahwa pada saat silinder sirkular dengan penambahan bodi pengganggu  $\alpha = 50^\circ$  memiliki titik separasi terkecil dibandingkan dengan pengganggu pada  $\alpha = 20^\circ$  dan  $30^\circ$ , hal ini disebabkan aliran setelah melewati silinder pengganggu tidak mengalami *reattachment* sehingga aliran yang melewati silinder utama mengalami separasi masif lebih awal akibat tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang ada. Pengganggu dengan sudut  $\alpha = 50^\circ$  memberikan akselerasi maksimum paling tinggi. Titik separasi masif terbesar terjadi pada silinder dengan sudut pengganggu  $30^\circ$ .



Gambar 2.5. Grafik *Strouhal number* silinder sirkular tunggal dan silinder sirkular dengan variasi bodi pengganggu ( $d/D = 0,16$ ) (Wijanarko dan Widodo, 2013).



Gambar 2.6. *Pathline* yang menunjukkan posisi reattachment dan separasi aliran (a) Pengganggu  $30^\circ$ , (b) pengganggu  $60^\circ$  (Wijanarko dan Widodo, 2013).

Dari gambar 2.5 terlihat bahwa distribusi *strouhal number* berbeda terhadap perubahan sudut bodi pengganggu. Nilai maksimum terjadi pada sudut  $\alpha = 30^\circ$  yang disebabkan oleh nilai  $C_d$  dan tertundanya separasi masif pada silinder sirkular utama seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. Tertundanya separasi masif menyebabkan lebar dari separasi *shear layer* berkurang, oleh karena itu nilai dari *strouhal number* bertambah menjadi lebih besar.

## 2.2 Karakteristik Aliran Melalui Silinder Sirkular Dengan Susunan *Side by Side*.

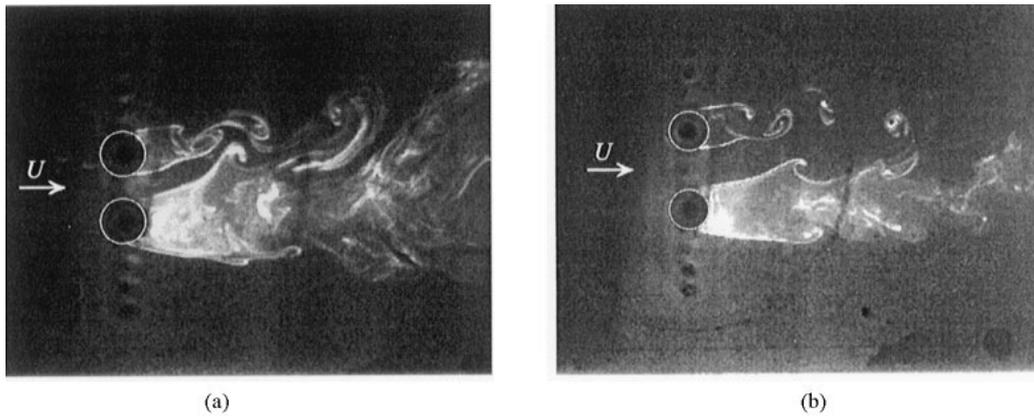
Ada banyak penelitian yang membahas tentang karakteristik aliran melalui silinder sirkular dengan susunan *side by side*, antara lain penelitian dari **Sumner, dkk (1998)** yang membahas karakteristik fluida pada silinder sirkular yang tersusun *side by side* pada *steady cross – flow* dan penelitian dari **Akilli, dkk (2004)** tentang karakteristik aliran dari silinder sirkular yang tersusun *side by side* pada air yang dangkal.

**Sumner, dkk (1998)** melakukan penelitian secara eksperimen dengan metode pengambilan data visualisasi aliran, *hot film anemometry* dan *particle image velocimetry* (PIV). Penelitian ini menggunakan dua sampai tiga buah silinder sirkular dengan diameter yang sama dalam proses pengambilan datanya yang masing – masing disusun secara *side by side*.

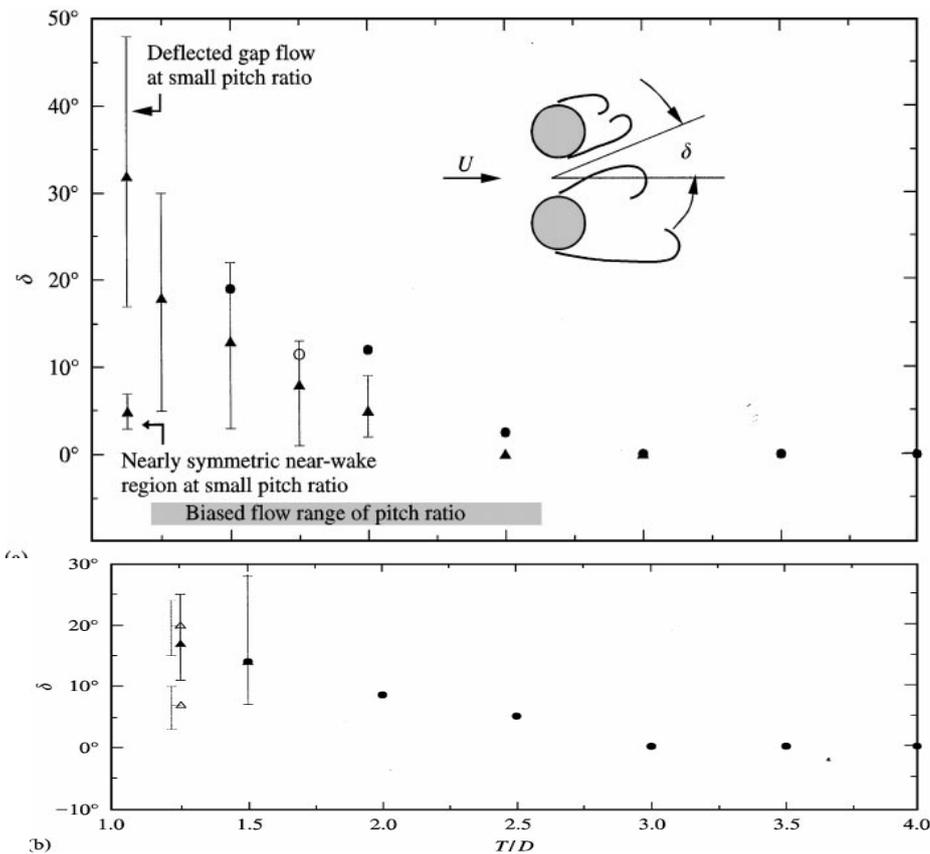
Pada eksperimen visualisasi aliran dan *hot film anemometry* dilakukan pada *closed - loop water tunnel* dengan ukuran *working section* 254 mm x 254 mm dan intensitas turbulensi *longitudinal freestream* 0,5%. Silinder model terbuat dari bahan *plexiglass* dengan diameter  $D = 16$  mm dengan *aspect ratio* 16 dan *blockage ratio* dari solid (tiap – tiap silinder) sebesar 6,3%. Masing – masing silinder memiliki dua *port* injeksi tinta dengan diameter 0,8 mm terletak pada *mid span* dan dekat titik separasi *boundary layer*. Kecepatan aliran  $U = 30 - 190$  mm/s, eksperimen dua buah silinder memiliki variasi  $T/D = 1,0 - 6,0$  dan untuk eksperimen tiga buah silinder memiliki variasi  $T/D = 1,0 - 3,0$  dengan penambahan jarak tiap  $0,5D$  pada masing – masing kasus. Untuk variasi angka *Reynolds* dari visualisasi aliran,  $Re = 500$  sampai  $1500$  dan untuk *hot film anemometry* nilai  $Re = 500 - 3000$ .

Pada eksperimen menggunakan *particle image velocimetry* (PIV) dilakukan pada *water towing tank* dengan ukuran  $0,76$  m x  $0,76$  m x  $3,05$  m. Silinder model terbuat dari *stainless steel* dengan diameter  $D = 25,4$  mm dengan *aspect ratio* 27. *Solid blockage ratio* sebesar 7% untuk konfigurasi dua silinder, dan 10,5% untuk konfigurasi tiga silinder. Kecepatan sebesar  $U = 50 - 120$  mm/s, dengan  $Re = 1300 - 2900$ . Eksperimen PIV dari dua buah silinder memiliki konfigurasi  $T/D =$





Gambar 2.8 Visualisasi aliran dua buah silinder yang tersusun secara *side by side* pada *steady cross flow*, dengan model aliran *bias*, pada  $Re = 1000 - 3000$ : (a)  $T/D = 1.5$ ; (b)  $T/D = 2.0$  (Sumner dkk., 1998)

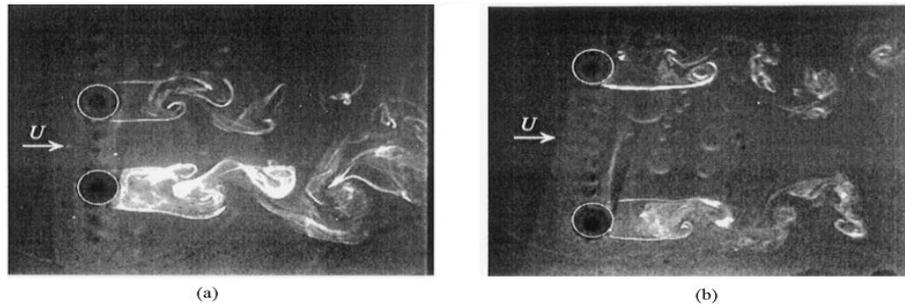


Gambar 2.9 Sudut defleksi aliran pada gap ( $\delta$ ),  $\bullet$  = visualisasi aliran,  $\blacktriangle$  = PIV,  $\circ$  = penelitian Kim dan Durbin (1988) (Sumner dkk., 1998)

Dari gambar 2.8 diatas terlihat bahwa pada silinder yang alirannya dibiarkan memiliki daerah dekat *wake* yang sempit dan frekuensi *vortex shedding*

yang lebih tinggi. Silinder lain yang tidak mengalami *biased flow* memiliki daerah dekat *wake* yang lebih luas dan frekuensi *vortex shedding* yang lebih rendah.

Pada gambar 2.9 diatas garis error menunjukkan rentang sudut defleksi sesaat dari pengukuran PIV, dengan perkiraan ketidakpastian  $\pm 2^0$ . Sudut defleksi dari visualisasi aliran dari gambar video lebih tinggi dari hasil PIV, perbedaan ini disebabkan efek eksperimen seperti *blockage* atau aspek rasio dari silinder.



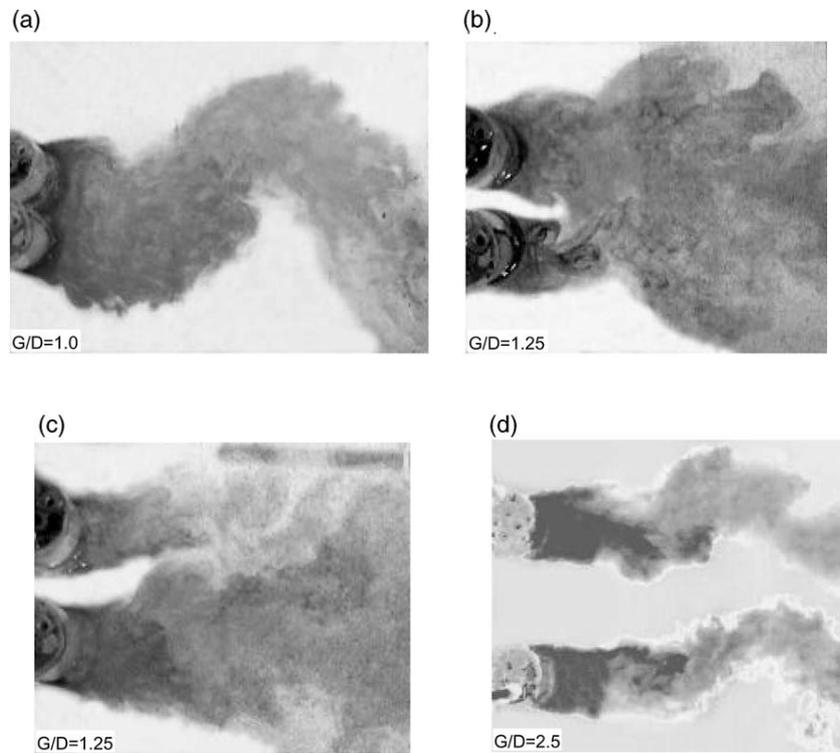
Gambar 2.10 Visualisasi aliran dua buah silinder sirkular dalam *steady cross flow* pada T/D besar (Sumner dkk., 1998)

Pada gambar 2.10 diatas dapat kita lihat bahwa pada T/D yang besar menunjukkan *anti phase vortex shedding*, untuk  $Re = 1000 - 3000$ . Pada *pitch ratio* yang lebih besar aliran yang dibiasakan menghilang, silinder sirkular yang tersusun *side by side* memiliki sifat yang terpisah satu sama lain sebagai *bluff body* yang terisolasi. Beberapa interaksi atau sinkronisasi mungkin terjadi satu sama lain.

**Akilli, dkk (2004)** melakukan penelitian yang hampir sama dengan penelitian dari **Sumner, dkk (1998)** dengan melakukan teknik PIV pada air yang dangkal dengan kisaran rasio dari gap  $G/D = 1.0 - 3.0$  dengan jarak 0,25. Penelitian ini dilakukan pada *close loop water channel* pada nilai  $Re = 5000$  (berdasarkan diameter silinder).

Dari gambar 2.11 bagian (a) menunjukkan ketika kedua silinder yang tersusun secara *side by side* saling menempel satu sama lain, *Karman vortex shedding* diteliti secara menyeluruh. Frekuensi *vortex shedding* di daerah *wake* sekitar setengah dari rata – rata kasus silinder tunggal. Ketika rasio jarak bervariasi antara 1 dan 1.15, efek dari aliran menyerupai jet antar silinder lemah, sehingga diabaikan. Gambar 2.11 (b) dan (c) menunjukkan model aliran yang tidak simetris pada  $G/D = 1.25$ , seperti aliran pada celah (*gap*) di defleksikan ke

arah silinder bawah seperti terlihat pada gambar 2.11(b) sementara pada sisi yang lain di defleksikan ke arah silinder atas seperti gambar 2.11(c) oleh karena itulah dikatakan bahwa kestabilan alami dari aliran *wake* tidak periodik tetapi berubah – ubah.

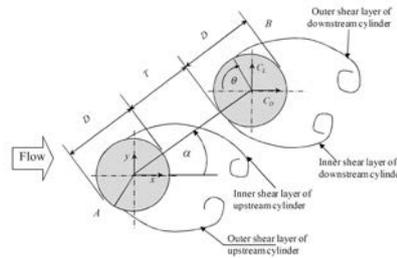


Gambar 2.11 visualisasi aliran dua silinder tersusun *side by side*  
(Akilli dkk., 2004)

Pada gambar 2.11(b) menunjukkan daerah aliran *wake* yang lebar pada bagian *downstream* silinder atas berhubungan dengan adanya frekuensi *vortex shedding* yang lebih kecil, sedangkan pada gambar 2.11(c) daerah aliran *wake* nya lebar pada bagian *downstream* dari silinder bawah dan berhubungan dengan frekuensi *vortex shedding* yang lebih tinggi. Pada jarak  $2D$  di bagian *downstream* silinder kedua daerah *wake* menyatu lebih besar membentuk daerah *wake* tetapi lebih lemah. Bentuk dari *vortex street* di daerah *downstream* masing – masing silinder tidak menunjukkan perbedaan dari aliran silinder tunggal. Frekuensi *shedding* dari kedua struktur *vortex* juga hampir sama dengan frekuensi *shedding* dari silinder tunggal. Daerah *wake* dari silinder atas lebih panjang daripada silinder bawah pada  $G/D = 1$ . Sudut defleksi dan *streamwise* melebar pada daerah *wake* yang mengecil sedangkan rasio *gap* meningkat.

### 2.3 Karakteristik Aliran Melalui Silinder Sirkular Dengan Susunan *Staggered*.

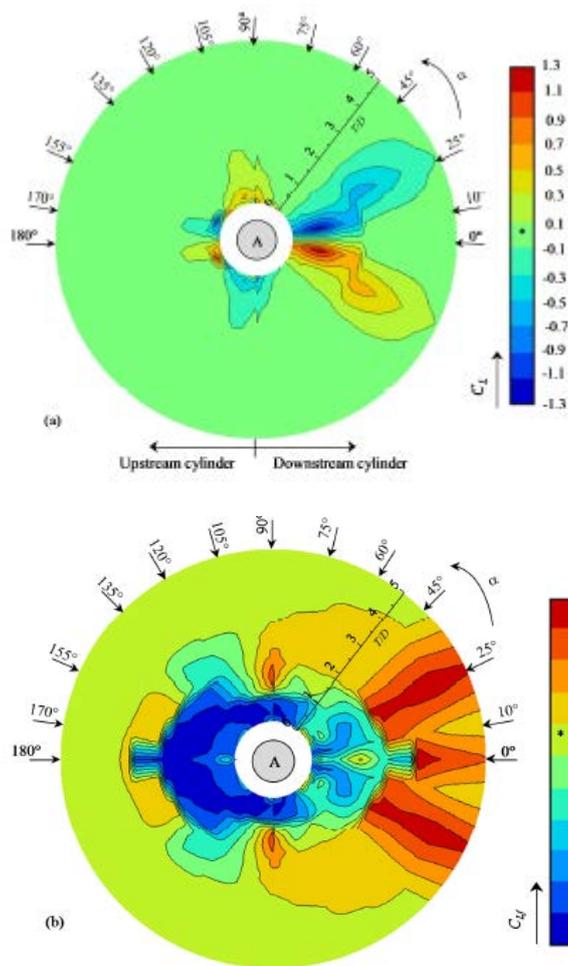
Alam dan Meyer (2013) melakukan penelitian secara eksperimen tentang ketidakstabilan aerodinamis secara global dari dua buah silinder kembar pada tipe aliran *cross flow*. Penelitian ini menggunakan *closed - circuit wind tunnel* dengan panjang = 2.2 m, lebar = 0.3 m, dan tinggi = 1.2 m. Penelitian ini menggunakan silinder dengan ukuran diameter = 49 mm, kecepatan *free stream* = 17 m/s, dan nilai  $Re = 5.5 \times 10^4$ . Sementara itu ketidakseragaman aliran  $\pm 0.2\%$  (rms) dan intensitas turbulensi longitudinal kurang dari 0.5%.



Gambar 2.12 Susunan silinder dan definisi dari simbol  
(Alam dan Meyer, 2013)

Seperti dapat kita lihat berdasarkan gambar 2.12 diatas, variasi dari penelitian ini terletak pada  $\alpha = 0^0, 10^0, 25^0, 45^0, 60^0, 75^0, 90^0, 105^0, 120^0, 135^0, 155^0, 170^0, \text{ dan } 180^0$ , dan rasio jarak  $T/D = 0.1 - 5$ , dengan variasi  $T/D = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, \text{ dan } 5.0$ . Selain itu penelitian ini juga dilakukan pada *water channel* dengan ukuran 250 mm x 350 mm x 1.5 m. Diameter silinder yang digunakan sebesar 20 mm pada  $Re = 350$  untuk mengetahui visualisasi aliran.

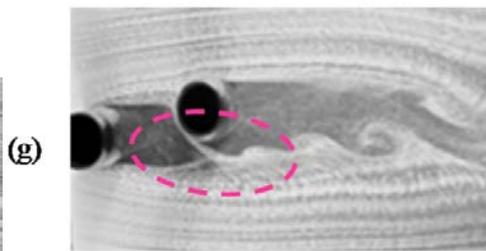
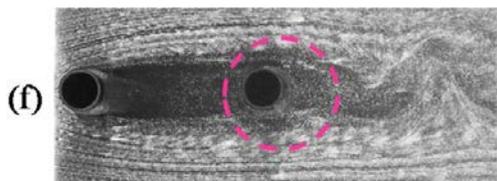
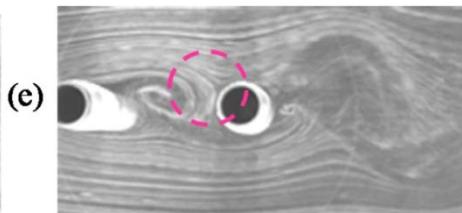
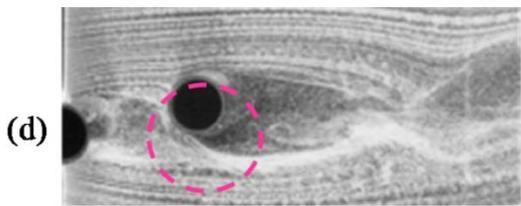
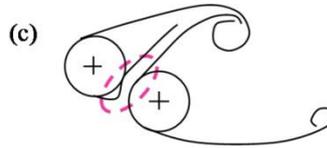
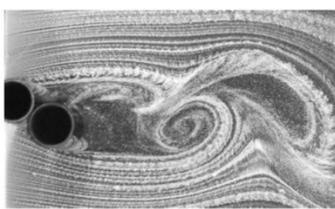
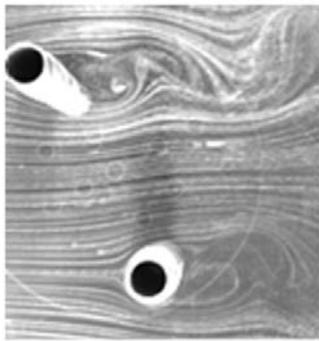
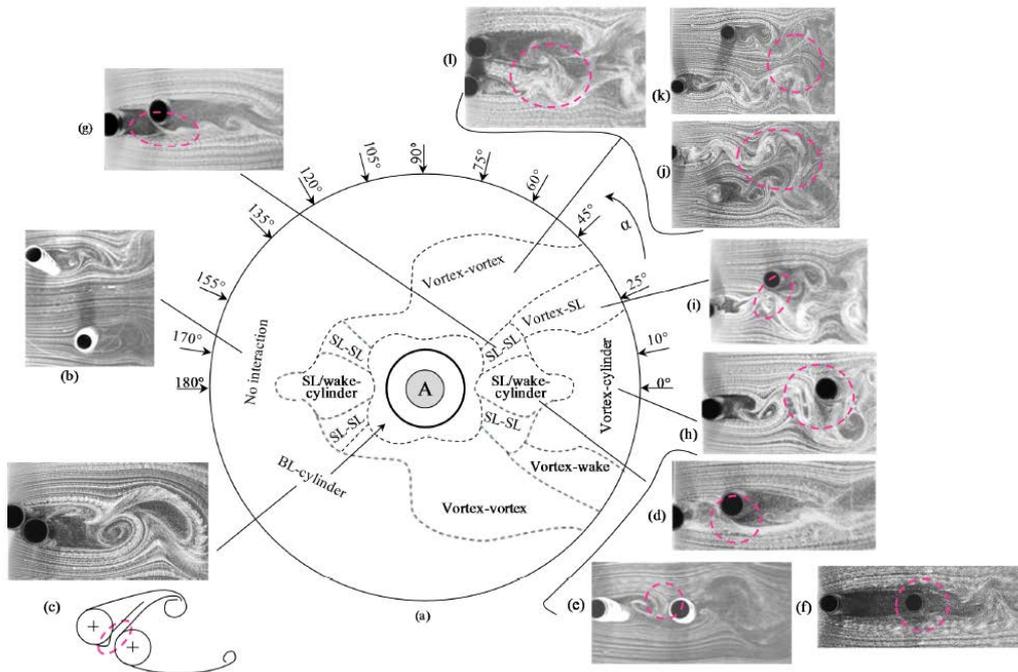
Pada garis skala gambar 2.13 warna yang ditandai '\*' menunjukkan nilai dari silinder tunggal terisolasi. Gambar ini menjelaskan berkaitan dengan susunan seperti gambar 2.12 diatas. Nilai CL di daerah *downstream* sensitif terhadap  $T/D$  dan  $\alpha$ , sementara di bagian *upstream* menunjukkan nilai silinder tunggal kecuali pada  $|\alpha| = 135^0 - 180^0, T/D < 0.4 - 1.0$  dan  $|\alpha| = 90^0 - 135^0, T/D < 1.3 - 0.4$ .

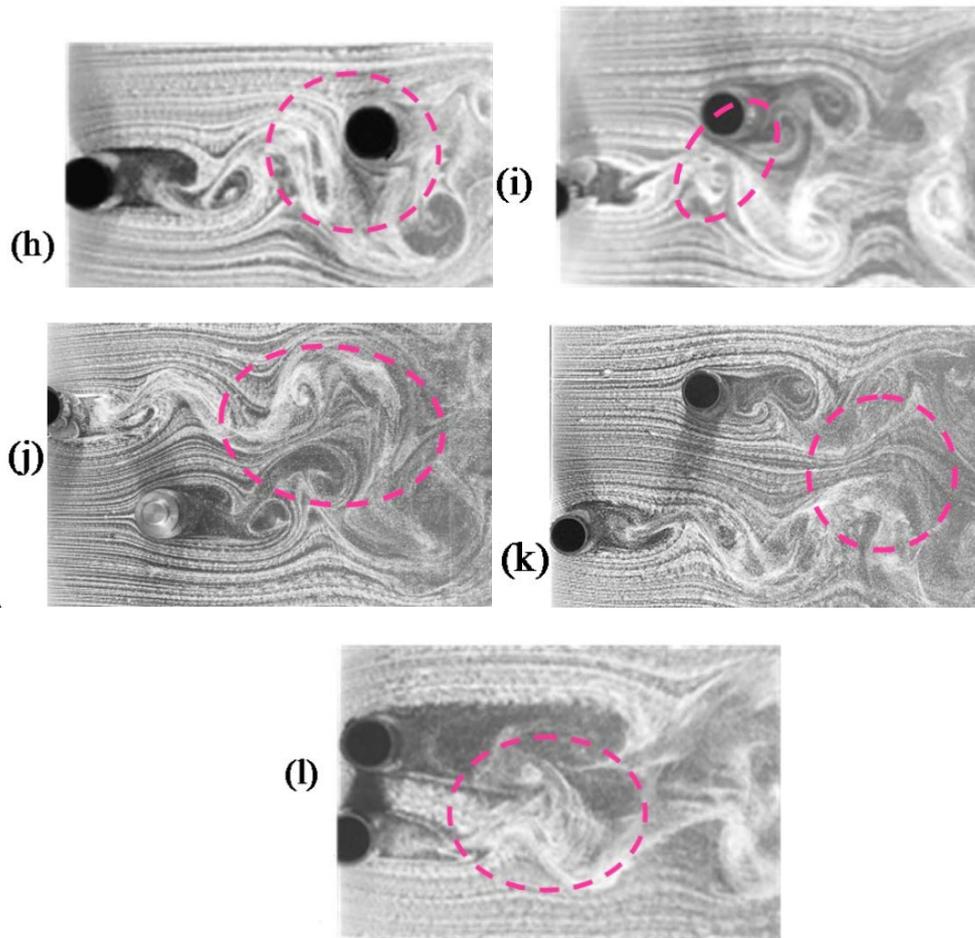


Gambar 2.13 Peta kontur dari (a) koefisien *lift* tengah terhadap waktu ( $C_L$ ) dan (b) koefisien *lift* fluktuatif ( $C_{LF}$ ) dari silinder B (Alam dan Meyer, 2013)

Nilai  $C_L$  pada  $T/D < 0.5$  sangat bervariasi pada  $\alpha = 0^\circ - 360^\circ$ . Pada masing-masing posisi *conjugate*  $C_L$  maksimum, sedangkan  $C_{LF}$  bernilai kecil pada  $T/D < 2-3$  tergantung pada nilai  $\alpha$  (gambar 2.13(b)). Pengaruh antar silinder memiliki efek negatif (peningkatan gaya) dan juga efek positif (menurunkan gaya dari silinder) tergantung pada nilai  $\alpha$  dan  $T/D$ , sehingga dapat diketahui bahwa  $C_L$  dan  $C_{LF}$  fungsi yang kuat terhadap  $T/D$  dan  $\alpha$ .

Berdasarkan gambar 2.14 dapat kita ketahui bahwa sebuah silinder berdekatan dengan silinder yang lain, akan terjadi mekanisme yang kompleks karena adanya interaksi dari *boundary layer*, *shear layer*, *vortex* dan *wake*.





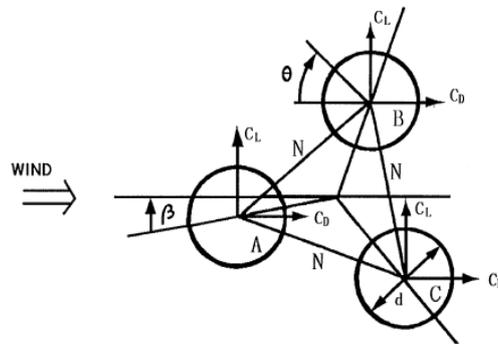
Gambar 2.14 Daerah interaksi T/D –  $\alpha$ , shear layer (SL), boundary layer (BL)  
(Alam dan Meyer, 2013)

Berdasarkan interaksi antar silinder tersebut sehingga terbentuk tujuh wilayah interaksi, yaitu:

1. Daerah tanpa interaksi (gambar 2.14 (b))
2. Daerah interaksi silinder dan *boundary layer* (gambar 2.14 (c))
3. Daerah interaksi *shear layer* / *wake* dan silinder (gambar 2.14 (d,e,f))
4. Daerah interaksi antar *shear layer* (gambar 2.14 (g))
5. Daerah interaksi *vortex* dan silinder (gambar 2.14 (h))
6. Daerah interaksi *vortex* dan *shear layer* (gambar 2.14 (i))
7. Daerah interaksi antar *vortex* (gambar 2.14 (j,k,l))

## 2.4 Karakteristik Aliran Melalui Tiga Buah Silinder Sirkular Dengan Susunan Equilateral Triangular.

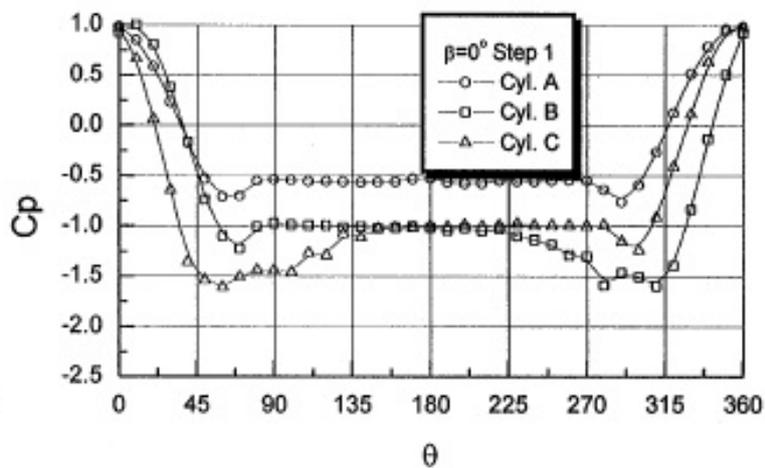
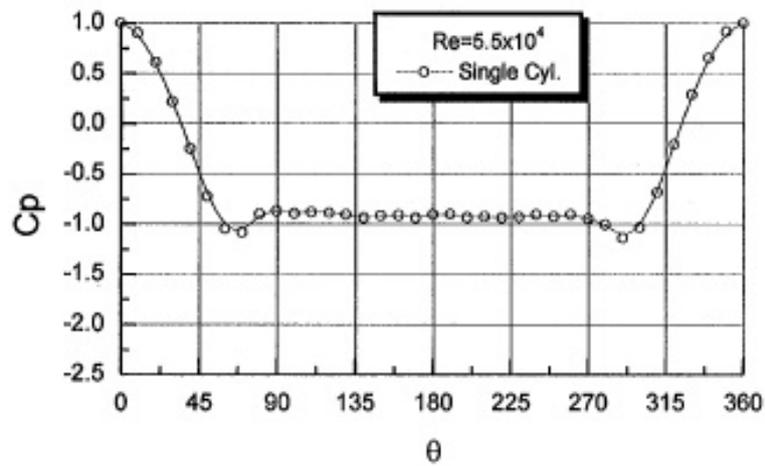
Gu dan Sun (2000) melakukan penelitian secara eksperimen tentang klasifikasi aliran pada tiga buah silinder dengan susunan *equilateral triangular*. Penelitian ini dilakukan pada *closed- return low speed wind tunnel*, dengan ukuran *test section* panjang = 8 m, lebar = 1.2 m, dan tinggi = 1 m. Variasi kecepatan pada *test section*  $\pm 1\%$ , dan intensitas turbulensi = 0.4% dengan kecepatan maksimum 36 m/s. Diameter silinder yang digunakan = 48 mm dari aluminium dan *pressure tap* diletakkan setiap  $10^0$  pada *midspan*.



Gambar 2.15 Konfigurasi tiga buah silinder dalam grup dengan konvensi tanda dari koefisien gaya fluida (Gu dan Sun, 2000)

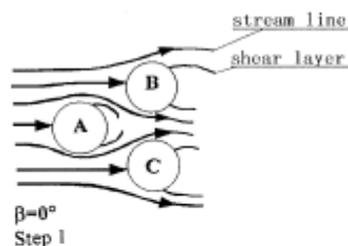
Berdasarkan penjelasan gambar 2.15 diatas, penelitian ini memvariasikan  $1.7 \leq N/d \leq 5.0$ , dan *angle of incident flow* ( $\beta$ ) dari  $0^0$ - $60^0$ . *Reynolds number* yang digunakan penelitian ini ada dua,  $5.5 \times 10^4$  (mengetahui distribusi tekanan) dan  $1.4 \times 10^4$  (mengetahui visualisasi aliran).

Gambar 2.16 menggunakan *small spacing ratio*,  $N/d = 1.7$ . Pada kasus *small spacing ratio* ini pengaruh antara tiga silinder sangat kuat dan kompleks. Karakteristik pengaruh sangat signifikan seperti hubungan posisi silinder yang divariasikan terhadap *angle of incident flow*. Pada kasus yang lebih kompleks, *shear layer* yang terpisah dari silinder *upstream* berinteraksi secara langsung dengan silinder *downstream* pada beberapa *incident angle* dari aliran.



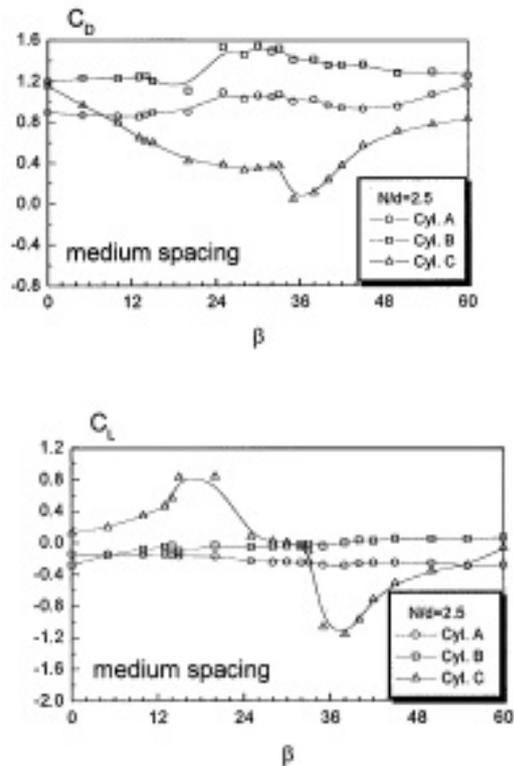
Gambar 2.16 Distribusi tekanan silinder tunggal dan tiga silinder dengan susunan *equilateral triangular* pada  $N/d = 1.7$  dan  $Re = 5.5 \times 10^4$  (Gu dan Sun, 2000)

Berikut akan di berikan ilustrasi skema dari posisi ketiga silinder dengan *incident angle*  $\beta = 0^\circ$  beserta penggambaran efek interaksi antara ketiga silinder pada kasus *small spacing ratio*.



Gambar 2.17 Ilustrasi skema model aliran pada kasus *small spacing ratio* (Gu dan Sun, 2000)

Salah satu contoh pada kasus  $\beta = 0^\circ$  dikorelasikan dengan penjelasan gambar grafik  $C_p$  2.14 dan gambar ilustrasi aliran 2.17 diketahui bahwa *blockage effect* disebabkan adanya silinder *downstream*, sehingga *base pressure* dari silinder A turun menjadi -0.5 kurang dari silinder tunggal yang bernilai -1. Tekanan minimum di sisi dalam silinder B dan C meningkat menjadi -1.5 karena adanya kecepatan aliran *gap* yang relatif lebih tinggi diantara *shear layer*.



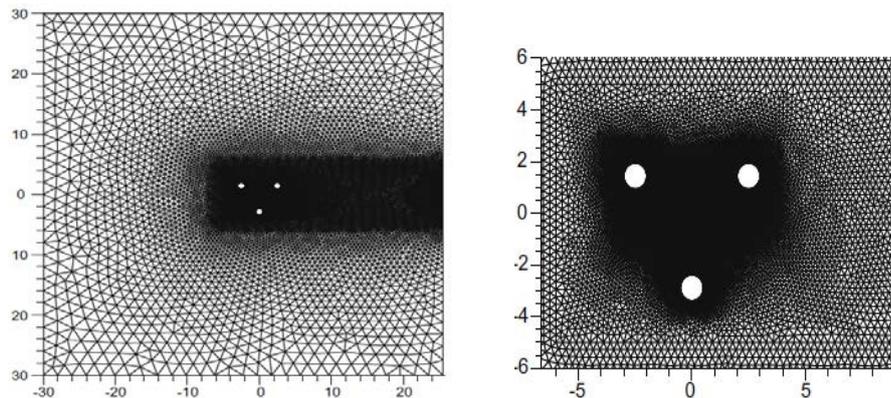
Gambar 2.18 Gaya *drag* dan *lift* dari ketiga silinder dengan susunan *equilateral triangular* pada *spacing ratio* berbeda (Gu dan Sun, 2000).

Dari gambar 2.18 diatas dapat diketahui bahwa pada *medium spacing* ( $2.5 \leq N/d \leq 3.0$ ), nilai  $C_D$  dari silinder A dan B berbeda. Nilai  $C_D$  dari silinder B 0.4 lebih besar dari silinder A karena adanya perubahan sudut *incident flow* sampai  $60^\circ$ . Ketika rasio jarak meningkat, menyebabkan penurunan perbedaan pergeseran ke arah awal dari *incident angle*.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa sudut dari *incident flow* sangat berpengaruh terhadap distribusi tekanan pada tiap silinder. Tampilan kompleks dari distribusi tekanan terjadi di silinder *downstream*. Efek dari *reattachment*

*shear layer* pada silinder *downstream* sangat signifikan terhadap pengaruh antar silinder.

**Bao, dkk (2010)** dalam penelitian yang berjudul “*Numerical simulation of flow over three circular cylinders in equilateral arrangements at low Reynolds number by a second – order characteristic based split finite element method*” melakukan simulasi 2D tentang karakteristik aliran yang terbentuk di belakang tiga buah silinder tersusun secara *equilateral* dengan variasi S/D dan *incident angle*. Selain itu penelitian ini juga meneliti pengaruh variasi S/D dan *incident angle* terhadap gaya drag (CD) dan lift (CL) serta angka Strouhal pada masing – masing silinder sirkular. Simulasi dilakukan dengan bentuk meshing *unstructured triangular finite element* seperti pada gambar 2.19, algoritma yang digunakan skema CBS/SPGP orde kedua dan dilakukan menggunakan model *unsteady* sampai aliran pada posisi *fully developed*.

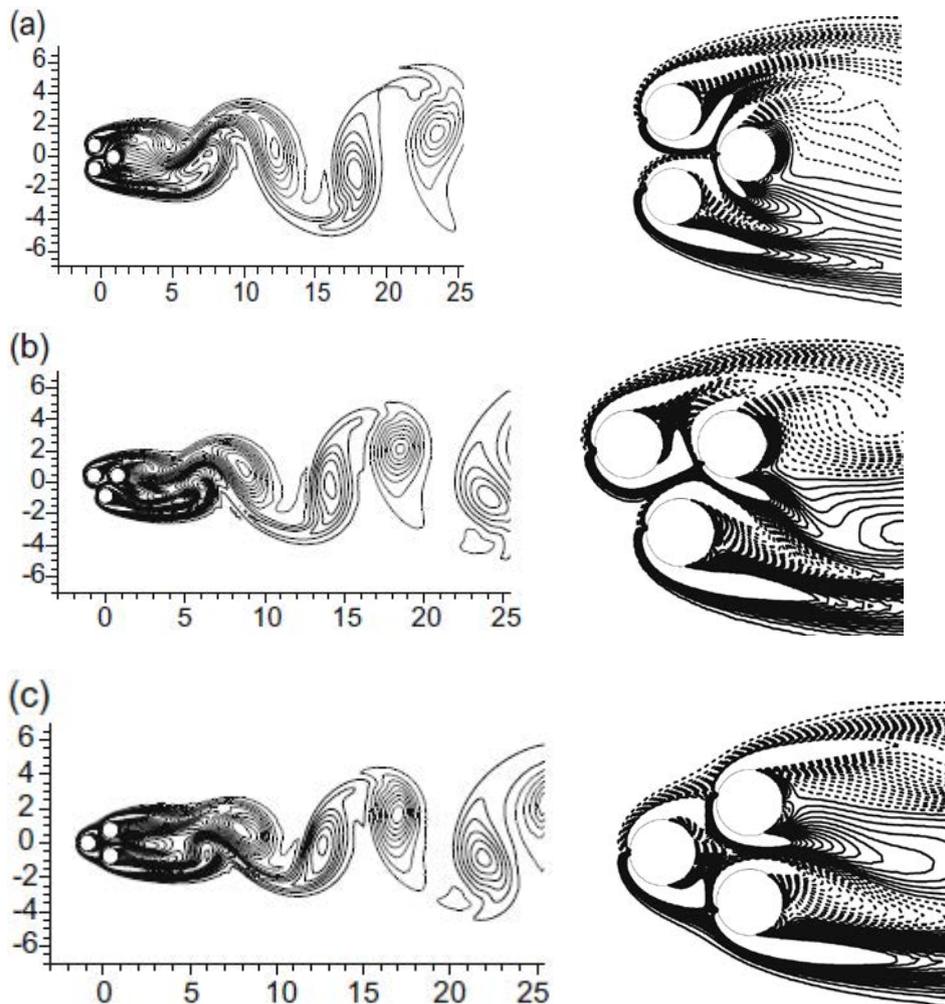


Gambar 2.19 Bentuk meshing komputasi disekitar silinder

(Bao dkk., 2010).

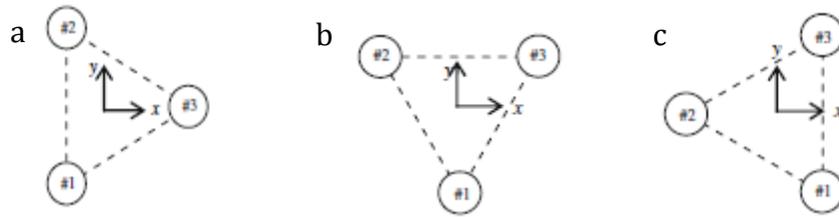
Kontur aliran yang terbentuk saat jarak gap kecil didominasi oleh efek jarak / kedekatan. Vortisitas yang terjadi pada sisi gap dari ketiga silinder ditekan sepenuhnya karena adanya aliran gap dan terlalu lemah untuk mempengaruhi daerah *wake*.

Berdasarkan gambar 2.20 terlihat bahwa karakteristik aliran pada gap kecil sangat bervariasi dan bersifat relatif terhadap posisi silinder. Pada gambar 2.20 (a) dapat kita lihat bahwa aliran yang terbentuk simetris.

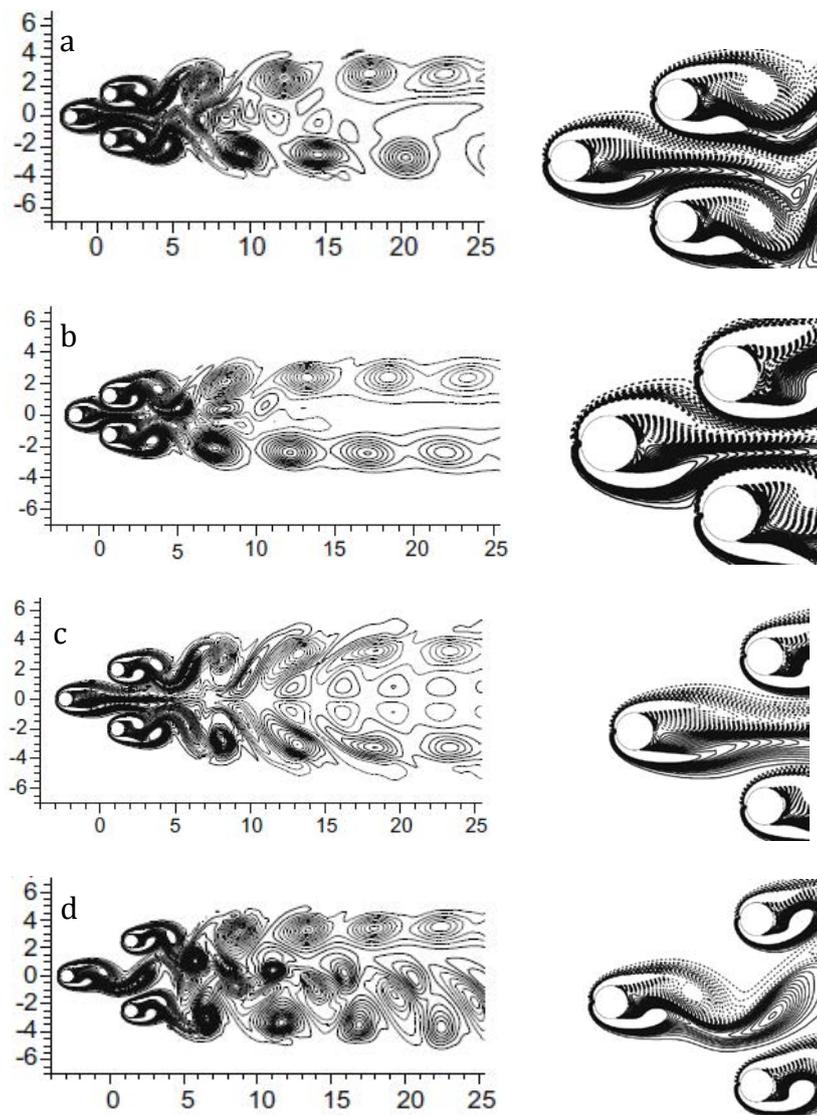


Gambar 2.20 Kontur *vorticity* sesaat pada  $s = 0,5$  (a)  $\alpha = 0^0$  ; (b)  $\alpha = 30^0$  dan (c)  $\alpha = 60^0$  ( $Re = 100$ ) (Bao dkk., 2010).

Pada geometri  $0^0$  ini pada semua variasi gap aliran yang terbentuk selalu simetris. Sedangkan pada gambar 2.20 (b) menunjukkan bahwa aliran masuk melalui gap antara silinder 1 dan 2 kemudian menempel pada bagian depan dari silinder 3 dan terbagi menjadi dua bagian, yaitu pada gap antara silinder 2 dan 3 yang tersusun tandem dan pada gap antara silinder 1 dan 3 yang tersusun secara *stagger*. Aliran yang melalui gap antara silinder 1 dan 3 selalu bergerak kebawah, dengan bentuk wake yang pendek dan lebar. Formasi silinder seperti terdapat pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 Posisi silinder pada beberapa sudut *incident angle* (Bao dkk., 2010).

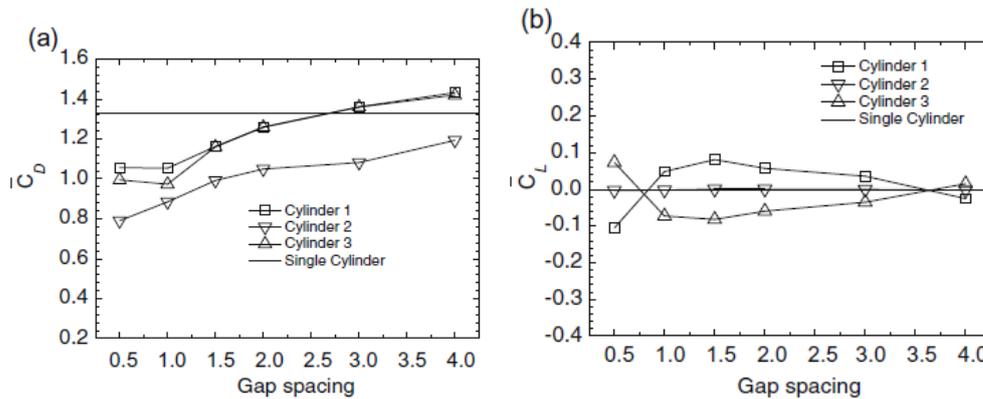


Gambar 2.22 Kontur *vorticity* sesaat pada  $\alpha = 60^0$ ,  $Re = 100$  : (a)  $s = 2$ ; (b)  $s = 1,5$ ; (c)  $s = 3$ ; (d)  $s = 4$  (Bao dkk., 2010).

Gambar 2.20 (c) menunjukkan posisi ketiga silinder saat diputar pada  $\alpha = 60^\circ$ , silinder 1 dan silinder 3 berpindah ke arah *downstream* dari silinder 2 dan tersusun secara *side by side* seperti ditunjukkan pada gambar 2.21 (c). Kontur aliran yang terbentuk asimetris, dan *wake* yang besar dan pendek terbentuk dibelakang silinder 3.

Yang termasuk ke dalam *intermediate gap spacing* pada gambar diatas seperti pada gambar 2.22 (a), (b) dan (c), sedangkan pada  $s = 4$  termasuk ke dalam *large gap spacing*. Pada gambar 2.22 (a) diatas terbentuk *in – phase synchronized vortex shedding* terjadi di belakang silinder 1 dan 3 yang tersusun *side by side*, selain itu *wake* yang terbentuk dibelakang silinder 2 terjepit oleh efek dari kedua silinder *downstream* dan menjadi lebih pendek pada gap. *Anti phase vortex shedding* dapat dilihat pada gambar 2.22 (b) dan (c), selain itu dapat dilihat terbentuknya model *flip flop wake* pada gambar 2.22 (b).

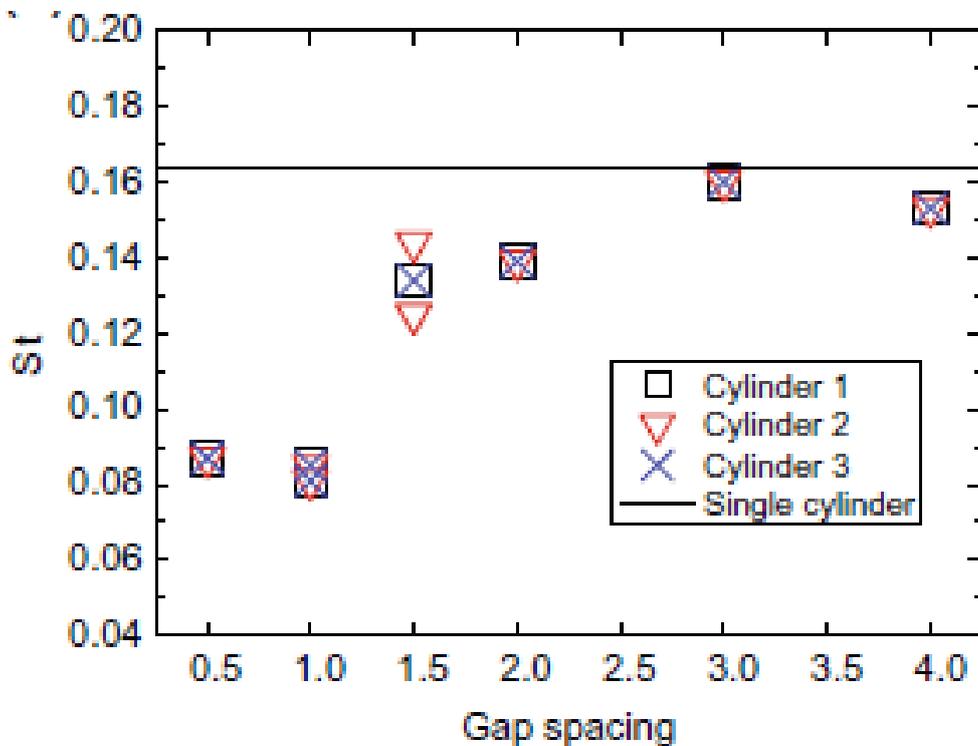
Model *in phase wake* terbentuk dibelakang ketiga silinder, *free shear layer* dari silinder *upstream* berfluktuasi pada gap dan berinteraksi dengan *free shear layer* dari silinder *downstream*. Vortisitas dari sisi dalam silinder 1 dan 3 lebih aktif dalam berinteraksi dengan vortisitas dari silinder 2.



Gambar 2.23 Variasi koefisien gaya terhadap *gap spacing* pada  $\alpha = 60^\circ$ : (a) *mean drag coefficient*; (b) *mean lift coefficient*; (c) nilai rms fluktuasi koefisien drag; (d) nilai rms fluktuasi koefisien *lift* (Bao dkk., 2010).

Nilai  $\bar{C}_{D1}$  lebih besar dari  $\bar{C}_{D3}$  berdasarkan fakta bahwa pada saat  $s \leq 1$  terbentuk *wake* pendek dibelakang silinder 1 sedangkan *wake* yang lebih besar terbentuk dibelakang silinder 3 yang disebabkan gaya yang diberikan lebih tinggi

pada silinder 1, dan hal ini konsisten pada  $Re$  tinggi. Hal ini dapat membuktikan bahwa silinder *upstream* memiliki efek signifikan dalam penurunan gaya drag pada silinder *downstream* yang tersusun secara *side by side* dan akan menurun seiring dengan penambahan *gap spacing* ( $s$ ). Nilai  $\bar{C}_{D2}$  lebih kecil dari nilai yang lain disebabkan karena adanya distribusi tekanan yang lebih tinggi dibelakang silinder 2 yang menyebabkan adanya efek terjepit pada silinder *downstream* meskipun pada *gap spacing* yang besar. Untuk nilai  $\bar{C}_{L1}$  berarah negatif dan  $\bar{C}_{L3}$  berarah positif, seiring dengan peningkatan besarnya *gap spacing* nilai  $\bar{C}_{L1}$  menjadi positif dan nilai  $\bar{C}_{L3}$  menjadi negatif berdasar gambar 2.23.



Gambar 2.24 Variasi angka Strouhal terhadap *gap spacing* pada  $\alpha = 60^\circ$   
(Bao dkk., 2010).

Nilai angka Strouhal pada gambar 2.24 diatas didapatkan melalui analisis spektral fluktuasi *lift force* menggunakan *power spectral density plot* (PSD). Efek gangguan aliran memainkan peran penting pada variasi angka Strouhal. Pada  $\alpha = 60^\circ$  frekuensi tambahan kedua biasanya dapat terlihat pada *gap spacing* menengah, yang dihasilkan dari kombinasi efek jarak dan gangguan dari *wake*.

Ketika efek jarak lebih mendominasi aliran, angka Strouhal untuk ketiga silinder biasanya identik. Frekuensi *vortex shedding* meningkat seiring dengan peningkatan *gap spacing*.

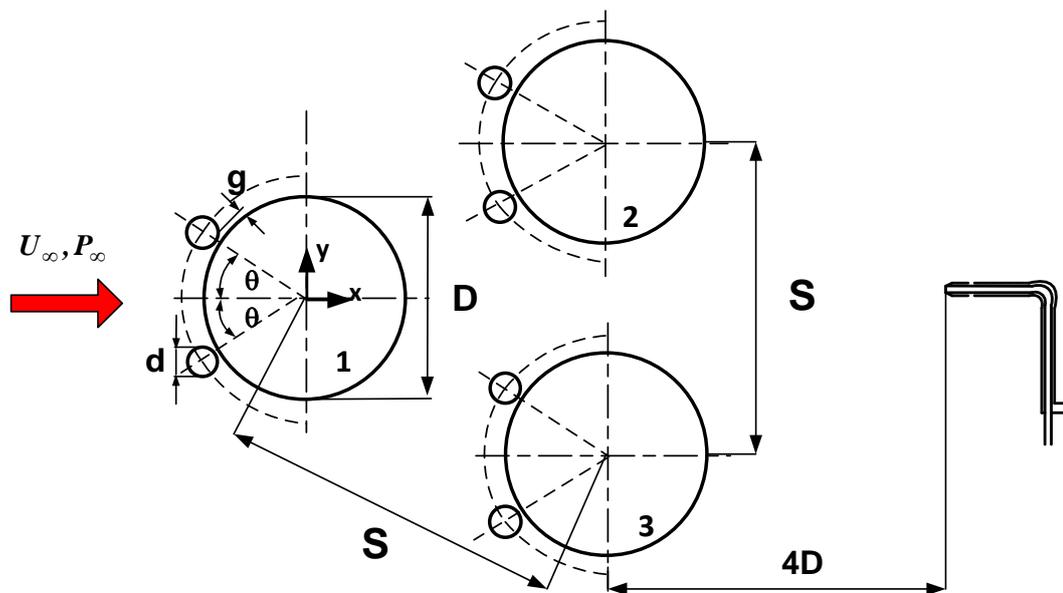
### BAB 3

#### METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dan numerik. Penelitian eksperimen dilakukan di dalam *subsonic open circuit wind tunnel*. Ada dua tahapan proses percobaan, pertama adalah percobaan sebagai penelitian pendahuluan, dan kedua adalah percobaan sebagai penelitian utama. Tahapan – tahapan penelitiannya sebagai berikut:

#### 3.1. Desain Eksperimen

Untuk desain eksperimen yang akan dilakukan seperti yang tertera pada gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1. Skema susunan silinder sirkular *equilateral triangular*

Untuk benda uji berupa tiga buah silinder sirkuler dengan diameter  $D = 25$  mm disusun secara *equilateral triangular* dan silinder pengganggu ( $d = 4$  mm) diletakkan di bagian *upstream* dari masing – masing silinder utama. Variasi jarak antar silinder ( $S/D$ ) antara lain: 1.5, 2 dan 2.5 dengan sudut pengganggu  $\theta = 30^\circ$ . Bilangan *Reynolds* yang digunakan pada penelitian ini sebesar  $2.2 \times 10^4$ . *Wall pressure tap* diletakkan di sisi *upstream* dan *downstream* pada *test section* untuk mendapatkan selisih tekanan. Untuk *wall pressure tap* yang diletakkan pada sisi

*upstream* berjarak 100 mm dari sumbu silinder utama, sedangkan yang diletakkan pada sisi *downstream* memiliki jarak 4D dari sumbu silinder *downstream*.

Proses pengukuran yang dilakukan pada proses pengujian ini terdiri dari pengukuran secara langsung (*direct measurement*) dan pengukuran secara tidak langsung (*indirect measurement*). Pada *direct measurement* hasil pengukuran dapat langsung terbaca, sedangkan pada *indirect measurement* hasil pengukurannya tidak dapat terbaca secara langsung karena diperlukan proses lebih lanjut untuk memproses data dari hasil pengukuran tersebut.

### **3.2. Perlengkapan Eksperimen**

Dalam penelitian yang dilakukan secara eksperimen ini sebagai peralatan utamanya adalah terowongan angin untuk mendapatkan data kuantitatif yang dibutuhkan. Peralatan tambahan untuk menunjang proses pengambilan data adalah alat ukur, dan sebagai benda uji ada silinder utama dan silinder pengganggu.

#### **3.2.1. Subsonic Open - Circuit Wind Tunnel**

Terowongan angin atau *wind tunnel* merupakan alat pengujian utama yang digunakan dalam eksperimen ini. Fungsi dari *wind tunnel* adalah untuk menguji benda dalam skala model. *Wind tunnel* yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah *wind tunnel* jenis *subsonic open – circuit* (lampiran 3). Yang dimaksud *open circuit wind tunnel* disini adalah udara yang dialirkan ke dalam *wind tunnel* langsung dilepas ke lingkungan setelah melalui *test section*. Spesifikasi dari *wind tunnel* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Tipe *wind tunnel* : *subsonic, open circuit*
- Panjang *wind tunnel* : 600 mm
- Lebar *wind tunnel* : 300 mm
- Tinggi *wind tunnel* : 300 mm
- Saluran uji : oktagonal

### 3.2.2. Alat Ukur

Alat – alat yang membantu dalam proses pengukuran yang digunakan pada penelitian ini antara lain: *pitot static tube*, *wall pressure tap* dan *pressure tranducer* beserta data akuisisinya.

#### A. *Pitot Tube*

*Pitot Tube* (lampiran 1, gambar 2) merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur besar tekanan statis dan tekanan stagnasi dari aliran di antara benda uji dan di belakang benda uji.

#### B. *Wall Pressure Tap*

*Wall pressure tap* merupakan lubang - lubang kecil berdiameter 1 mm yang dihubungkan pada manometer atau *pressure tranducer* yang dipasang sepanjang kontur permukaan benda uji ataupun saluran *wind tunnel* searah aliran dan tegak lurus permukaan.

#### C. *Pressure Tranducer dan Data Akuisisi*

*Pressure tranduser* (lampiran 1, gambar 3) dan data akuisisi merupakan alat yang digunakan untuk mengukur tekanan yang terintegrasi secara digital sehingga dihasilkan nilai yang lebih presisi.

#### D. *Inclined Manometer*

*Inclined manometer* (lampiran 2, gambar 4) merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur tekanan yang terukur dari *pressure tap* dan *pitot static tube*. Bentuk *inclined manometer* adalah seperti huruf V dengan sudut kemiringan  $15^0$  untuk mengetahui  $\Delta h$  yang terukur. Spesifikasi *inclined manometer* yang digunakan sebagai berikut:

- Fluida kerja : *Red Oil*
- *Specific gravity red oil* : 0.827
- Skala : 1 mm
- Toleransi :  $\pm 0.5$  mm

#### E. *Filler Gauge*

*Filler gauge* (lampiran 2, gambar 5) merupakan alat yang digunakan untuk mengukur celah antara *main bluff body* dengan *disturbance* agar jaraknya tidak berubah saat dipindahkan posisi sudutnya.

## F. Humidity dan Temperature Meter

*Humidity* dan *temperature meter* (lampiran 2, gambar 6) merupakan alat untuk mengukur kelembaban dan temperatur fluida kerja yang digunakan agar data yang didapatkan akurat.

## G. Inverter

*Inverter* (lampiran 3, gambar 7) merupakan alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan putar *blower*, untuk spesifikasi *inverter* seperti tertera pada tabel 3.1 dibawah ini:

Tabel 3.1 Spesifikasi Inverter

Jenis Atribut	Nilai Atribut
Current Rating	4,8 A
Series	FVR- G5
Type	Inverter Auto-Drive
Voltage	220 → 240V ac
Power Rating	1,5kW/2 HP
Dimensions H x W x D	390 x 235 x 235mm
Number of Phases	1

### 3.2.3. Benda Uji

#### 1. Silinder Sirkular (*main bluff body*)

Silinder utama (lampiran 1, gambar 1) sebanyak tiga buah yang diberi pressure tap disepanjang midspan yang digunakan dalam penelitian ini dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Panjang silinder : 300 mm
- Diameter silinder : 25 mm
- Bahan : Pipa PVC
- Jumlah *pressure tap* : 4 buah lubang

#### 2. *Disturbance Bluff Body*

*Disturbance bluff body* (lampiran 4, gambar 10) merupakan *circular cylinder* yang diletakkan di daerah *upstream* dari silinder sirkular utama dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Panjang : 300 mm
- Diameter : 4 mm

- Tipe : Silinder sirkular berpermukaan halus

### 3.3. Prosedur Eksperimen

Prosedur eksperimen merupakan tahapan dalam suatu penelitian yang dilakukan secara eksperimen untuk mendapatkan data kuantitatif yang kemudian diolah dan dianalisa, oleh karena itu tahapan ini harus diperhatikan dan dilakukan dengan hati – hati untuk meminimalisir kesalahan yang akan berakibat fatal pada hasil pengambilan data. Adapun langkah – langkah yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut :

#### 3.3.1. Kalibrasi Alat Ukur

Untuk peralatan yang dipergunakan dalam proses kalibrasi alat ukur ini antara lain sebagai berikut :

- Data akuisisi DAQ PRO 5300
- *Pressure transducer*
- *Inclined Manometer*
- *Pitot static tube*

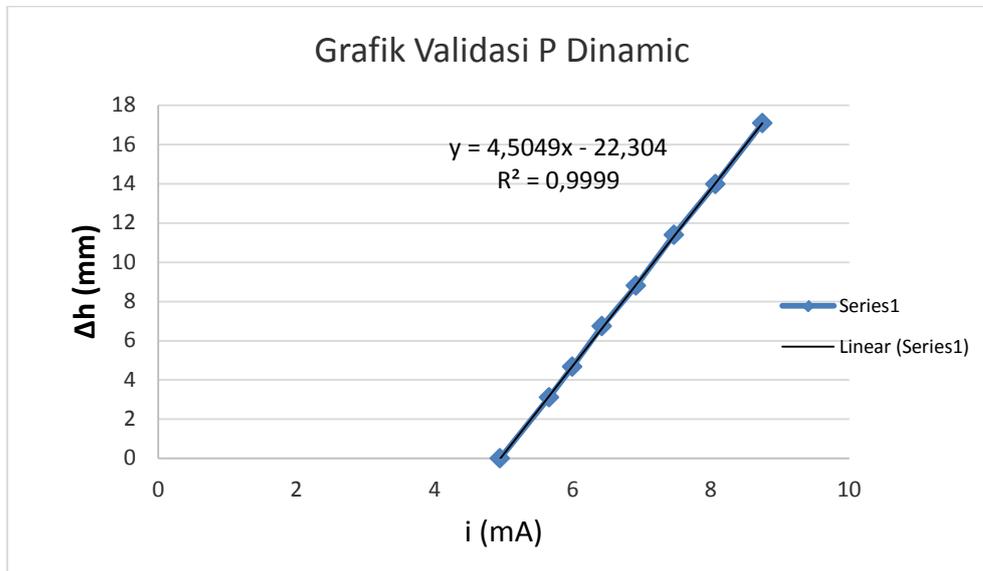
Adapun mekanisme kalibrasi alat ukur dengan membandingkan data yang terbaca dari perubahan ketinggian cairan pada *inclined manometer* yang dibandingkan dengan pembacaan di *pressure transducer*, yang kemudian akan ditampilkan dalam bentuk grafik (lampiran 4 gambar 11) . Detail pengukurannya sebagai berikut :

##### a. Kalibrasi tekanan dinamik

Untuk proses kalibrasi tekanan dinamik dilakukan sebagai berikut:

1. Memasang instalasi dalam kondisi *free stream* tanpa benda uji.
2. Memasang instalasi dengan satu buah silinder.
3. Memasang *pitot static tube* pada dinding disambungkan ke manometer dan transducer.
4. Mengatur inverter dari 0 – 42.00 Hz pada interval 4 Hz.
5. Mengambil data dari manometer dan *pressure transducer* untuk tekanan dinamik.
6. Melalui manometer didapatkan  $\Delta h$  (mm), melalui data akuisisi didapatkan nilai arus ( I ) dalam satuan mAmp.

7. Dari data yang diperoleh, dibuat grafik hubungan  $\Delta h$  manometer dengan arus ( I ) yang diperoleh. Hasil kalibrasi tekanan dinamik seperti tampak pada gambar 3.2 di bawah ini :



Gambar 3.2 Grafik kalibrasi hubungan pengukuran manometer dengan arus dari *pressure transducer*.

#### b. Kalibrasi tekanan pada dinding

Proses kalibrasi tekanan pada dinding adalah sebagai berikut :

1. Memasang instalasi pada keadaan *free stream* tanpa benda uji.
2. Memasang instalasi dengan satu buah silinder.
3. *Wall pressure tap* pada tiap sisi *test section* dikumpulkan menjadi satu kemudian disambungkan pada manometer dan transducer. Data yang diperoleh merupakan tekanan rata – rata dari ke empat sisi *test section*.
4. Mengatur inverter dari 0 – 42.00 Hz.
5. Mengambil data manometer dan *pressure transducer* pada tekanan statis.
6. Data yang didapat dari manometer dalam bentuk  $\Delta h$  (mm), sedangkan dari data akuisisi didapatkan data dalam bentuk arus ( I ) dalam satuan (mA).
7. Membuat grafik hubungan antara  $\Delta h$  manometer dengan arus ( I ) dari data yang telah diperoleh.

### 3.3.2. Pengambilan data

Tahapan – tahapan dalam proses pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Mengukur temperatur dan tekanan udara di dalam ruang yang digunakan untuk pengujian.
2. Mempersiapkan peralatan dan memasang benda uji yang akan digunakan untuk eksperimen.
3. Memasang benda uji pada saluran *wind tunnel* yang berupa tiga buah silinder sirkular dengan diameter  $D = 25$  mm, konfigurasi *equilateral triangular* pada jarak  $L/D$  1.5; 2 dan 2.5. *Disturbance body* dengan  $d = 4$  mm diletakkan pada sudut  $30^0$  dengan posisi peletakan berada di depan masing – masing silinder.
4. Mengukur tingkat kesejajaran antara dinding dengan silinder menggunakan *water pass*.
5. Menghidupkan *wind tunnel* dan mengatur kecepatan perlahan sampai dalam kondisi *steady*.
6. Mengukur tekanan statis dan stagnasi pada bagian tengah saluran uji (*inlet wall pressure tap* dan *outlet wall pressure tap*) pada nilai  $Re = 2.2 \times 10^4$ .
7. Mengukur tekanan yang terjadi di sepanjang kontur permukaan silinder yang dipasang *pressure tap* dengan mekanisme memutar silinder dari sudut  $0^0$  sampai  $180^0$  pada interval  $5^0$ .
8. Mengukur *velocity profile* yang terjadi pada daerah belakang *downstream* silinder utama dengan jarak  $4D$  dari *centreline* silinder. Proses pengambilan data dilakukan mulai dari bagian tepi *upper wall* saluran uji sampai bagian *lower wall* dengan jarak pengambilan data dari titik satu ke titik lainnya sebesar 5 mm. Tujuan dari proses pengukuran *velocity profile* ini adalah untuk mengetahui pola *wake* yang terjadi di belakang silinder *downstream* dengan menggunakan *pitot static tube*.

### 3.4. Analisa Grup Tak Berdimensi Untuk Koefisien Tekanan Pada Silinder

Untuk distribusi tekanan pada silinder dipengaruhi oleh beberapa parameter, oleh sebab itu perbedaan tekanan dapat dituliskan sebagai fungsi dari parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta P = f (\rho, \bar{V}, \mu, a, b, d, D, g, S)$$

Dengan penjabaran penjelasan sebagai berikut :

- Properti fluida :  $\rho, \mu, \bar{V}$
- Geometri benda :  $a, b, d, D, g, S$

Parameter yang berpengaruh dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.2. berikut:

Table 3.2. Parameter yang berpengaruh

No.	Variabel	Unit	Dimensi
1.	$\Delta P =$ Perubahan Tekanan	$\frac{kg}{m \cdot s^2}$	$ML^{-1}t^{-2}$
2.	$\rho =$ Massa jenis udara	$\frac{Kg}{m^3}$	$ML^{-3}$
3.	$\mu =$ Viskositas absolut udara	$\frac{kg}{m \cdot s}$	$ML^{-1}t^{-1}$
4.	$\bar{V} =$ Kecepatan aliran	$\frac{m}{s}$	$Lt^{-1}$
5.	$g =$ Jarak antara silinder utama dengan inlet disturbance body	$m$	$L$
6.	$D =$ Diameter silinder sirkular	$m$	$L$
7.	$d =$ Diameter inlet disturbance body	$m$	$L$
8.	$S =$ Jarak antara silinder upstream dengan silinder downstream	$m$	$L$
9.	$b =$ Jarak center to center antara inlet disturbance body dengan silinder utama	$m$	$L$
10.	$a =$ Tinggi center to center antara inlet disturbance body dengan silinder utama.	$m$	$L$

dimana :

$$\Delta P = \text{Perbedaan Tekanan (N/m}^2\text{)}, \text{ satuan N/m}^2 = \frac{kg}{m \cdot s^2} \cdot$$

Dengan menggunakan *Buckingham  $\pi$ -theorem* dengan parameter berulang,  $\rho$ ,  $V$  dan  $D$ , diperoleh 7 grup tak berdimensi yaitu :

1.  $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho V^2}$ , (koefisien tekanan)
2.  $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$ , (bilangan Reynolds)
3.  $\pi_3 = \frac{a}{D}$ , (perbandingan tinggi *center to center* antara inlet *disturbance body* dengan silinder utama dengan diameter silinder utama)
4.  $\pi_4 = \frac{b}{D}$ , (perbandingan jarak *center to center* antara inlet *disturbance body* dengan silinder utama dan diameter silinder utama)
5.  $\pi_5 = \frac{d}{D}$ , (perbandingan diameter inlet *disturbance body* dengan diameter silinder utama)
6.  $\pi_6 = \frac{g}{D}$ , (perbandingan jarak pusat inlet *disturbance body* dengan pusat silinder sirkular dengan diameter silinder utama)
7.  $\pi_7 = \frac{S}{D}$ , (perbandingan jarak antar *center* silinder utama dengan diameter silinder utama)
8.  $\pi_8 = \frac{\pi_3}{\pi_4} = \frac{\frac{a}{D}}{\frac{b}{D}} = \frac{a}{b} = \theta$ , (perbandingan  $\pi_3$  dan  $\pi_4$ , sehingga didapatkan nilai dari sudut  $\theta$  / sudut pengganggu terhadap silinder utama)

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

- $\pi_1 = f_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7)$
- $\frac{\Delta P}{\rho V^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{a}{D}, \frac{b}{D}, \frac{d}{D}, \frac{g}{D}, \frac{S}{D}\right)$

Karena  $\pi_3$  dan  $\pi_4$  diringkas untuk mendapatkan nilai sudut dari silinder pengganggu terhadap silinder utama ( $\theta$ ), maka fungsi bilangan tak berdimensi menjadi :

$$\frac{\Delta P}{\rho V^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \theta, \frac{d}{D}, \frac{g}{D}, \frac{S}{D}\right)$$

Pada penelitian ini,  $\frac{\mu}{\rho V D}$ ,  $\frac{d}{D}$ ,  $\frac{g}{D}$  ditentukan konstan, sedangkan sudut posisi dari inlet *disturbance body* ( $\theta$ ) dan rasio jarak (S/D) antar silinder di variasikan, untuk melihat perbandingan reduksi gaya hambat yang terjadi diantara variasi tersebut, sehingga diperoleh:

$$\frac{\Delta P}{\rho V^2} = f_3\left(\theta, \frac{S}{D}\right)$$

Sehingga nilai koefisien *pressure* ( $C_p$ ) pada silinder utama adalah,

$$C_p = \frac{\Delta P}{\rho V^2} = f_3\left(\theta, \frac{S}{D}\right)$$

### 3.5. Pengolahan Data Hasil Eksperimen

Pada penelitian yang dilakukan secara eksperimen ini didapatkan beberapa jenis data hasil pengukuran, antara lain sebagai berikut:

Data hasil pengukuran yang telah disebutkan diatas kemudian akan diolah sehingga dapat digunakan untuk menganalisis fenomena yang terjadi pada aliran tersebut, berupa data kuantitatif.

Data kuantitatif yang didapat dari analisa data antara lain:

- Koefisien tekanan ( $C_p$ )
- *Coefficient of pressure drag* ( $C_{DP}$ )

Untuk memperoleh nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) dan *coefficient of pressure drag* ( $C_{DP}$ ) dari data yang diperoleh (hasil pengukuran) harus melalui beberapa tahapan. Sebelum melalui serangkaian tahapan perhitungan tersebut kita harus mendapatkan nilai tekanan stagnasi dan tekanan statisnya.

Tekanan statis dapat dijelaskan sebagai tekanan yang dapat diketahui melalui pengukuran menggunakan suatu instrumen (alat yang bergerak) bersama aliran, kecepatan relatif alat ukur terhadap aliran adalah nol. Seperti diketahui bahwa tidak ada fluida ideal pada aplikasi sehari – hari sehingga pengukuran tekanan statis ini menggunakan *wall pressure tap* karena seperti diketahui bahwa pada fluida *viscous*, kecepatan aliran pada permukaan dinding bernilai nol.

Tekanan stagnasi merupakan tekanan total yang diukur di daerah ketika aliran fluida mengalami perlambatan hingga kecepatannya bernilai nol dengan proses perlambatan tanpa gesekan. Persamaan yang digunakan merupakan persamaan Bernoulli yang diterapkan pada aliran *incompressible* sepanjang *streamline*.

1. Perhitungan koefisien tekanan ( $C_p$ ) didapatkan dari hasil selisih antara tekanan lokal dengan tekanan aliran bebas dibagi dengan tekanan dinamis.

$$C_p = \frac{p_c - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2} \quad (3.1)$$

Dimana :  $P_c$  = Tekanan statis pada kontur lokal

$P_\infty$  = Tekanan statis aliran bebas

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2$  = Tekanan dinamis aliran bebas

2. Perhitungan koefisien *pressure drag* ( $C_{DP}$ ) dan koefisien drag total ( $C_{DT}$ )

Koefisien *drag* terbagi menjadi dua :

1. Dalam penelitian ini yang didapatkan hanya *drag pressure coefficient* ( $C_{DP}$ ). *Drag pressure coefficient* yang didapatkan dari kontur tekanan yang diukur dari permukaan dinding silinder utama, karena adanya perbedaan tekanan yang didapatkan dari masing – masing *pressure tap* silinder. Perhitungan  $C_{DP}$  didapatkan dari nilai distribusi tekanan ( $C_p$ ) dari hasil pengintegrasian koefisien tekanan kontur permukaan silinder ( $C_p$ ) tersebut.

$$C_{DP} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (3.2)$$

Untuk menyelesaikan persamaan 3.2 digunakan persamaan simpson 1/3 segmen berganda seperti persamaan 3.4 berikut:

$$I \cong (b - a) \frac{f(x_0) + 4 \sum_{j=1,3,5}^{n-1} f(x_j) + 2 \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n)}{3n} \quad (3.3)$$

Dimana :

- $b = 2\pi$  dan  $a = 0$ ,  $f(x_0) = C_p(0) \cos(0)$  dan  $f(x_n) = C_p(2\pi) \cos(2\pi)$  digunakan untuk menyelesaikan persamaan (3.2).
- $f(x_i)$  merupakan fungsi data ganjil dengan nilai  $i = 1, 3, 5 \dots n-1$ .

### 3.6 Permodelan dan simulasi numerik

Permodelan numerik pada penelitian ini (model 2D) akan menggunakan CFD (*computational fluid dynamics*) komersial dengan bantuan *software* Gambit 2.4.6 dan Fluent 6.3.26 dalam menganalisis fenomena yang terjadi pada fluida yang melintasi silinder.

Setelah tahapan *pre processing* selesai dilakukan tahap *processing* dimana file meshing (.msh) tersebut di *running* menggunakan *software* CFD komersial FLUENT 6.3.26, memilih fenomena fisik atau kimia yang diperlukan, menentukan tingkat akurasi yang diinginkan, menentukan waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan hasil berdasarkan kemampuan komputer dan parameter – parameter numerik lainnya. Setelah tahap *processing* selesai dilanjutkan dengan tahapan *post- processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa kontur aliran, profil distribusi kecepatan, distribusi tekanan yang terbentuk pada aliran fluida disekitar tiga buah silinder yang tersusun secara *equilateral triangular*.

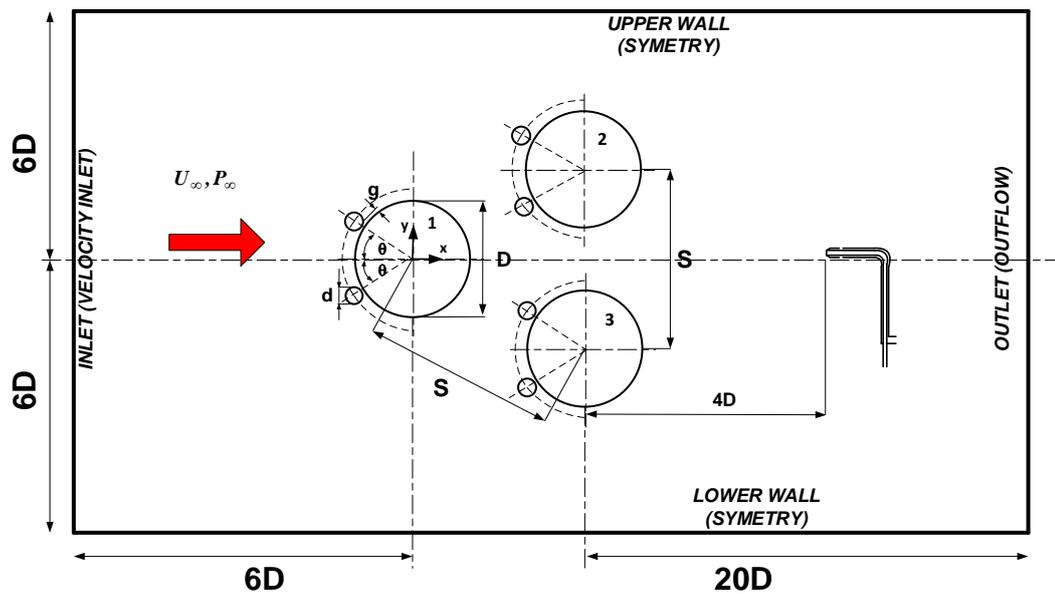
### 3.7 Pre Processing

Tahap *pre-processing* dilakukan dengan bantuan *software* CFD komersial GAMBIT, langkah – langkah yang akan dilakukan sebagai berikut:

1. Mendefinisikan daerah dan geometri yang diinginkan (*computational domain*) menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6
2. Membagi *domain* menjadi bagian – bagian kecil menggunakan GAMBIT 2.4.6.
3. Menentukan kondisi batas yang tepat tiap batas geometri atau *domain* dengan GAMBIT 2.4.6.
4. Di ekspor dalam bentuk file meshing (.msh) melalui GAMBIT 2.4.6.

#### 3.7.1 Domain simulasi

Analisis karakteristik aliran melalui tiga buah silinder tersusun secara *equilateral traingular* dilakukan dengan permodelan dua dimensi (2D). Domain simulasi dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut:

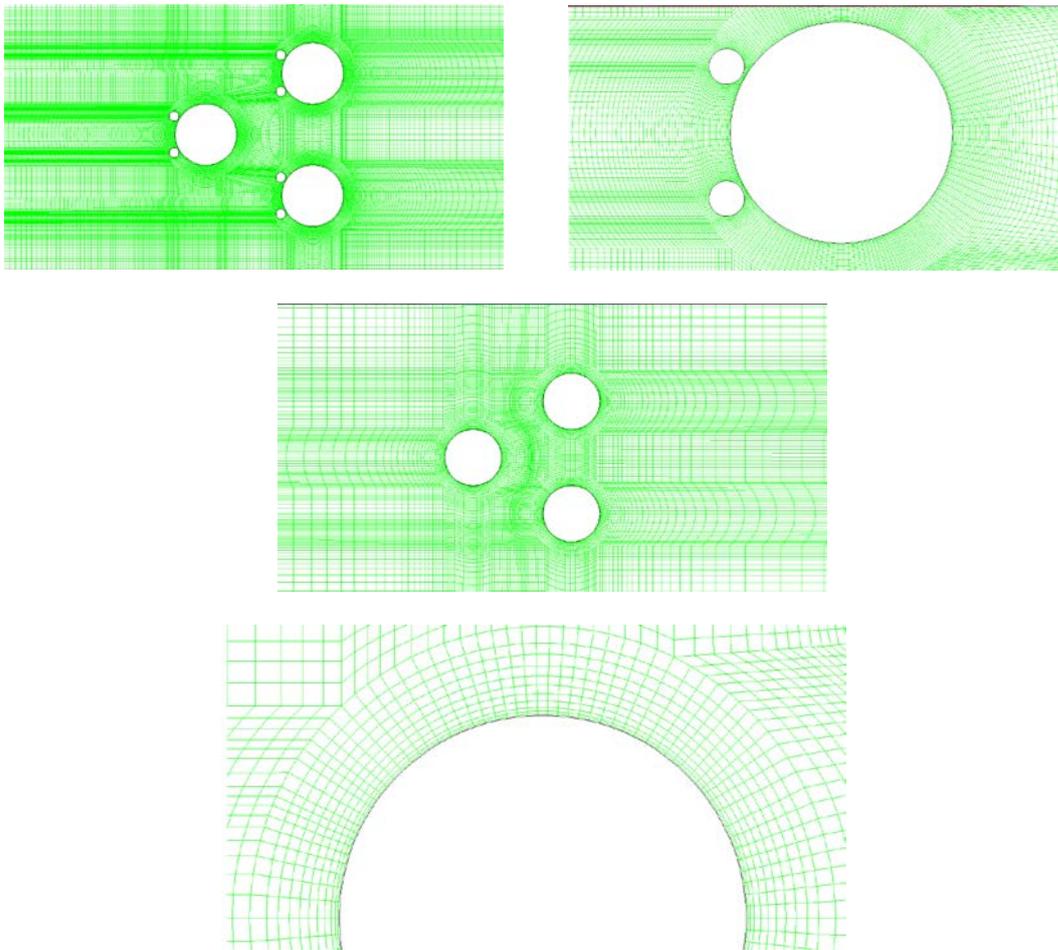


Gambar 3.3 Domain simulasi numerik beserta kondisi batas (boundary).

### 3.7.2 Meshing dan kondisi batas

Proses *meshing* (pembuatan *mesh* elemen hingga) merupakan pembagian domain menjadi bagian – bagian kecil, sehingga parameter – parameter yang diperlukan dan kondisi batasan dapat dimasukkan kedalam bagian (elemen) kecil tersebut. Proses pembuatan *meshing* dimulai dari geometri terendah. Diawali dari titik, dilanjutkan menjadi garis dan yang terakhir berupa bidang (*face*). Gambar 3.4 dibawah ini merupakan domain yang sudah di *mesh* menggunakan *mesh* jenis quadrilateral map.

Kondisi batas yang digunakan pada penelitian ini antara lain *inlet* : *velocity inlet*; *outlet* : *outflow*, *silinder* : *wall*, *inlet disturbance body* : *wall*. Aliran yang digunakan disini berupa aliran inkompresibel. *Velocity inlet* untuk mendefinisikan kecepatan aliran yang masuk. Kondisi batas *outflow* dipilih karena data aliran saat kondisi keluar tidak diketahui. *Wall* didefinisikan sebagai dinding dari aliran fluida yang terdapat didalam saluran untuk membatasi antara dinding silinder benda uji dan fluida yang melintasi.



Gambar 3.4 Bentuk *Meshing quadrilateral map*

### 3.7.3 *Grid independency test*

Pengambilan grid independensi bertujuan untuk mengecek mesh sehingga didapatkan jumlah *mesh* yang cenderung konstan. Pada penelitian ini *mesh* dibagi ke dalam lima jenis *mesh* yang diberi nama *mesh* A, B, C dan D. Setelah itu nilai  $C_d$  numerik kelima *mesh* ini dibandingkan dengan nilai  $C_d$  dari jurnal acuan dan dicari selisih nilai terkecil (*error* terkecil). Nilai  $C_d$  dari grid independensi ini akan ditunjukkan pada tabel 3.3 dibawah ini:

Tabel 3.3 Grid independensi tiga buah silinder sirkular tersusun *equilateral triangular*  $D = 25 \text{ mm}$  pada  $Re = 2,2 \times 10^4$ .

No	Mesh	Jumlah Node	CD Silinder 1	CD Silinder 2	CD Silinder 3	Y+
1.	Gu & Sun	-	0.89	0.9	1	
2.	A	22686	1.023 (14.9%)	1.072 (19.1%)	1.232 (23.2%)	1,2
3.	B	25430	0.749(15.8%)	1.245 (38.3%)	1.119 (11.9%)	0.84
4.	C	28174	0.881(1,01%)	1.14 (26.67%)	1.106 (10.6%)	0.52
5.	D	28517	0.875 (1,69%)	1.16 (22,4%)	1.064 (6,4%)	0.48

Dari tabel 3.3 diatas mesh C memiliki nilai prosentase *error* terkecil. Pemilihan *mesh* C juga berdasar pertimbangan waktu dan memori yang digunakan.

### 3.8 Processing

*Processing* merupakan proses lanjutan dari *pre processing* dan dilakukan menggunakan *software* CFD komersial FLUENT 6.3.26. Proses ini terdiri dari beberapa tahapan antara lain:

#### 3.8.1 Mengimpor dan mengecek mesh

*File meshing* dalam bentuk (.msh) yang telah dibuat di GAMBIT di baca di dalam FLUENT untuk dapat melakukan proses analisis. Pembacaan *mesh* model dilakukan dengan cara klik toolbar *File >> Read >> Case*. Setelah proses pembacaan *mesh* berhasil dan tidak ada yang *error* dilanjutkan dengan pengecekan *mesh* untuk meminimalkan kesalahan yang fatal pada *mesh*. Proses pengecekan *mesh* dilakukan dengan cara klik toolbar *Grid >> Check*, lalu lihat pada konsol FLUENT, apabila terlihat pesan *error* atau nilai minimum volume negatif, maka hal yang harus dilakukan adalah memperbaiki kembali *mesh* tersebut di GAMBIT.

### 3.8.2 Konversi satuan

Mengubah satuan disesuaikan dengan geometri yang dibuat pada GAMBIT, karena semua dimensi geometri dianggap dalam satuan meter dalam FLUENT. Proses konversi satuan ini dilakukan dengan klik toolbar *Grid >> Scale*.

### 3.8.3 Mendefinisikan model

➤ *Solver*

Pada tahap ini yang digunakan adalah *pressure based* dengan kondisi *unsteady (2<sup>nd</sup> order – implicit)*

➤ *Energy*

*Energy* di non aktifkan, karena pada penelitian ini tidak menganalisis perpindahan panas yang terjadi.

➤ *Viscous*

Model *viscous* yang digunakan disini adalah *k-omega shear stress transport (SST)* karena lebih stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding maupun aliran yang jauh dari dinding.

### 3.8.4 Materials

Material yang digunakan disini berupa fluida udara dengan yang memiliki nilai *density* = 1,178 kg/m<sup>3</sup> dan *absolute viscosity* = 1,84458 X 10<sup>-5</sup> kg/ m-s.

### 3.8.5 Operating conditions

*Operating conditions* penelitian ini terjadi pada tekanan 101325 pascal. *Operating conditions* disini digunakan untuk menentukan kondisi domain dan lingkungan disekitar domain yang dianalisis.

### 3.8.6 Boundary conditions

*Boundary conditions* digunakan untuk menentukan parameter – parameter yang diperlukan untuk di masukkan dalam kondisi aliran, seperti mengatur kecepatan masuk, intensitas turbulensi dan *turbulent lenght scale*.

### 3.8.7 Solve >> Controls >> Solutions

➤ *Faktor Under – Relaxation*

Faktor *under relaxation* diatur pada kondisi *default* dari FLUENT. Faktor ini berfungsi untuk menstabilkan iterasi.

➤ Diskritisasi (Metode Interpolasi)

Metode diskritisasi yang dipilih adalah *Second Order Upwind* pada tekanan standar.

➤ *Pressure Velocity Coupling*

*Pressure velocity coupling* dipilih SIMPLEC. Pada kasus sederhana, *pressure velocity coupling* ini dapat mempercepat konvergensi.

### **3.8.8 Solve >> Initialize >> Initialize**

Sebelum memulai perhitungan pada simulasi diperlukan tebakan awal (inisialisasi). Pada simulasi numerik ini inisialisasi perhitungan dimulai dari batas *inlet* berupa *velocity inlet*.

### **3.8.9 Solve >> Monitor >> Residual**

Untuk menentukan kriteria konvergensi yang diinginkan. Yang dimaksud kriteria konvergensi disini adalah kesalahan / perbedaan antara tebakan awal dan hasil akhir dari iterasi yang dilakukan oleh FLUENT pada masing – masing persamaan yang digunakan pada kasus yang dianalisis. Pada penelitian ini kriteria konvergensi diatur sesuai *default* dari FLUENT yaitu sebesar 0,001.

### **3.8.10 Solve >> Iterate**

Panel ini digunakan untuk menentukan jumlah iterasi yang akan dilakukan. Pada panel ini *time step size* yang digunakan sebesar 0,000294 s, *number of time steps* = 600, jumlah iterasi maksimal per *time step* = 25 *time stepping method* yang digunakan *fixed* sesuai default FLUENT.

## **3.9 Post processing**

*Post processing* merupakan proses akhir dari simulasi numerik yang menampilkan hasil serta analisis dari hasil yang telah diperoleh dalam dua bentuk data, yaitu data kualitatif dan data kuantitatif.

1. Data kualitatif yang didapat dari analisa data antara lain :
  - Visualisasi aliran (kontur kecepatan, kontur tekanan, dan *velocity pathlines*)
2. Data kuantitatif yang didapat antara lain :
  - Koefisien tekanan (Cp)
  - Koefisien *drag* (Cd)

- Koefisien *lift* (Cl)

Data – data kuantitatif diatas kemudian akan diolah menggunakan *software* Microsoft Excel 2010 sehingga didapat hasil keluaran berupa grafik.

- Perhitungan *Strouhal number*

*Strouhal number* merupakan salah satu komponen penting pada kasus analisis aliran secara *unsteady*. *Strouhal number* didapat dari perhitungan koefisien *lift* (Cl). Perhitungan *Strouhal number* adalah sebagai berikut:

$$\text{Periode} = \frac{T_n - T_1}{\text{shedding cycle}} \quad (3.5)$$

$$f = \frac{1}{\text{Periode}} \quad (3.6)$$

$$st = \frac{f \times D}{u} \quad (3.7)$$

Keterangan :

$T_n$  = Waktu selesai pengambilan data pada grafik koefisien *lift* (detik)

$T_1$  = Waktu mulai pengambilan data pada grafik koefisien *lift* (detik)

*Shedding cycle* = Siklus pelepasan berdasarkan jumlah lembah dan gunung (siklus) pada garfik Cl pada waktu tertentu yang diambil tersebut

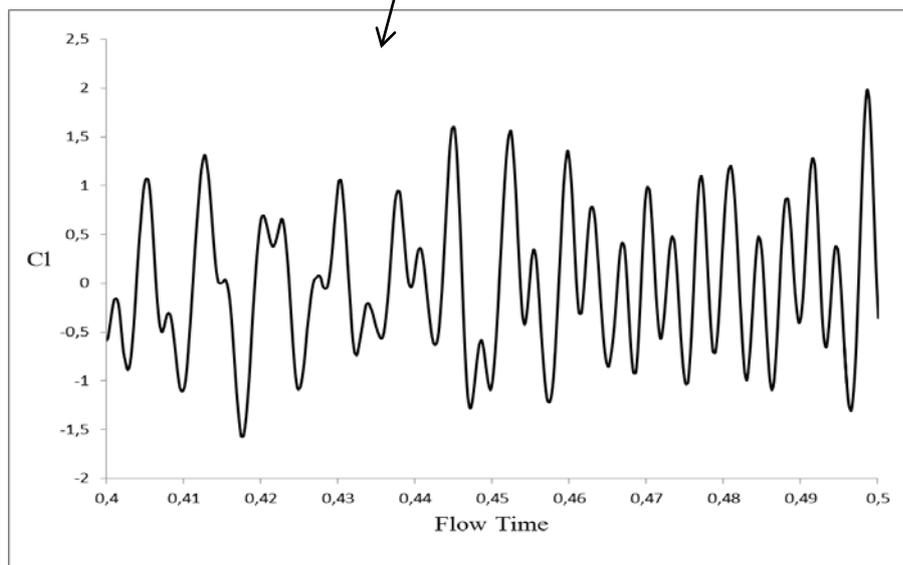
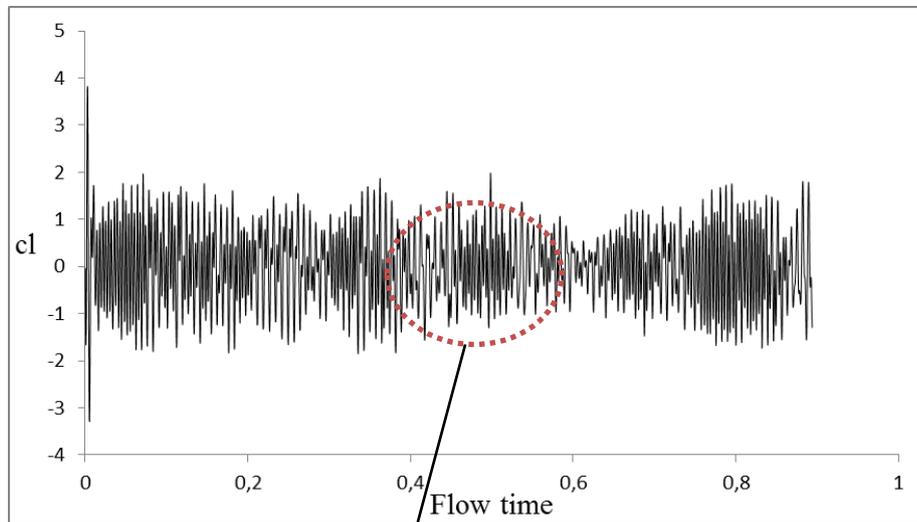
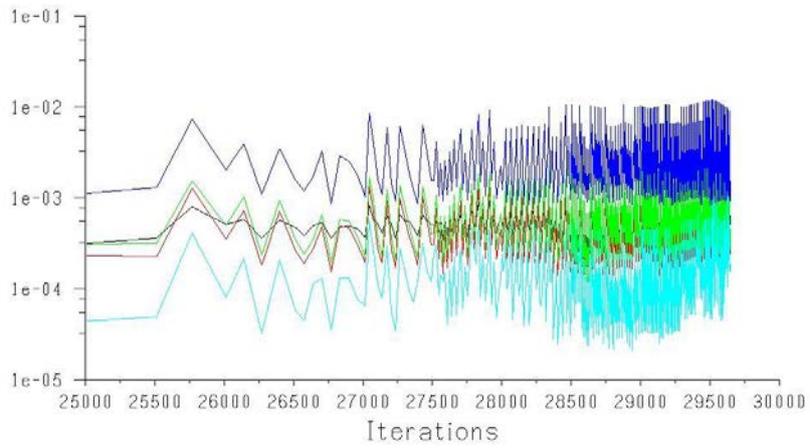
$f$  = Frekuensi

$St$  = *Strouhal number*

$D$  = Diameter silinder utama (m)

$U$  = Kecepatan *freestream* (m/s)

Contoh perhitungan *Strouhal number* pada silinder tunggal adalah sebagai berikut :



Gambar 3.5 *Lift Convergence History*

Dari grafik Cl diatas dapat diuraikan dalam perhitungan sebagai berikut:

$$Periode = \frac{(0,50009 - 0,400134)\text{detik}}{27,5 \text{ siklus}}$$

$$= 0,00363 \text{ detik/siklus}$$

$$f = \frac{1 \text{ siklus}}{0,00363 \text{ detik}}$$

$$= 275,11 \text{ Hz}$$

$$St = \frac{f \times D}{V}$$

$$St = \frac{275,11 \text{ Hz} \times 0,025 \text{ m}}{17 \text{ m/s}} = 0,40457$$

Keterangan : Diameter silinder tunggal = 25 mm.

➤ *Number of time step*

Pengambilan *number of time step* dilakukan pada berbagai nilai *time step* dan dilihat pengaruhnya terhadap nilai Cl sehingga nilai *Strouhal number* mendekati konvergen.

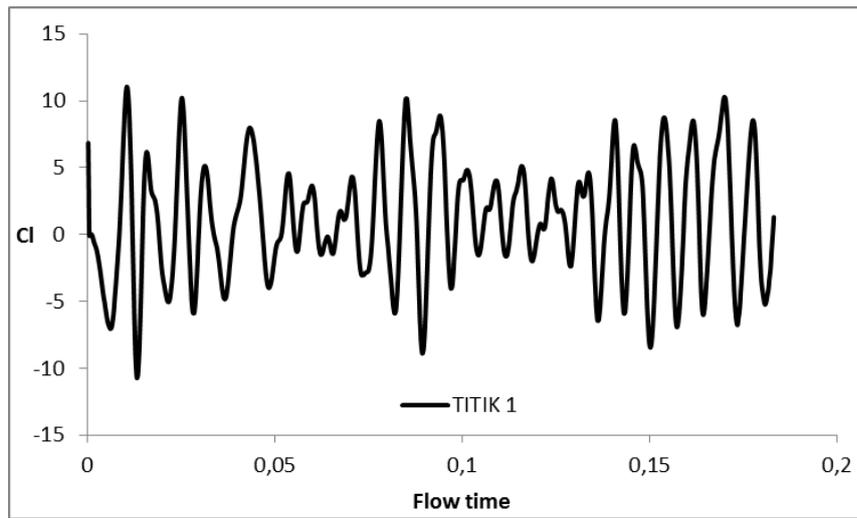
Tabel 3.4 *number of time step* pada S/D = 2

s/d		Nilai St pada number of time step		y+
		300	600	
2	silinder 1	0,408660201	0,408660196	0,5338394
	silinder 2	0,200243498	0,204330098	0,64973855
	silinder 3	0,179810488	0,196156894	0,63525093

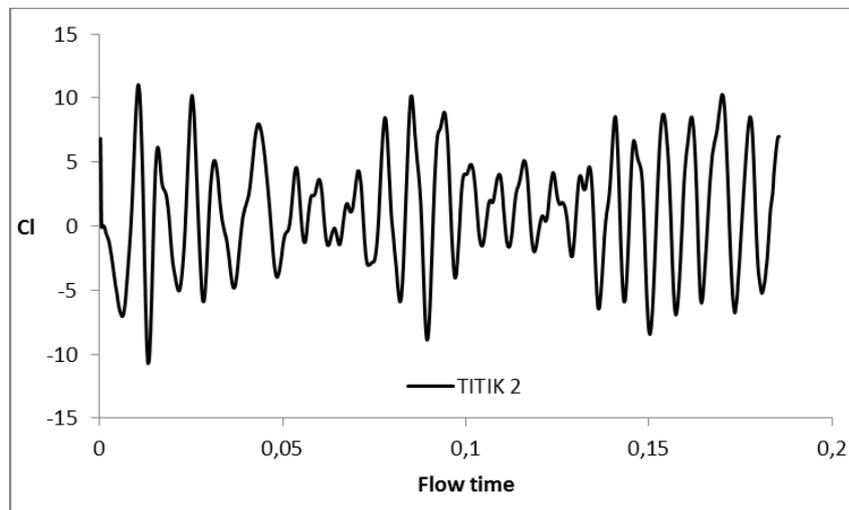
Pada penelitian ini *number of time step* yang digunakan sebesar 600.

➤ Cara pengambilan nilai *average* data numerik

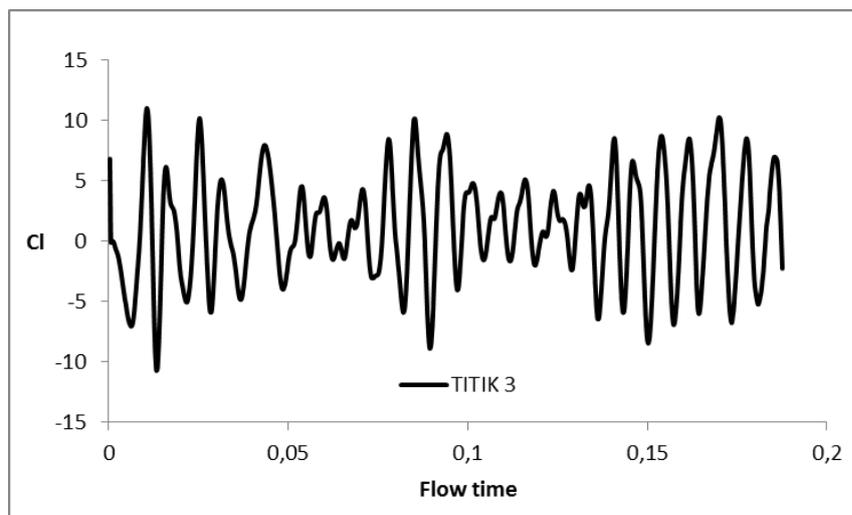
Cara pengambilan nilai *average* dari data numerik dilakukan sebagai berikut:



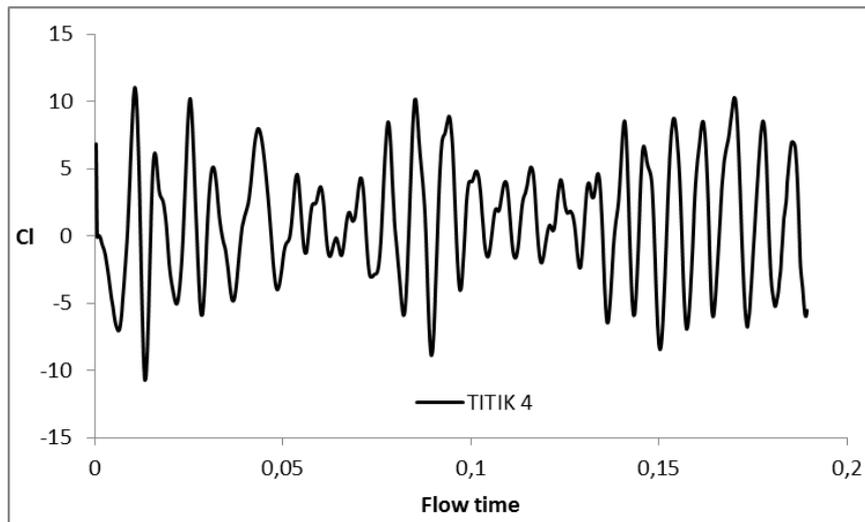
(a)



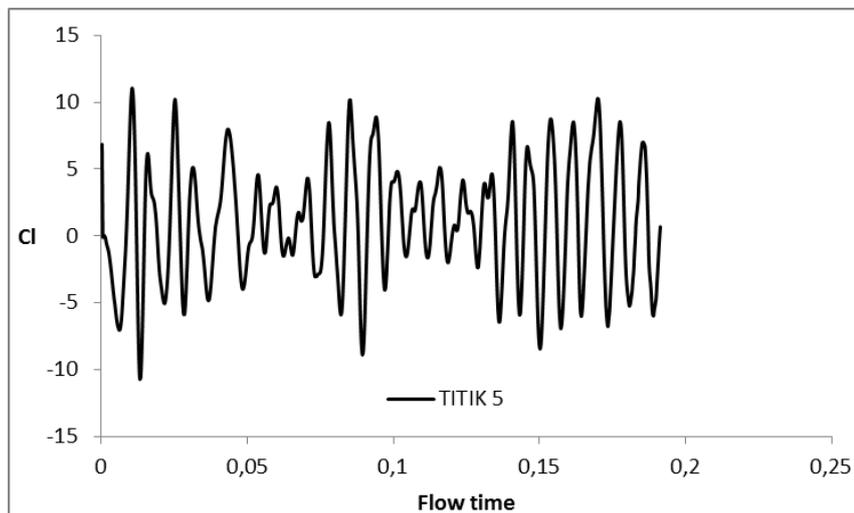
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 3.6 Grafik Cl posisi pengambilan data *average* dalam satu periode

Dalam proses pengolahan data *instantaneous time* menjadi *average* dilakukan dengan metode penghentian iterasi pada lima titik yang terletak dalam satu periode fluktuasi koefisien lift seperti ditunjukkan pada gambar 3.6 diatas. Dari penghentian masing – masing titik tersebut didapatkan data berupa koefisien tekanan ( $C_p$ ) serta profil kecepatan.

Contoh:

Titik 1 =  $C_{p1}$  ; Titik 2 =  $C_{p2}$  ; Titik 3 =  $C_{p3}$  ; Titik 4 =  $C_{p4}$  dan Titik 5 =  $C_{p5}$

Kelima nilai koefisien tekanan diatas merupakan nilai *instantaneous time*, sehingga untuk mendapatkan nilai *average* kelima data diatas dirata – ratakan dengan formula sebagai berikut:

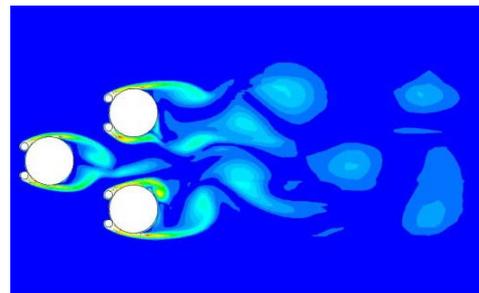
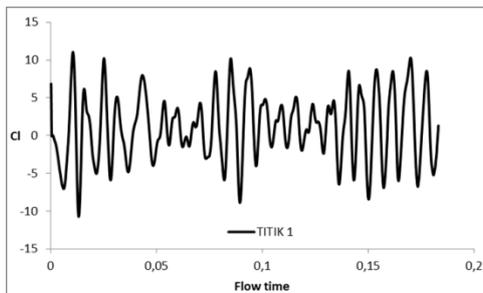
$$\overline{C_p} = \frac{C_{P1} + C_{P2} + C_{P3} + C_{P4} + C_{P5}}{5}$$

Demikian pula dengan cara merata – ratakan nilai profil kecepatan.

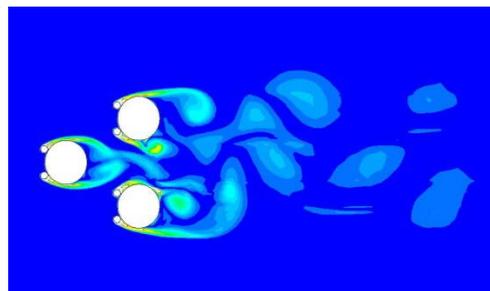
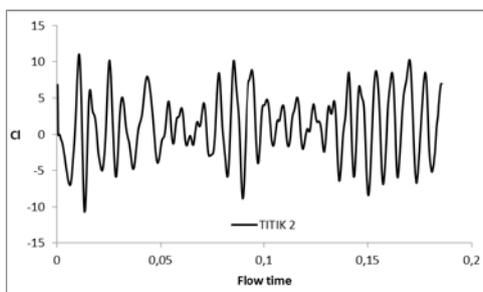
➤ *Bistable flow*

Visualisasi terjadinya *bistable flow* dijelaskan berupa kontur *vorticity* yang menunjukkan bentuk *wake* di belakang silinder terutama silinder 2 dan 3 yang tersusun *side by side*.

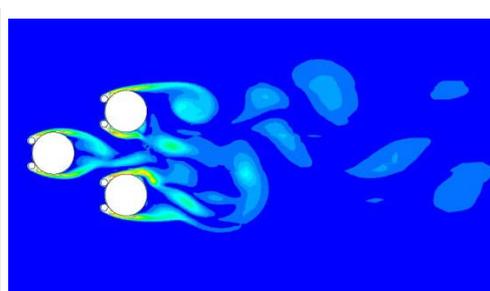
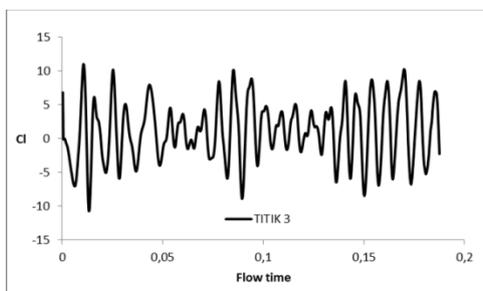
(a) Titik 1



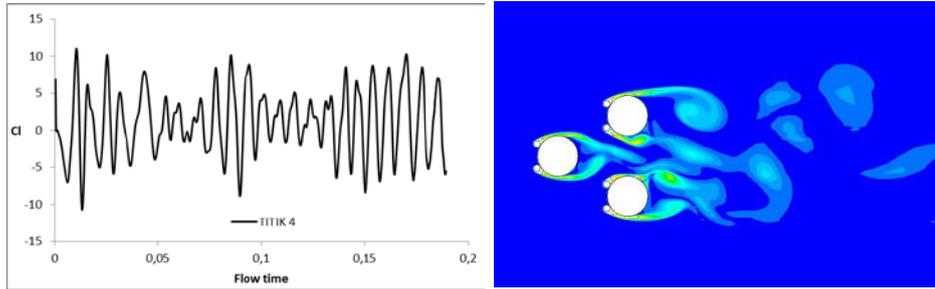
(b) Titik 2



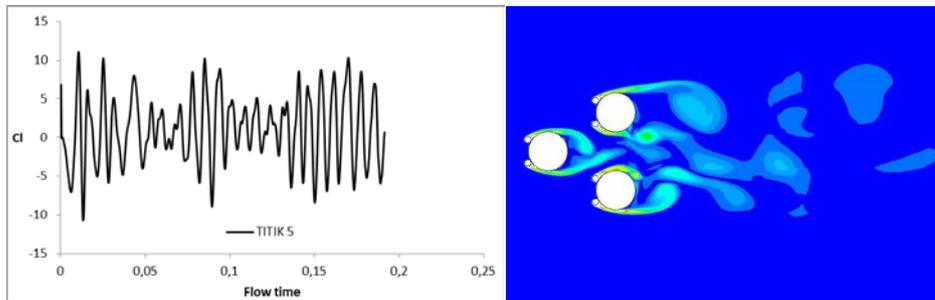
(c) Titik 3



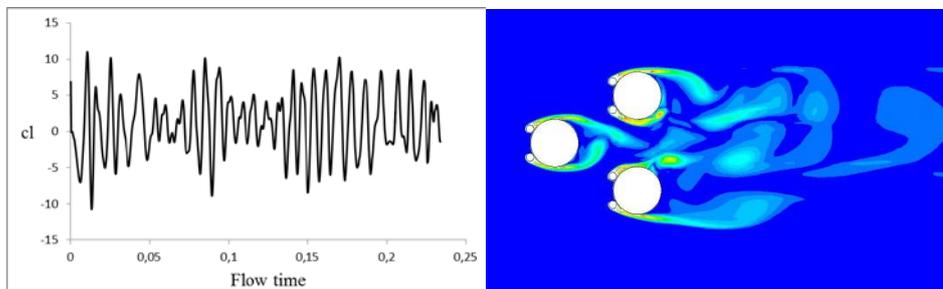
(d) Titik 4



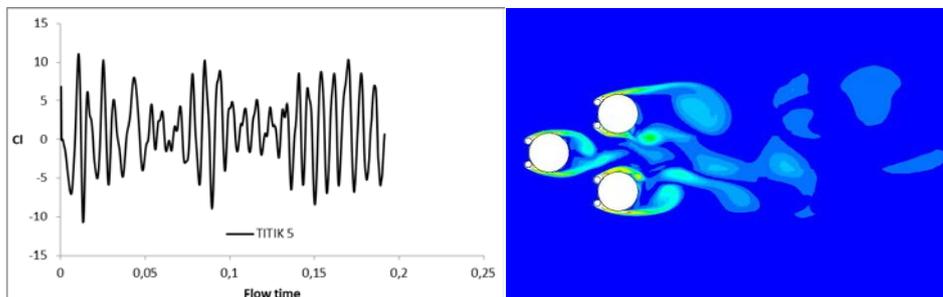
(e) Titik 5



Gambar 3.7 Grafik fluktuasi koefisien lift beserta visualisasi aliran yang terbentuk



(a)



(b)

Gambar 3.8 Visualisasi *bistable flow* (a) *narrow wake* pada silinder 2  
(b) *narrow wake* pada silinder 3

Gambar 3.8 ini merupakan penggambaran *bistable flow* yang terjadi pada silinder 2 dan silinder 3 pada susunan tiga buah silinder tersusun *equilateral triangular* dengan penjelasan nilai *strouhal* pada tabel 3.6 di bawah ini.

Tabel 3.5 Nilai *Strouhal number* pada silinder 2 dan 3

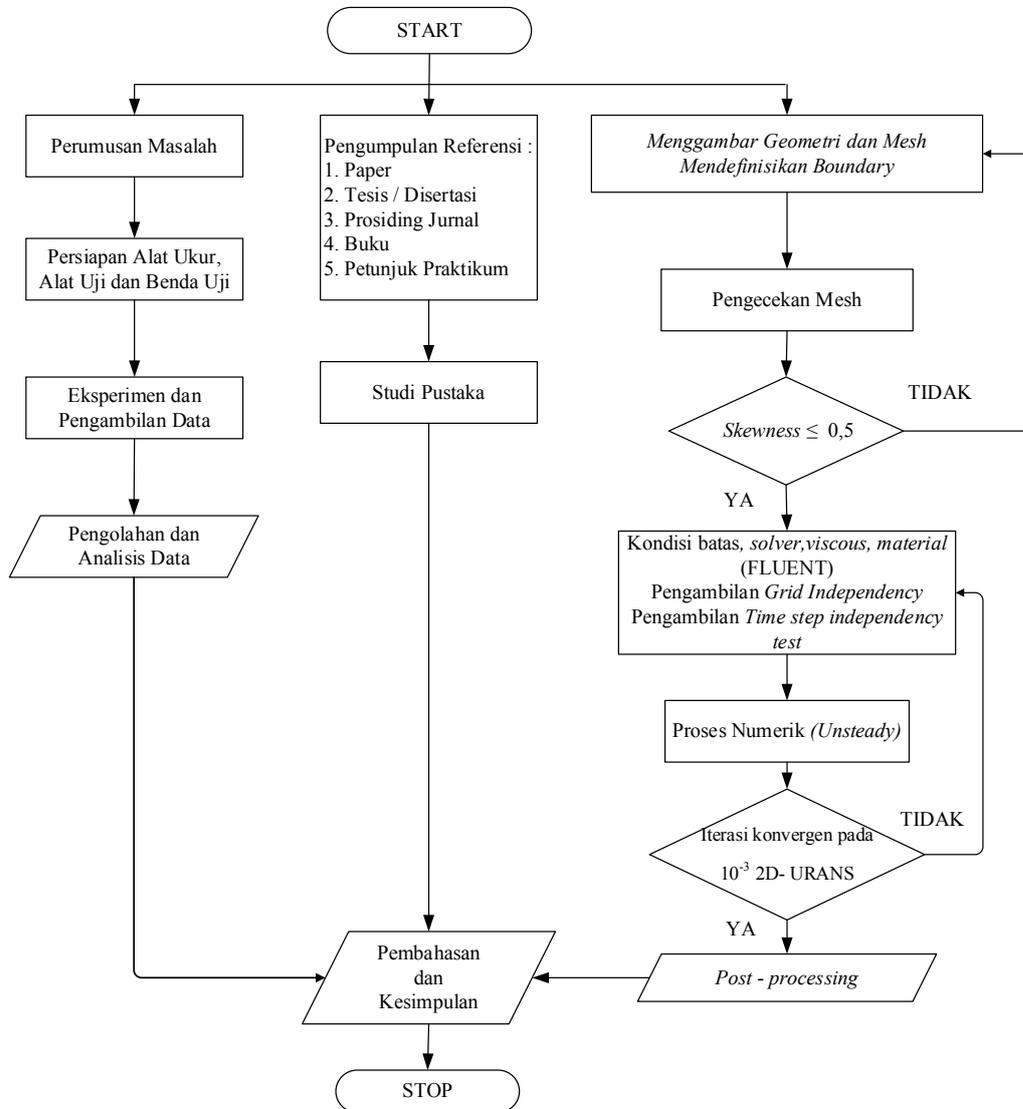
S/D		St	
		silinder 2	silinder 3
2	titik 1	0,18094	0,18094
	titik 2	0,18261	0,17864
	titik 3	0,18453	0,18061
	titik 4	0,18281	0,17892
	titik 5	0,18854	0,18084

Tabel 3.6 Nilai *Strouhal number* dari *bistable flow*

S/D	<i>bistable flow</i>	St	
		silinder 2	silinder 3
2	a	0,16359	0,17617
	b	0,18854	0,18084

Tabel 3.5 diatas berkorelasi dengan visualisasi aliran pada gambar 3.7. Berdasarkan korelasi tersebut dapat diketahui bahwa *wake* yang besar memiliki nilai *Strouhal* yang lebih tinggi dibandingkan *wake* yang kecil, hal ini disebabkan nilai koefisien drag yang tinggi terjadi pada *wake* pendek dan diperjelas melalui gambar fenomena *bistable flow* pada gambar 3.8 dan tabel 3.6. hal ini sesuai dengan hasil penelitian Tatsuno et al (1998).

**3.10 Skema penelitian yang akan dilakukan tercantum dalam gambar 3.6 berikut:**



Gambar 3.9 Flow Chart Penelitian

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Ada beberapa hal yang akan dijabarkan secara detail berdasarkan kajian eksperimen dan simulasi numerik pada penelitian ini, meliputi hasil data kualitatif (simulasi numerik) maupun data kuantitatif (eksperimen dan simulasi numerik). Data yang diperoleh dari eksperimen meliputi data pengukuran tekanan statis dan stagnasi dari *wind tunnel*, serta tekanan statis pada kontur permukaan silinder utama yang tersusun secara *equilateral triangular* dengan variasi S/D 1,5; 2 dan 2,5. Adapun cara – cara pengambilan data diatas telah dijelaskan pada bagian metode penelitian di bab sebelumnya. Dari data hasil pengukuran tersebut kemudian diolah menjadi data kuantitatif berupa distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ), nilai koefisien *pressure drag* ( $CD_p$ ) yang diolah menggunakan integrasi numerik dari persamaan (3.1), (3.2) dan (3.4) serta profil kecepatan ( $u/U$ ) di daerah *wake*. Dari hasil simulasi numerik yang dilakukan juga ditampilkan hasil data *post processing* baik berupa data kuantitatif yang diolah menjadi koefisien distribusi tekanan ( $C_p$ ) pada kontur permukaan benda, nilai koefisien drag ( $CD_p$ ), nilai angka *Strouhal* , profil kecepatan ( $u/U$ ) di daerah *wake* juga data kualitatif berupa visualisasi aliran yang meliputi *velocity vector* dan *velocity pathlines* yang kemudian akan dijelaskan pada bagian ini.

Data penelitian baik secara numerik atau eksperimen dilakukan pada bilangan *Reynolds*  $Re_D = 2,2 \times 10^4$  dengan diameter silinder sirkular utama sebesar 25 mm, dan diameter silinder pengganggu sebesar 4 mm. Penelitian ini terfokus pada fenomena aliran yang terjadi pada silinder utama ketika diberikan dua buah silinder pengganggu pada bagian *upstream* dari ketiga buah silinder utama yang disusun secara *equilateral triangular*. Data yang didapat dari hasil numerik dilakukan menggunakan 2D *unsteady model turbulence viscous k- $\omega$  Shear Stress Transport*.

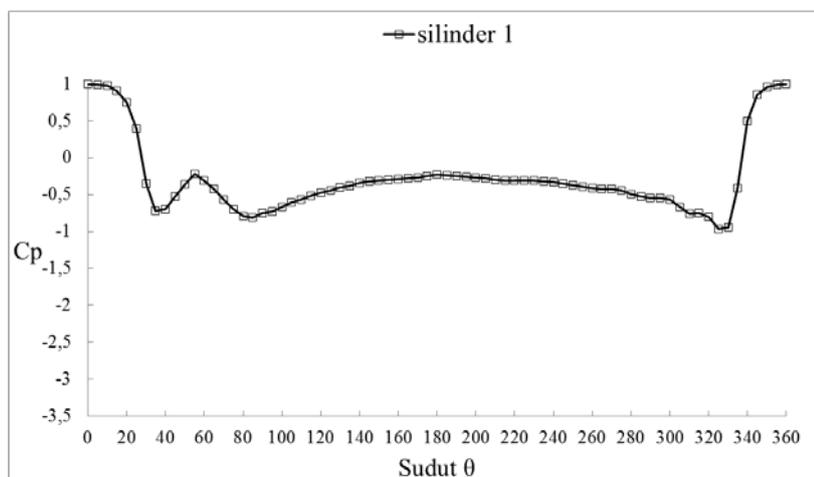
## 4.1 Analisa Karakteristik Aliran Melalui Tiga Buah Silinder Berpengganggu

### Tersusun *Equilateral Triangular* Pada Variasi Jarak *Stagger* ( $S/D = 1,5$ )

#### 4.1.1 Grafik Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) dan *Velocity Pathlines* pada $S/D = 1,5$

Hasil korelasi grafik koefisien tekanan ( $C_p$ ) terhadap visualisasi aliran yang terbentuk di sekitar silinder pada masing – masing silinder utama berdasarkan hasil numerik dan eksperimen akan dijelaskan sebagai berikut,

#### Silinder 1

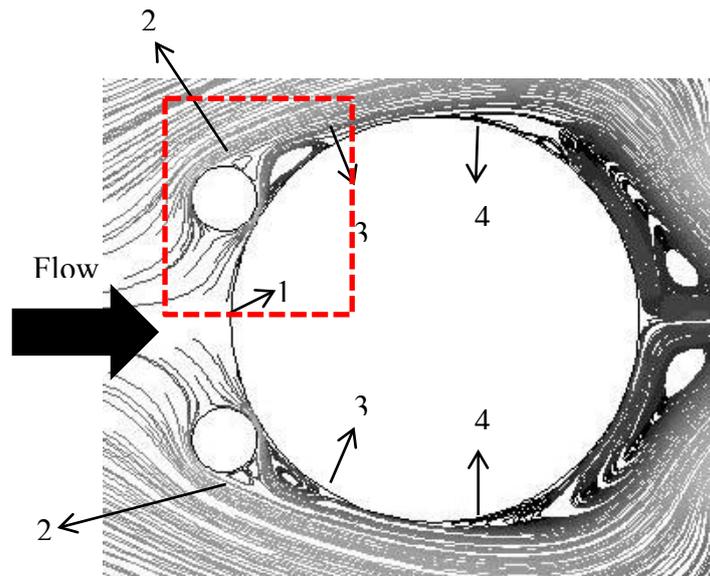


(a)

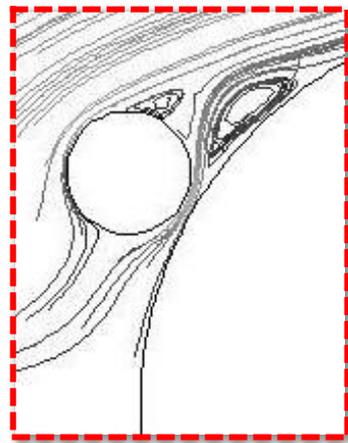


(b)

Gambar 4.1. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 1  
(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 1,5$



(a)



(b)

Gambar 4.2. Visualisasi (a) *velocity pathlines* silinder 1 pada  $S/D = 1,5$  ;  
(b) *bubble separation* di dekat gap

Dari gambar 4.1 di atas terlihat perbedaan bentuk grafik antara hasil eksperimen dan numerik. Pada hasil eksperimen hanya terbentuk satu buah puncak di daerah *upper*, sedangkan di daerah *lower* tidak terbentuk puncak. Grafik hasil numerik menunjukkan hasil yang sedikit berbeda, dimana grafik koefisien tekanan hasil numerik lebih simetris pada sisi *lower* dan *upper*nya dan pada daerah *base pressure*nya terbentuk satu buah puncak yang mengindikasikan terjadinya perlambatan. Perbedaan bentuk grafik hasil distribusi koefisien tekanan antara pengambilan data secara eksperimen maupun numerik disebabkan karena pengaruh *blockage* pada eksperimen lebih dominan dibandingkan hasil numerik.

Selain itu beberapa hal juga dapat berpengaruh terhadap perbedaan hasil antara data eksperimen dan numerik ini, diantaranya data numerik diambil dengan turbulence model, kondisi awal dan *boundary condition* yang berbeda dengan kondisi aktual pengambilan data eksperimen. Perbedaan dimensi dalam penentuan domain juga berpengaruh terhadap hasil, seperti diketahui secara numerik dilakukan pendekatan dua dimensi, sedangkan secara eksperimen tiga dimensi.

Perbedaan jumlah *peak* yang terbentuk antara hasil eksperimen dan numerik juga disebabkan karena adanya interaksi antar silinder berpengganggu dalam kelompok silinder tersebut yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran. Seperti diketahui bahwa pada silinder berkelompok yang tersusun secara *equilateral triangular* pada *small spacing ratio* ( $S/D = 1,5$ ) pengaruh antar silinder sangat kuat dan kompleks seperti dijelaskan pada penelitian Gu dan Sun (2000) sehingga dimungkinkan ketika diambil secara lebih detail melalui bantuan numerik bisa terlihat lebih jelas fenomena interaksi antar silinder yang terjadi. Pengambilan data secara eksperimen maupun numerik dilakukan secara *time average*. Data hasil eksperimen dilakukan setiap satu menit, sedangkan hasil numerik diambil hasil rata – rata dari lima buah data yang diambil pada detik tertentu (*instantaneous time*).

Akselerasi maksimum yang terjadi antara hasil numerik dan eksperimen sama yaitu pada nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) =  $\pm (-1)$ , begitu juga dengan letak titik stagnasi antara eksperimen dan numerik sama pada nilai  $C_p = 1$  yang terjadi pada posisi sudut  $0^0$  seperti ditunjukkan pada visualisasi gambar 4.2 titik 1. Berdasar gambar 4.1(a) dapat terlihat jelas bahwa aliran mengalami percepatan pada saat nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) turun dari  $C_p = 1$  menjadi  $C_p = -0,7$  dimana percepatan aliran ini terjadi pada sudut  $\theta = 0^0 - 35^0$  pada bagian *upper* sedangkan pada bagian *lower* terjadi pada sudut  $\theta = 325^0 - 360^0$  dengan nilai  $C_p = 1$  menjadi  $C_p = -0,967$ . Untuk nilai akselerasi maksimum terjadi pada saat posisi nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) terendah. Akselerasi maksimum pada sisi *upper* terjadi pada sudut  $\theta = \pm 35^0$ , sedangkan pada *lower side* akselerasi maksimum terjadi pada sudut  $\theta = \pm 325^0$ .

Setelah mengalami akselerasi, aliran fluida mengalami perlambatan karena aliran melawan *adverse pressure gradient* dan gesekan terhadap permukaan silinder pengganggu, ditandai dengan naiknya nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ). Perlambatan terjadi pada posisi sudut  $\theta = 40^\circ - 60^\circ$  di sisi *upper side*, sedangkan pada *lower side* terjadi pada sudut  $\theta = 300^\circ - 320^\circ$ , perlambatan ini disebabkan karena adanya pengaruh *bubble separation* yang terbentuk. Pada *upper side* setelah mengalami perlambatan, pada sudut  $\theta = \pm 60^\circ$ , aliran mengalami percepatan. Adanya fenomena percepatan pada aliran fluida ini disebabkan karena terbentuknya *bubble* pada *gap* antara silinder pengganggu dan bagian *upstream* dari silinder utama sehingga aliran fluida di daerah itu sudah turbulen yang menyebabkan nilai koefisien tekanan turun.

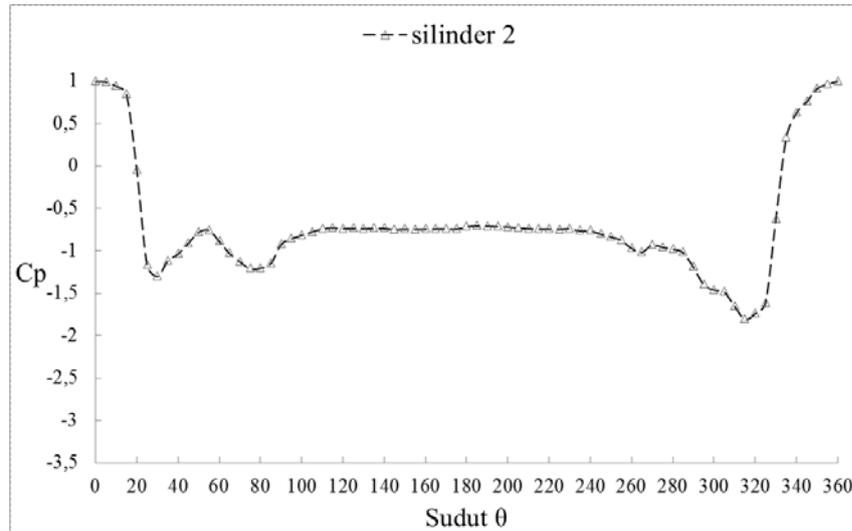
*Bubble separation* seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 (b) terbentuk di daerah ini disebabkan karena adanya pertemuan antara aliran yang melewati *gap* (antara silinder pengganggu dan silinder utama) dengan separasi aliran yang melewati *upstream* dari *inlet disturbance body*. Momentum fluida yang terseparasi dari *inlet disturbance body* lebih besar sehingga mampu mendorong aliran dari *gap* untuk *reattach* pada silinder utama hingga aliran berubah turbulen dan akhirnya terseparasi masif karena melawan *shear stress* dan *adverse pressure gradien*. Sebaliknya pada bagian *lower side* pada sudut  $\theta = \pm 300^\circ$  aliran sudah mengalami fase *reattachment* aliran ke silinder utama, hal ini dimungkinkan karena fenomena turbulensi dari *bubble separation* yang terbentuk pada bagian *lower* lebih besar dari pada *upper* sehingga perlambatan (rentang kenaikan koefisien tekanan) yang terjadi pada daerah *lower* lebih kecil.

Pengambilan data secara numerik menunjukkan hasil yang sedikit berbeda dari data eksperimen seperti tampak pada grafik koefisien tekanan ( $C_p$ ) gambar 4.1 (b) diatas. Dapat dilihat bahwa bagian *upper* dan *lower* tampak simetris. Dari hasil numerik ini titik stagnasi terjadi pada sudut  $\theta = 0^\circ$  dengan nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) = 1 seperti ditunjukkan pada titik 1 gambar 4.2. Pada bagian *upper*, aliran mengalami percepatan pada  $\theta = 0^\circ - 31^\circ$ . Sedangkan pada bagian *lower* percepatan aliran terjadi pada sudut  $\theta$  antara  $329^\circ - 360^\circ$ . Setelah mengalami percepatan, aliran mengalami perlambatan yang terjadi pada  $\theta = 32^\circ - 38^\circ$  (*upper*

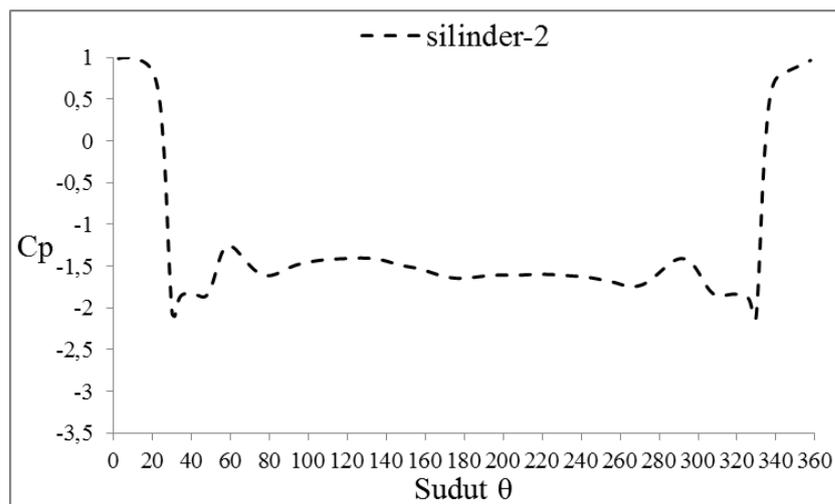
*side*) dan  $\theta = 321^{\circ} - 328^{\circ}$  (*lower side*) seperti ditunjukkan pada titik 2 gambar 4.2 yang menunjukkan adanya separasi aliran terhadap silinder pengganggu. Fenomena perlambatan ini terjadi karena terbentuknya *bubble separation* baik pada daerah *upper* maupun *lower*. Setelah terjadi perlambatan, aliran fluida mengalami percepatan pada  $\theta = 40^{\circ}-45^{\circ}$ (*upper*) dan  $314^{\circ}-320^{\circ}$  (*lower*) yang mengakibatkan terjadinya fenomena *reattachment* aliran pada silinder utama seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 titik 3. Pada  $\theta = 48^{\circ}-59^{\circ}$  aliran mengalami perlambatan karena adanya pengaruh *adverse pressure* dan friksi dengan permukaan silinder utama kemudian aliran mengalami percepatan kembali sepanjang kontur silinder pada  $\theta = 62^{\circ}-80^{\circ}$ . Pada  $\theta = 82^{\circ}-118^{\circ}$  aliran kembali mengalami perlambatan dalam menghadapi friksi dan *adverse pressure gradien* dari silinder utama sampai pada akhirnya aliran mengalami fase separasi terhadap silinder utama pada  $\theta = \pm 119^{\circ}$  (*upper*) dan  $\theta = \pm 275^{\circ}$  (*lower*) seperti tampak pada gambar 4.2 (titik 4).

Kemudian pada  $\theta = 122^{\circ} - 127^{\circ}$  *base pressure* mengalami akselerasi karena setelah mengalami separasi baik pengaruh friksi maupun *adverse pressure gradien* sudah berkurang. Untuk *base pressure* pada  $\theta = 135^{\circ} -155^{\circ}$  (*upper*) dan pada *lower*  $206^{\circ}-255^{\circ}$ , aliran mengalami percepatan karena melalui celah yang bersifat seperti *nossel* antara *wake* yang terbentuk dengan permukaan silinder utama seperti ditunjukkan pada gambar 4.2. aliran mengalami perlambatan kembali pada  $\theta = 156^{\circ}-178^{\circ}$  (*upper*) dan pada bagian *lower* ( $\theta = 200^{\circ}- 205^{\circ}$ ) karena melalui celah yang bersifat seperti *diffuser*.

## Silinder 2



(a)

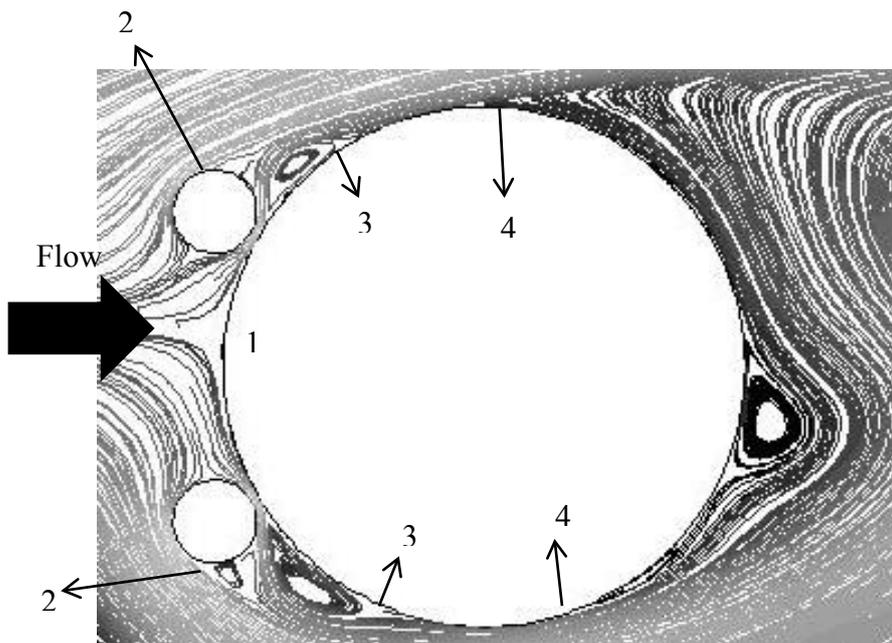


(b)

Gambar 4.3. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 2

(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 1,5$

Pada grafik koefisien tekanan ( $C_p$ ) dari silinder 2 ini seperti ditunjukkan gambar 4.3 (a) dan (b) memiliki nilai akselerasi yang lebih besar dibandingkan dengan silinder 1, hal ini disebabkan karena adanya pengaruh *wake* dari silinder 1 sehingga aliran fluida yang mengenai silinder 2 sudah dalam kondisi turbulen. Titik stagnasi yang terbentuk terletak pada sudut  $\theta = 0^0$  dengan nilai  $C_p = 1$  (silinder 2 eksperimen dan numerik).



Gambar 4.4. *Velocity pathlines* silinder 2 pada  $S/D = 1,5$

Pada gambar 4.3 (b) akselerasi maksimum di *upper side* terjadi pada nilai  $C_p = -2,104$  ( $\theta = \pm 31^\circ$ ), sedangkan di *lower side* pada nilai  $C_p = -2,122$  ( $\theta = \pm 330^\circ$ ), hal ini disebabkan karena pengaruh percepatan aliran saat melalui celah antara silinder 2 dan silinder 3 sehingga akselerasi maksimum terbesar terjadi pada bagian *lower*.

Untuk nilai akselerasi maksimum pada silinder 2 yang didapat berdasarkan data eksperimen seperti dijelaskan pada gambar 4.3 (a) akan memberikan nilai yang sedikit agak berbeda. Pada bagian *upper side* hasil eksperimen, *peak* terbentuk pada nilai  $C_p = -1,305$  ( $\theta = \pm 30^\circ$ ). *Peak* pada *lower side* terjadi pada saat nilai  $C_p = -1,807$  ( $\theta = \pm 315^\circ$ ).

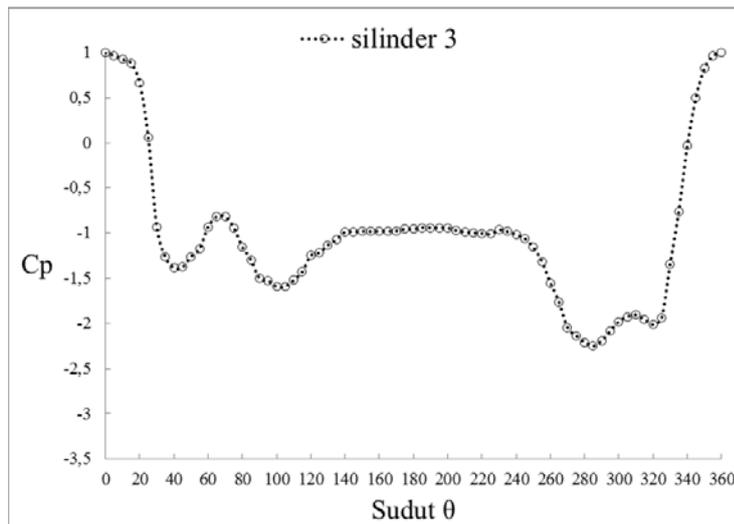
Perbedaan antara hasil eksperimen dan numerik dari silinder 2 seperti ditunjukkan pada grafik 4.3 (a) dan (b), yaitu pada grafik hasil eksperimen tidak menunjukkan secara detail terjadinya fenomena *bubble separation* yang terjadi pada aliran fluida, selain itu aliran tidak sempat mengalami separasi dari *inlet disturbance body* tetapi langsung *reattach* ke silinder utama, sedangkan pada grafik hasil numerik ditampilkan adanya fenomena dimana aliran fluida mengalami separasi terlebih dahulu sebelum *reattach* ke silinder utama yang ditunjukkan pada sudut  $\theta = \pm 32^\circ$  (*upper side*) dan  $\theta = \pm 328^\circ$  (*lower side*). Hal ini

bisa disebabkan karena pengaruh *blockage* yang lebih besar pada eksperimen sehingga antar silinder mengalami interaksi yang sedikit berbeda. Dalam hal ini hasil numerik membantu memperjelas hal – hal yang tidak tampak pada hasil eksperimen. *Base pressure* hasil eksperimen (gambar 4.3(a)) memiliki nilai  $C_p$  yang lebih stabil dibandingkan hasil numerik (gambar 4.3(b)) yang terlihat mengalami perlambatan dan percepatan pada *base pressure*. Percepatan pada *base pressure* (gambar 4.3(b)) terjadi pada  $\theta = 129^\circ - 178^\circ$  (*upper*) dan  $\theta = 202^\circ - 205^\circ$  (*lower*) yang disebabkan karena aliran fluida melalui sebuah celah yang berprinsip seperti nozel yang terbentuk karena adanya turbulensi aliran sehingga terjadi aliran balik di daerah *wake* (berdasar gambar 4.4). Setelah mengalami percepatan, *base pressure* mengalami perlambatan kembali. Perlambatan ini disebabkan karena aliran fluida terpengaruh oleh bentuk *wake* yang terbentuk di belakang silinder yang memiliki prinsip seperti difuser ( $\theta = 182^\circ - 199^\circ$ ).

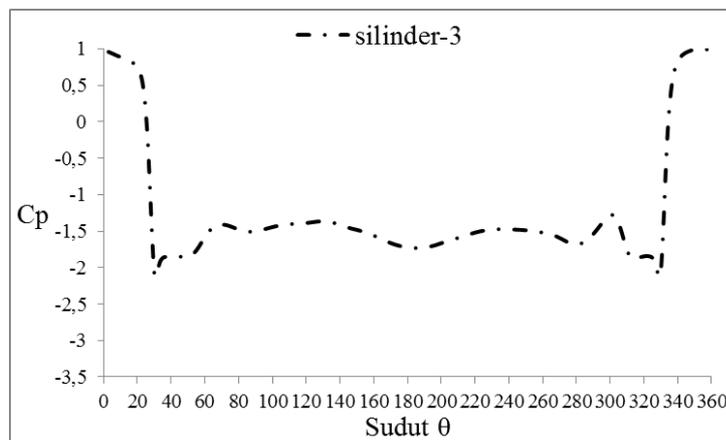
### **Silinder 3**

Nilai koefisien tekanan silinder 3 dari hasil eksperimen maupun numerik berdasarkan grafik pada gambar 4.5(a) dan (b) terlihat jelas bahwa aliran fluida pada silinder 3 memiliki akselerasi hampir sama besar dengan silinder 2. Berdasarkan hasil pengambilan data secara eksperimen dan numerik seperti ditunjukkan pada gambar 4.5 diatas terlihat jelas perbedaan hasil pengambilan data terutama pada daerah *base pressure* antara hasil eksperimen dan numerik. Dapat terlihat untuk *base pressure* hasil eksperimen lebih stabil sedangkan hasil numerik lebih fluktuatif dimana terjadi percepatan maupun perlambatan.

Bila dikorelasikan dengan visualisasi aliran seperti yang digambarkan dalam bentuk *velocity pathline* (gambar 4.6) terbukti bahwa pada *base pressure* terjadi fenomena percepatan dan perlambatan aliran jika dilihat dari *wake* yang terbentuk di belakang silinder 3 tersebut (data diambil pada detik tertentu).



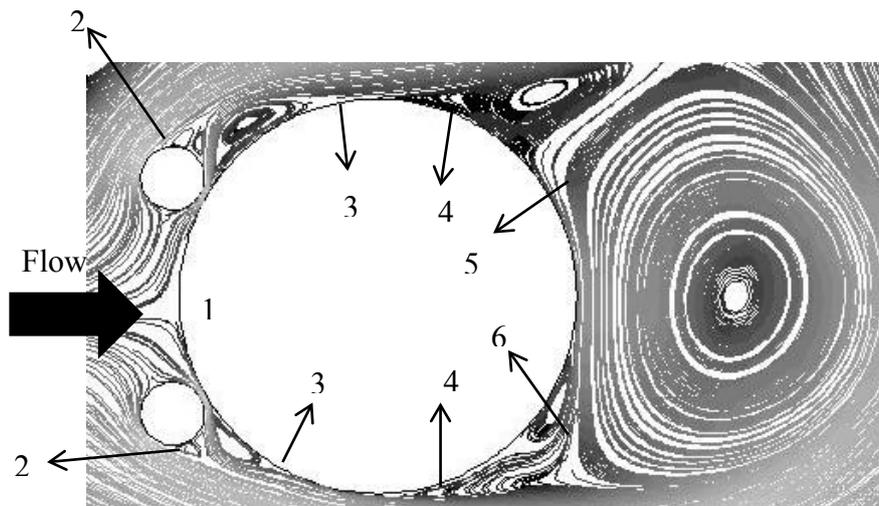
(a)



(b)

Gambar 4.5. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 3  
(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 1,5$

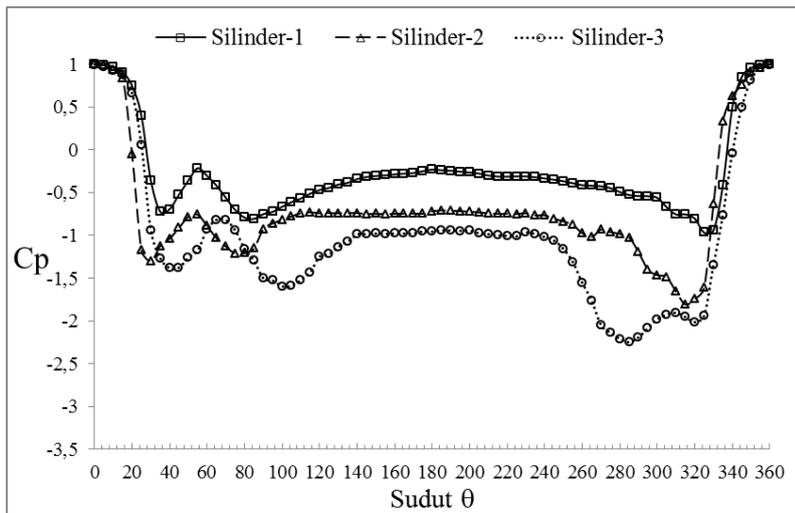
Seperti ditunjukkan pada titik 5 gambar 4.6 membuktikan adanya percepatan aliran karena melalui celah berbentuk nozel, sedangkan titik 6 menunjukkan bahwa aliran mengalami perlambatan karena melewati saluran melebar menyerupai difuser karena adanya pertemuan antara *shear layer* dari bagian *lower* dengan aliran balik yang terbentuk pada *wake*. Sedangkan data hasil eksperimen diambil pada *time average* (tiap satu menit) sehingga kemungkinan *wake* yang terbentuk pada saat pengambilan data eksperimen tidak sama persis dengan bentuk *wake* data numerik. *Wake* yang didapat sedikit berbeda disebabkan karena setiap detik (*instantaneous*) bentuk *wake* dari aliran berubah – ubah.



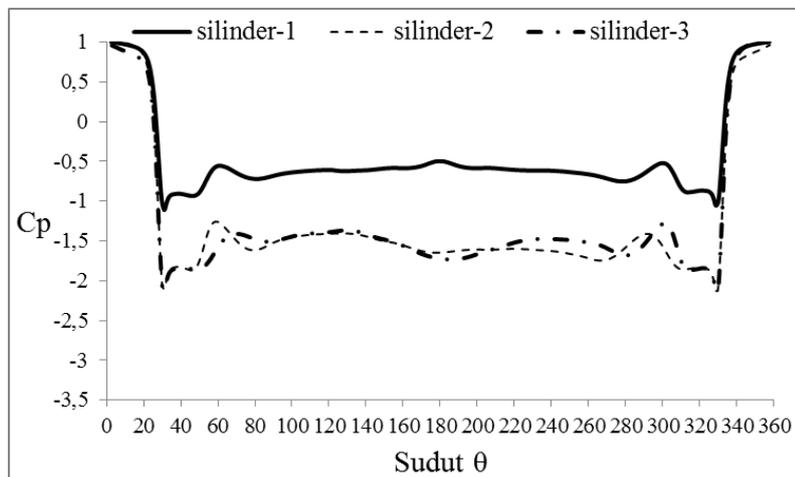
Gambar 4.6. *Velocity pathlines* silinder 3 pada  $S/D = 1,5$

Akselerasi maksimum data hasil eksperimen (gambar 4.5(a)) terjadi pada  $\theta = 40^\circ$  dengan nilai  $C_p = -1,382$  di daerah *upper*, akselerasi yang terjadi di daerah *lower* lebih besar dibandingkan daerah *upper* ditunjukkan dengan *peak* yang terbentuk pada  $\theta = 320^\circ$  dengan nilai  $C_p = -2,014$ . Untuk data numerik memiliki rentang akselerasi yang lebih besar bila dibandingkan data eksperimen, hal ini dapat diamati dari gambar 4.5 (b). Nilai koefisien tekanan *peak* pada bagian *upper* hasil numerik menunjukkan angka  $-2,12015$  pada  $\theta = 31^\circ$  dan *lower* pada  $C_p = -2,11943$  ( $\theta = 329^\circ$ ). Perbedaan rentang akselerasi antara hasil eksperimen dan numerik ini disebabkan karena perbedaan bentuk *wake* yang terbentuk.

Dilihat dari gambar 4.7 (a) dan (b) posisi titik stagnasi dari kedua grafik sama – sama pada posisi  $0^\circ$  dengan nilai  $C_p = 1$ . Perbedaan yang mencolok dari kedua grafik di atas adalah pada *base pressure* antara hasil pengambilan data eksperimen dan numerik. Selain itu perbedaan kedua seperti terlihat pada grafik numerik dapat menunjukkan detail letak separasi dari *inlet disturbance body* sampai posisi *reattach* ke silinder utama yang tidak dapat digambarkan secara detail oleh hasil data eksperimen.



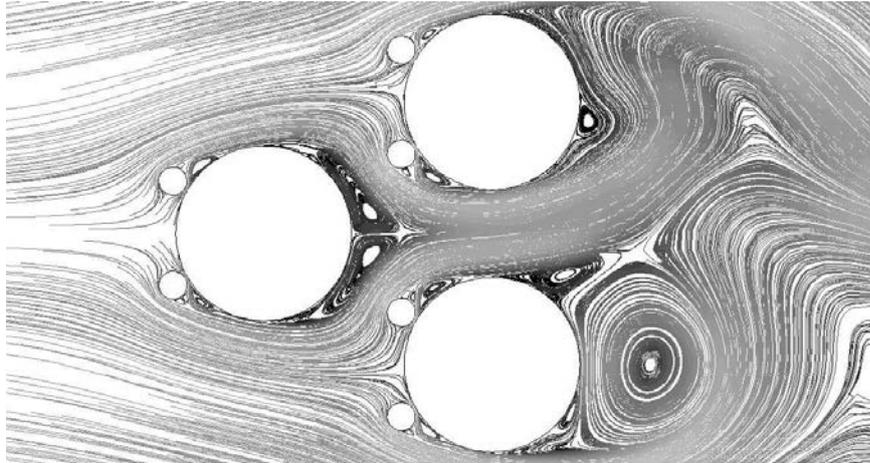
(a)



(b)

Gambar 4.7. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan tiga buah Silinder Sirkular tersusun *Equilateral Triangular* dengan penambahan IDB secara (a) eksperimen, (b) numerik pada  $S/D = 1,5$

Berdasarkan gambar 4.7 (b) terlihat bahwa silinder 3 memiliki nilai akselerasi maksimum yang hampir sama dengan silinder 2. Silinder 1 separasi terjadi pada  $\theta = 32^\circ$  (IDB) sedangkan separasi silinder utama terjadi pada  $\theta = 119^\circ$ , silinder 2 separasi terjadi pada  $\theta = 39^\circ$  (IDB) dan separasi silinder utama terjadi pada  $\theta = 128^\circ$ .

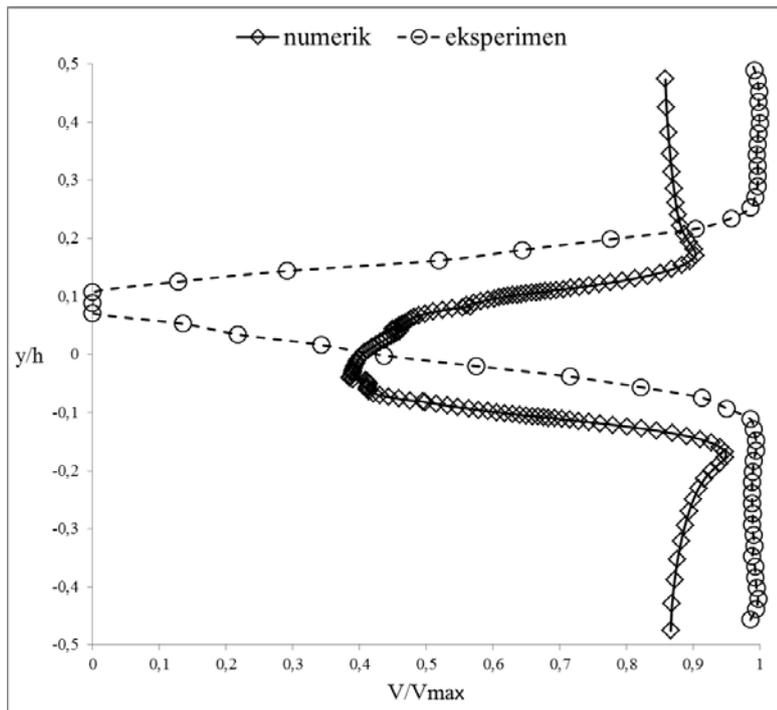


Gambar 4.8 *Velocity pathlines* pada  $S/D = 1,5$

Nilai *base pressure* tertinggi dimiliki oleh silinder 1 yang disebabkan karena adanya efek *blockage* dari dua buah silinder *downstream*, sedangkan pada *base pressure* silinder 3 terjadi percepatan pada  $\theta = 131^{\circ} - 185^{\circ}$  yang disebabkan karena adanya tekanan dari efek *wake* silinder 1 yang lebih besar mengenai silinder 3. Secara umum *base pressure* dari silinder 2 dan 3 lebih fluktuatif disebabkan karena pengaruh dari separasi *shear layer* dari silinder 1. Minimum *pressure* untuk silinder 2 dan silinder 3 lebih rendah daripada silinder 1, hal ini disebabkan karena pengaruh kecepatan aliran pada *gap* yang relatif lebih tinggi daripada *shear layer*. Pada bagian ini juga dilengkapi gambar karakteristik aliran berupa *velocity pathlines* pada ketiga buah silinder sirkular guna melengkapi informasi koefisien tekanan yang terjadi disekitar silinder berkelompok seperti ditunjukkan gambar 4.8.

#### 4.1.2 Profil Kecepatan pada $S/D = 1,5$

Profil kecepatan pada penelitian ini di dapatkan dari hasil pengambilan data secara eksperimen dan numerik. Pengambilan data secara eksperimen diambil secara *time average*, sedangkan pengambilan data profil kecepatan secara numerik dilakukan pada *time average* yang didapat dari rata – rata ke lima buah nilai (diambil pada *instantaneous time*). Adapun grafik profil kecepatan dari hasil eksperimen maupun numerik pada jarak *stagger*  $S/D = 1,5$  akan dijelaskan pada gambar 4.9 di bawah ini.



Gambar 4.9. Grafik profil kecepatan tiga buah silinder sirkular tersusun *equilateral triangular* dengan penambahan IDB secara eksperimen dan numerik pada  $S/D = 1,5$

Jika dilihat perbandingan profil kecepatan hasil simulasi numerik dengan hasil eksperimen seperti tampak pada gambar 4.9 diatas, dapat diketahui bahwa hasil eksperimen menunjukkan defisit momentum yang lebih besar bila dibandingkan dengan simulasi numerik. Defisit momentum kecil mengindikasikan bentuk *wake* kecil, sedangkan defisit momentum besar mengindikasikan bentuk *wake* yang besar. Semakin kecil *wake* yang terbentuk, menyebabkan separasi lebih tertunda ke belakang.

Ditinjau dari hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa *wake* yang terbentuk dari hasil eksperimen masih besar sehingga memungkinkan separasi aliran yang terjadi pada silinder utama masih agak ke depan. Berikut akan dijelaskan perbandingan posisi titik separasi yang terjadi antara hasil eksperimen dan numerik pada ketiga buah silinder:

- Pada silinder 1, titik separasi hasil eksperimen ( $\theta = \pm 95^\circ$ ) sedangkan separasi hasil simulasi numerik ( $\theta = \pm 119^\circ$ ).

- Silinder 2, titik separasi hasil eksperimen ( $\theta = \pm 125^0$ ), separasi hasil numerik ( $\theta = \pm 128^0$ ).
- Silinder 3, berdasarkan hasil eksperimen posisi titik separasi pada  $\theta = \pm 150^0$ , sedangkan pada hasil numerik separasinya terjadi pada  $\theta = \pm 130^0$

Berdasarkan perbandingan posisi titik separasi dari hasil eksperimen dan numerik dapat diketahui dengan jelas bahwa *wake* yang terbentuk antara hasil simulasi numerik dan eksperimen berbeda. Dapat diketahui pada silinder 3 hasil eksperimen menunjukkan separasi yang lebih tertunda ke belakang yang disebabkan karena adanya interaksi dengan *shear layer* yang terseparasi dari kedua sisi silinder 1. *Wake* yang terbentuk pada eksperimen lebih besar dibandingkan dengan hasil numerik diduga karena adanya efek *blockage*.

## **4.2 Variasi Jarak *Stagger* ( $S/D = 2$ )**

### **4.2.1 Grafik Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) dan *Velocity Pathlines* pada $S/D = 2$**

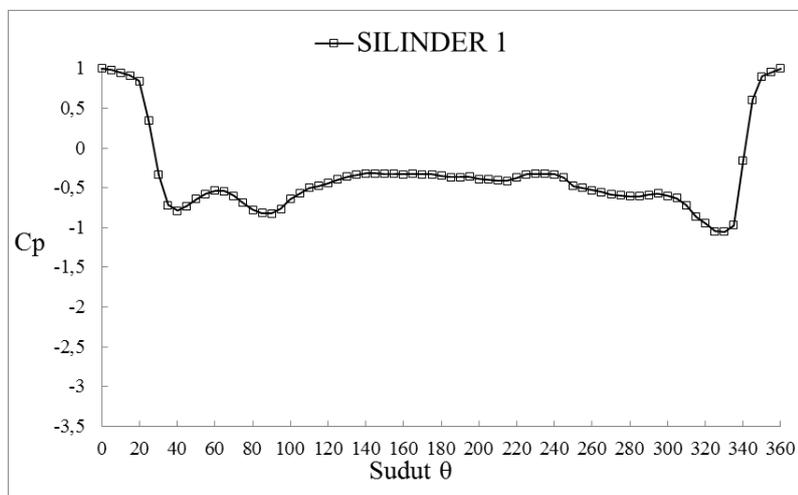
Perbandingan nilai koefisien tekanan yang didapat dari hasil eksperimen dengan waktu dalam *time average* dan hasil numerik yang diambil dari rata – rata pengambilan pada waktu sesaat akan dijelaskan dengan perbandingan grafik gambar 4.10 di bawah ini.

Pada susunan tiga buah silinder berpengganggu yang tersusun secara *equilateral triangular*, jarak *stagger*  $S/D = 2$  merupakan kategori jarak medium. Jika dilihat dari visualisasi aliran dalam bentuk *pathline* seperti ditunjukkan pada gambar 4.10 grafik koefisien tekanan yang terbentuk akan simetris antara *upper* dan *lower* yang berkorelasi dengan gambar 4.10 (b) dengan data dari hasil numerik diambil rata – rata dari lima buah data yang diambil pada detik tertentu. Gambar 4.10 (a) menunjukkan hasil yang sedikit berbeda dibanding gambar 4.10 (b) yang disebabkan saat data eksperimen tersebut diambil (*secara time average*), *wake* yang terbentuk di belakang silinder tidak berada pada fase seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11.

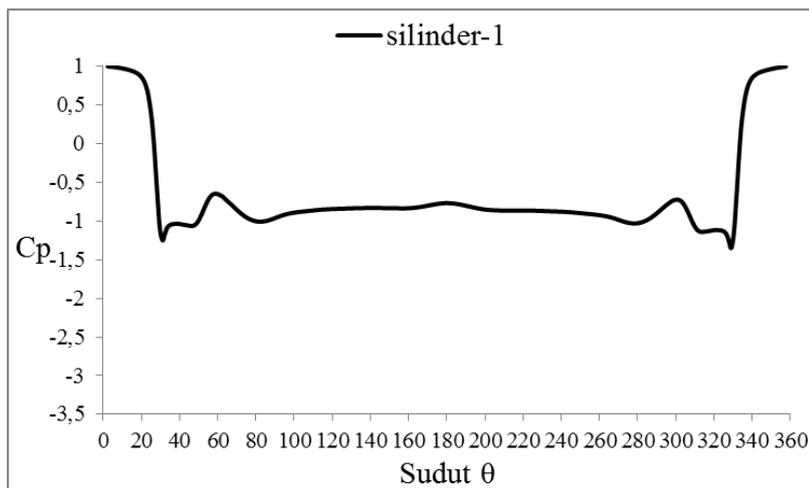
Dapat terlihat jelas pada *base pressure*, perlambatan kecepatan aliran yang terjadi pada data hasil eksperimen lebih tertunda. Hal ini menjelaskan bahwa *vortex* yang terbentuk di daerah *wake* dari silinder 1 sedikit berbeda dan dalam

kondisi berbeda dari gambar 4.10. Dari kedua grafik distribusi koefisien tekanan di atas juga menunjukkan perbedaan antara data hasil eksperimen dan data hasil numerik. Secara umum yang dapat kita lihat dari kedua grafik pada gambar 4.10, hasil numerik menunjukkan posisi *reattachment* yang dialami aliran ke silinder utama setelah terseparasi dari *inlet disturbance body*, sedangkan hasil eksperimen tidak menunjukkan posisi itu.

### Silinder 1

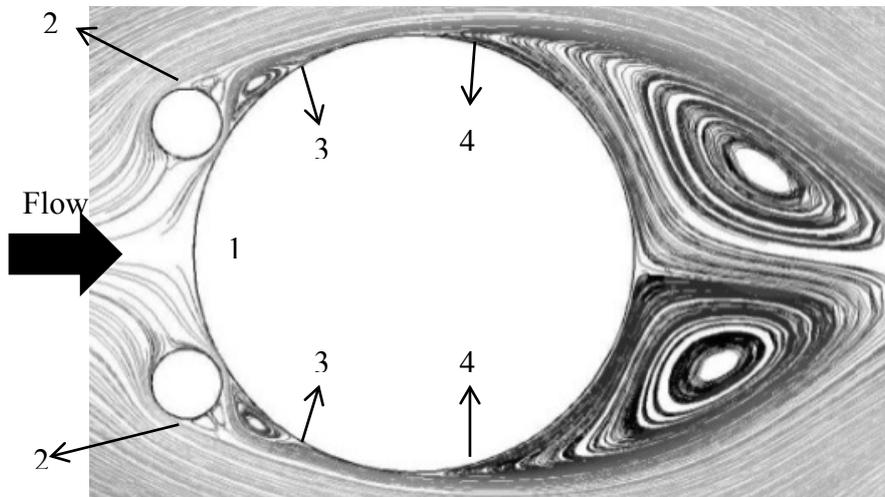


(a)



(b)

Gambar 4.10. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 1  
(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 2$

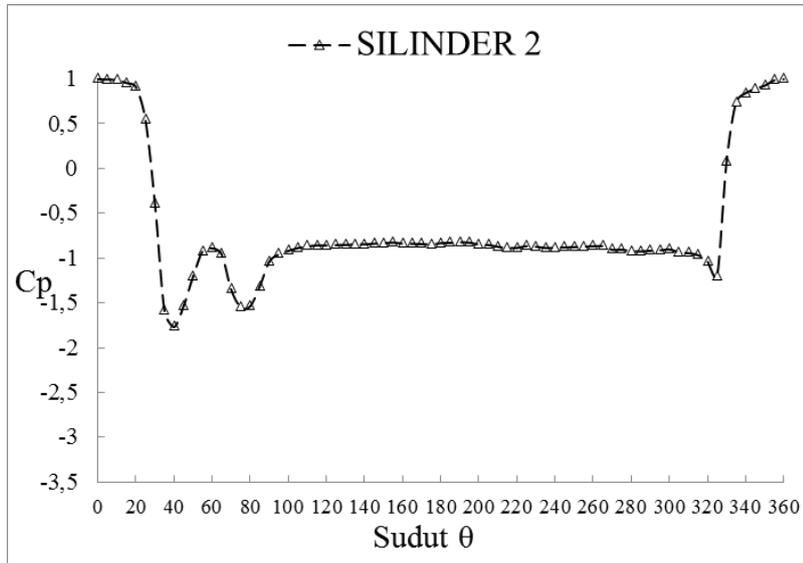


Gambar 4.11. *Velocity pathlines* silinder 1 pada  $S/D = 2$

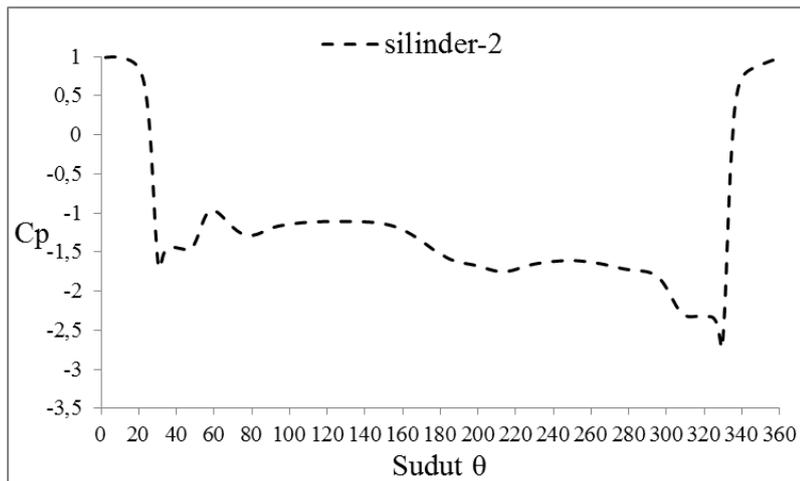
Grafik data hasil eksperimen ( gambar 4.10(a)) memiliki nilai akselerasi maksimum yang berbeda pada bagian *upper* dan *lower*. Akselerasi maksimum yang lebih besar ditunjukkan pada bagian *lower* disebabkan karena di daerah *lower* juga terpengaruh oleh gaya grafitasi. Di bagian *upper*, *peak* terbentuk pada saat  $\theta = \pm 40^\circ$  dengan nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) sebesar -0,785. *Peak* pada daerah *lower* memiliki nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) sebesar -1,052 pada nilai  $\theta = 330^\circ$ .

Gambar 4.10 (b) yang merupakan data dari hasil numerik menunjukkan nilai akselerasi maksimum yang didapat hampir sedikit berbeda antara bagian *upper* dan *lower*. Pada bagian *upper* akselerasi maksimum yang dicapai aliran terjadi pada posisi  $\theta = \pm 31^\circ$  dengan nilai  $C_p = -1,24923$ . Untuk bagian *lower* akselerasi maksimum terletak pada  $\theta = 329^\circ$  ( $C_p = -1,34632$ ). Dari data tersebut dapat diketahui bahwa nilai akselerasi maksimum yang lebih besar terdapat pada bagian *lower*, hal ini menunjukkan tren hasil yang hampir sama dengan hasil eskperimen. Perbedaan antara hasil eksperimen dan numerik tidak hanya disebabkan oleh adanya penambahan silinder pengganggu, tetapi juga disebabkan karena adanya interaksi antar silinder berpengganggu dalam kelompok silinder tersebut yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran.

## Silinder 2



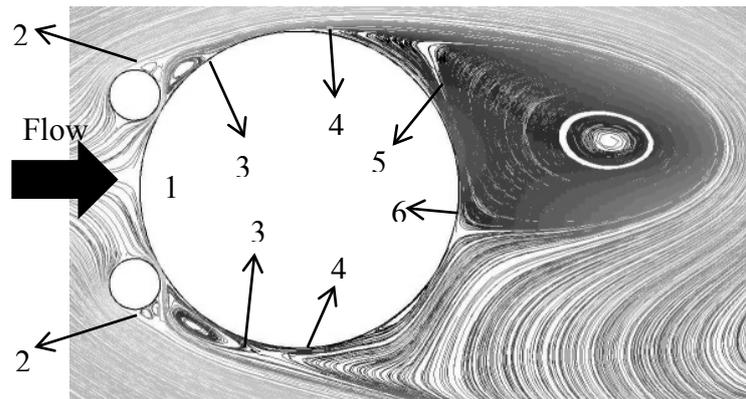
(a)



(b)

Gambar 4.12. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 2

(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 2$



Gambar 4.13. *Velocity pathlines* silinder 2 pada  $S/D = 2$

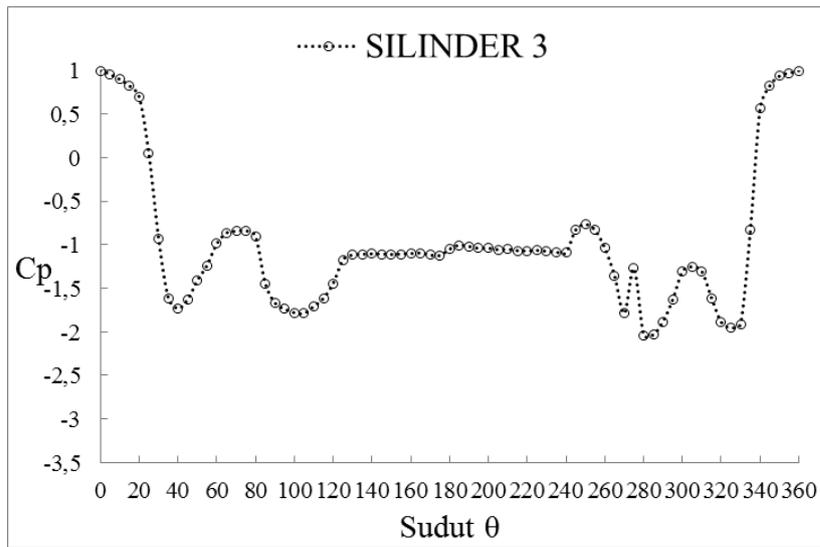
Bentuk *wake* dibelakang silinder termasuk ke dalam bentuk *in-phase*. *Base pressure* yang terlihat pada grafik antara data eksperimen dan numerik sedikit berbeda. Seperti ditunjukkan pada gambar 4.12 (b) dari data hasil numerik, *base pressure* mengalami fluktuasi yaitu mengalami perlambatan dan percepatan pada  $\theta$  tertentu. Hal ini erat kaitannya dengan struktur *wake* yang terbentuk di belakang silinder 2 ini. *Wake* yang berstruktur *in-phase* ini terbentuk dari *vortex* yang melebar di belakang bagian *upper* dari silinder seperti ditunjukkan pada gambar 4.13, sehingga karena adanya *vortex* ini pada  $\theta$  tertentu terbentuklah celah antara *vortex* dengan permukaan belakang silinder yang bersifat seperti *nozle* (titik 5 gambar 4.13) dan difuser (titik 6 gambar 4.13). Hal ini lah yang menyebabkan aliran mengalami fluktuasi ketika posisi *base pressure* (gambar 4.12 (b)).

Pada data hasil eksperimen *base pressure* cenderung lebih stabil dimungkinkan karena waktu pengambilan data tidak pada detik tertentu tetapi setiap satu menit, sehingga data yang didapat merupakan hasil rata – rata data dalam satu menit tersebut. Data hasil eksperimen yang ditunjukkan gambar 4.12 (a) memiliki nilai akselerasi maksimum pada posisi  $\theta = 40^\circ$  dengan nilai  $C_p = -1,769$  dan  $\theta = 325^\circ$  dengan nilai  $C_p = -1,202$ . Sedangkan data numerik yang ditunjukkan pada gambar 4.12 (b) nilai akselerasi maksimum pada posisi  $\theta = 31^\circ$  dengan nilai  $C_p = -1,866$  dan  $\theta = 325^\circ$  dengan nilai  $C_p = -1,202$ .

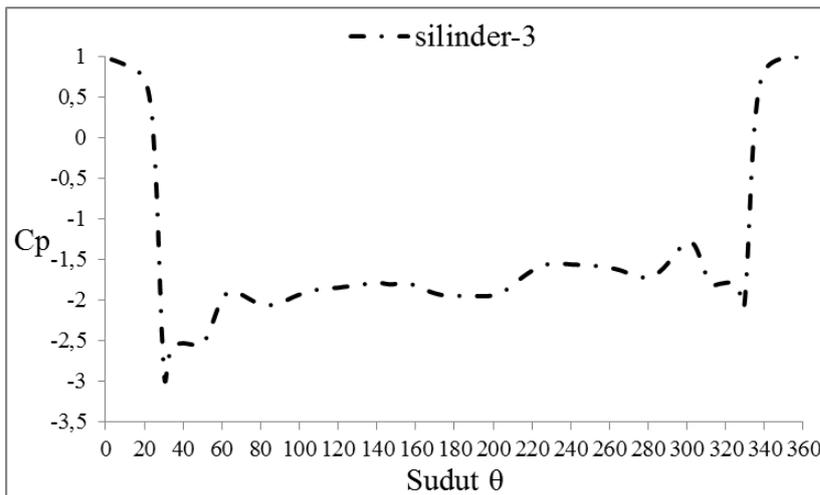
### Silinder 3

Bila dilihat dari visualisasi aliran berdasar *velocity pathlines* yang tertera di gambar 4.15 *vortex* yang terbentuk di daerah *wake* berada lebih ke tengah dan agak sedikit mengarah ke bawah, hal ini bisa disebabkan karena pengaruh gaya gravitasi dan juga karena pengaruh momentum aliran pada *gap* antara silinder 2 dan 3. Seperti diketahui kecepatan aliran di daerah *gap* tinggi karena prinsip dari celah tersebut seperti nozel. Sehingga ketika aliran pada *gap* itu bergerak mendekati daerah belakang silinder akan berubah prinsip menjadi seperti difuser. Karena pengaruh prinsip seperti difuser ini aliran yang bergerak dari celah ini bertemu dengan separasi aliran dari dinding silinder 3 bagian dalam sehingga terbentuklah turbulensi aliran (*vortex*) di belakang silinder yang mengarah keluar. Karena *vortex* aliran mengarah keluar, menyebabkan koefisien tekanan di daerah *lower* menjadi lebih tinggi dibanding daerah *upper* seperti terlihat pada gambar 4.14 (b). Grafik pada gambar 4.14 (a) menunjukkan adanya dua buah *peak* yang terbentuk di daerah *upper* dan di daerah *lower* terbentuk tiga buah *peak*, penjelasan dari grafik koefisien tekanan data eksperimen akan dijelaskan setelah gambar 4.14.

Di mulai dari *upper side* dengan titik stagnasi pada  $\theta = 0^0$  dengan nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) = 1. Kemudian aliran fluida mengalami percepatan sampai pada posisi  $\theta = \pm 40^0$  pada nilai  $C_p = -1,734$ . Kemudian mulai dari  $\theta = \pm 45^0$  aliran mengalami perlambatan karena melawan *adverse pressure* dan gaya gesek dari permukaan silinder pengganggu dan berakhir pada sudut  $\theta = \pm 75^0$ . Kemudian aliran fluida terseparasi dari silinder pengganggu pada posisi  $\theta = \pm 80^0$ . Setelah mengalami separasi, aliran fluida mengalami percepatan sampai pada posisi koefisien tekanan terkecil pada sudut  $\theta = \pm 105^0$  dengan nilai  $C_p = -1,788$ .



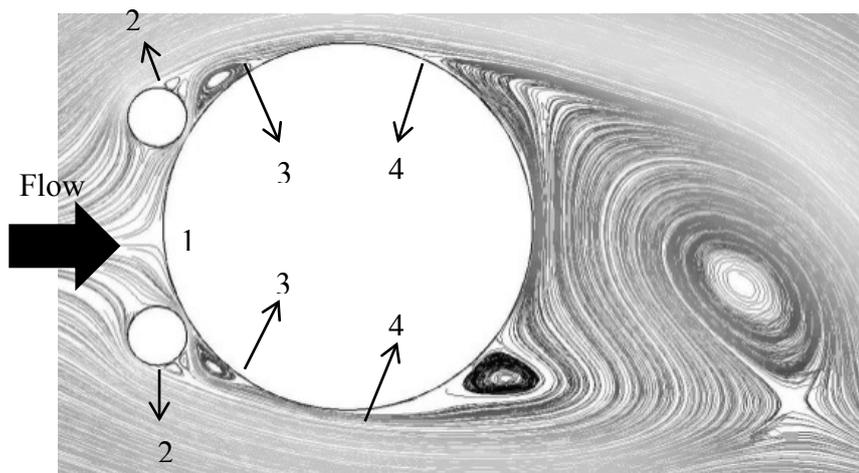
(a)



(b)

Gambar 4.14. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 3  
(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 2$

Percepatan aliran ini mengindikasikan proses *reattachment* aliran pada silinder utama 3 setelah terpecah dari *inlet disturbance body*. *Reattachment* yang terjadi pada silinder 3 ini langsung mengalami percepatan disebabkan karena adanya pengaruh dorongan aliran yang telah melewati silinder 1 dan akan melewati *gap* antara silinder 2 dan silinder 3. Separasi pada silinder utama terjadi pada posisi  $\theta = \pm 145^\circ$  (*upper*), sedangkan di bagian *lower* di posisi aliran ( $\theta = \pm 245^\circ$ ).

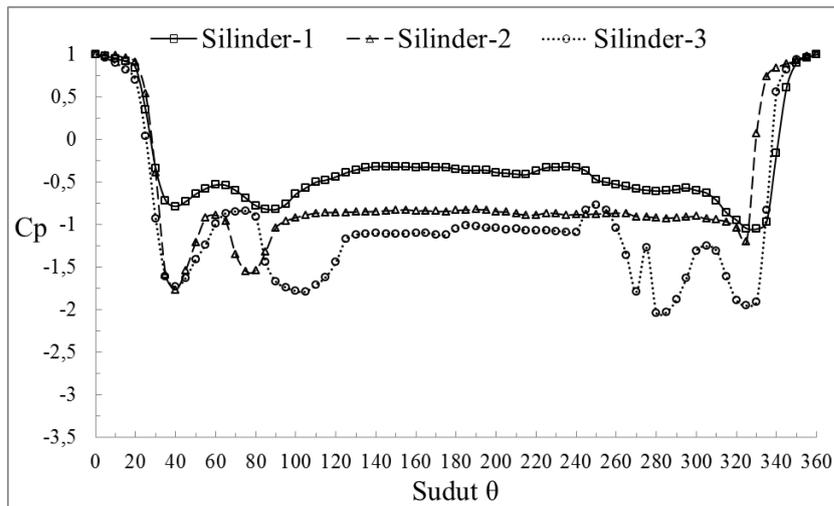


Gambar 4.15. *Velocity pathlines* silinder 3 pada  $S/D = 2$

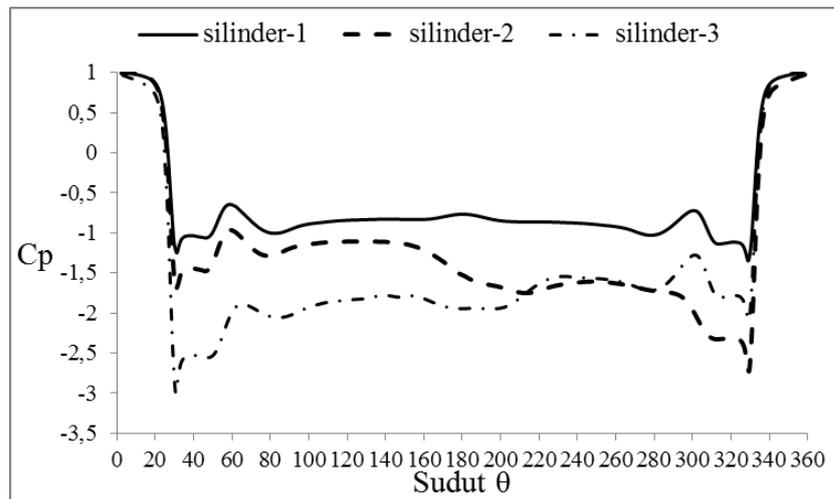
Penjelasan gambar 4.14 (b) berkorelasi dengan visualisasi *velocity pathlines* pada gambar 4.15 yang keduanya berasal dari data hasil numerik. Dari grafik koefisien pressure terhadap posisi sudut  $\theta$  diketahui bahwa nilai koefisien pressure ( $C_p$ ) saat akselerasi maksimum antara *upper side* dan *lower side* sedikit berbeda. Pada posisi *upper* nilai koefisien  $C_p$  lebih rendah dibandingkan di *lower*, hal ini disebabkan pada saat posisi *upper* dari silinder 3 ini merupakan sisi bagian dalam dari *gap* antara silinder 2 dan 3 sehingga terpengaruh dengan aliran yang dipercepat saat melewati *gap* karena *gap* ini memiliki prinsip seperti nozel. Momentum aliran dari silinder 1 dan setelah melintasi *gap* lebih besar mengenai bagian *lower* dari silinder 3 sehingga nilai koefisien tekanan yang mengenai bagian ini lebih besar.

*Base pressure* silinder 2 dan 3 saling berfluktuasi (gambar 4.16 (b)) dimungkinkan karena adanya pengaruh perbedaan *pressure* yang mengenai permukaan kedua silinder *downstream* yang disebabkan oleh aliran pada *gap* antara silinder 2 dan silinder 3 yang memiliki prinsip seperti nozel, hal ini seperti ditunjukkan pada gambar 4.17.

Secara aktual silinder berkelompok sendiri memiliki karakteristik yang berbeda bila dibandingkan dengan silinder tunggal. Seperti dijelaskan pada penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan oleh Gu dan Sun (2000) secara eksperimen serta Bao et al (2010) secara numerik mengindikasikan bahwa silinder yang tersusun secara berkelompok memiliki interaksi yang sangat kuat satu sama lainnya.

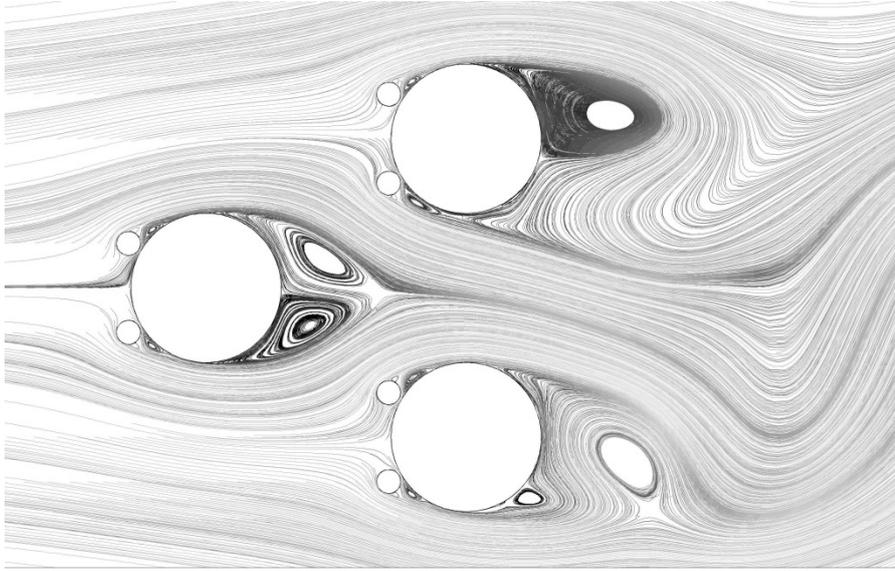


(a)



(b)

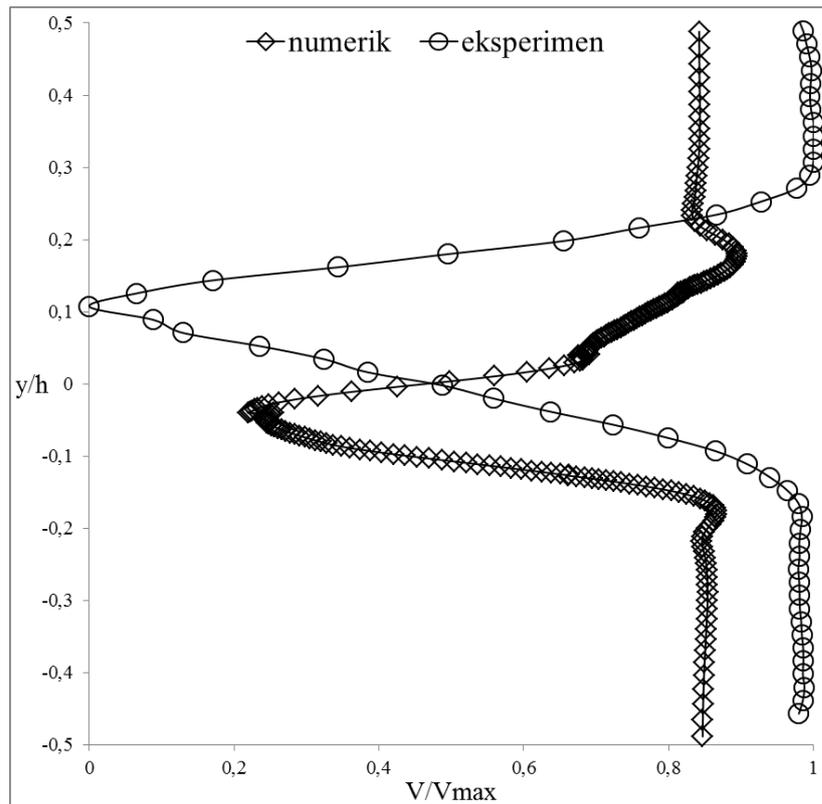
Gambar 4.16. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan tiga buah Silinder Sirkular tersusun *Equilateral Triangular* dengan penambahan IDB secara (a) eksperimen, (b) numerik pada  $S/D = 2$



Gambar 4.17 *Velocity Pathlines* ketiga silinder pada  $S/D = 2$

#### 4.2.2 Profil Kecepatan pada $S/D = 2$

Untuk perbandingan nilai profil kecepatan yang diambil dalam waktu sesaat (numerik) dan dalam *time average* (eksperimen) pada jarak *stagger*  $S/D = 2$  seperti dijelaskan dalam grafik gambar 4.18 di bawah ini menunjukkan perbedaan pada defisit momentum yang terjadi. Pada grafik tersebut terlihat jelas defisit momentum hasil eksperimen lebih besar, hal ini mengindikasikan luasan *wake* yang terbentuk juga besar. Sedangkan defisit momentum pada hasil simulasi numerik lebih kecil sehingga luasan *wake* yang terbentuk juga kecil dan mengindikasikan adanya penundaan separasi lebih ke belakang. Dengan adanya penundaan separasi lebih ke belakang menunjukkan bahwa momentum aliran yang *attach* ke permukaan silinder (simulasi numerik) lebih turbulen dibandingkan momentum aliran yang *attach* ke permukaan silinder secara eksperimen. Hal lain yang berpengaruh terhadap perbedaan hasil profil kecepatan secara eksperimen dan numerik ditinjau dari segi eksperimen bisa disebabkan karena penempatan *wind tunnel* pada permukaan yang memiliki kemiringan tertentu sehingga berpengaruh pada hasil pengambilan data.



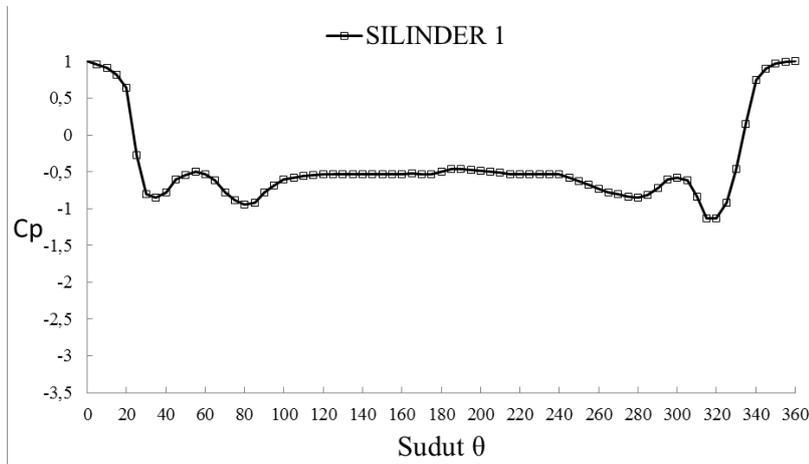
Gambar 4.18. Grafik profil kecepatan tiga buah silinder sirkular tersusun *equilateral triangular* dengan penambahan IDB secara eksperimen dan numerik pada  $S/D = 2$

### 4.3 Variasi Jarak *Stagger* ( $S/D = 2,5$ )

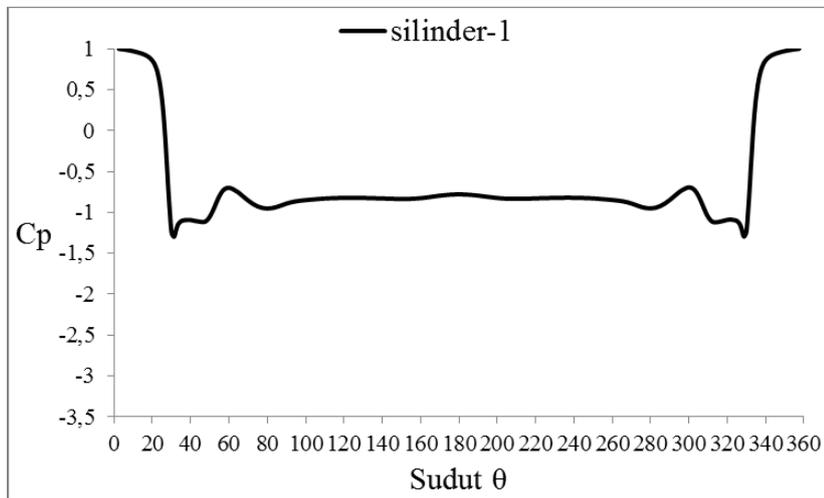
#### 4.3.1 Grafik Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) dan *Velocity Pathlines* pada $S/D = 2,5$

Nilai koefisien tekanan yang diambil baik secara eksperimen dan numerik pada jarak *stagger*  $S/D = 2,5$  akan dijelaskan dalam bentuk grafik di bawah ini pada masing – masing silinder dan dapat kita amati grafik koefisien tekanan yang terbentuk berkorelasi dengan fenomena aliran berdasarkan visualisasi *velocity pathline* di bawah ini,

### Silinder 1



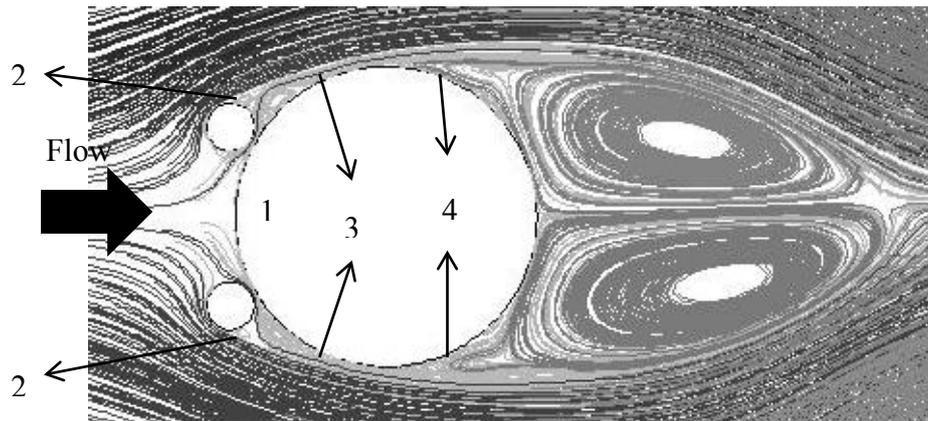
(a)



(b)

Gambar 4.19. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 1  
(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 2,5$

Pada rujukan penelitian terdahulu dalam kasus tiga buah silinder tersusun *equilateral triangular*, untuk jarak *stagger* antar silinder  $S/D = 2,5$  masih termasuk ke dalam *medium gap* dimana antara satu silinder dengan yang lain masih saling berpengaruh. Dari data hasil eksperimen yang terdapat pada grafik di gambar 4.19(a) terlihat simetri pada bagian *upper* dan *lower* berkaitan dengan bentuk *vortex* yang terbentuk di belakang silinder 1.

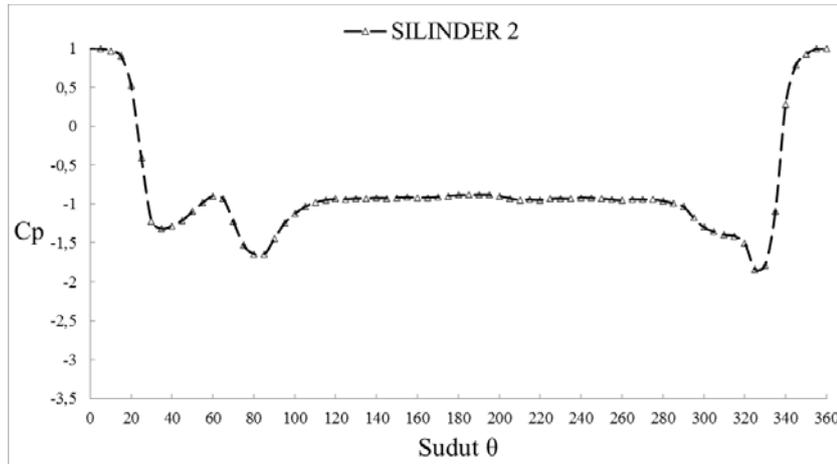


Gambar 4.20. *Velocity pathlines* silinder 1 pada  $S/D = 2,5$

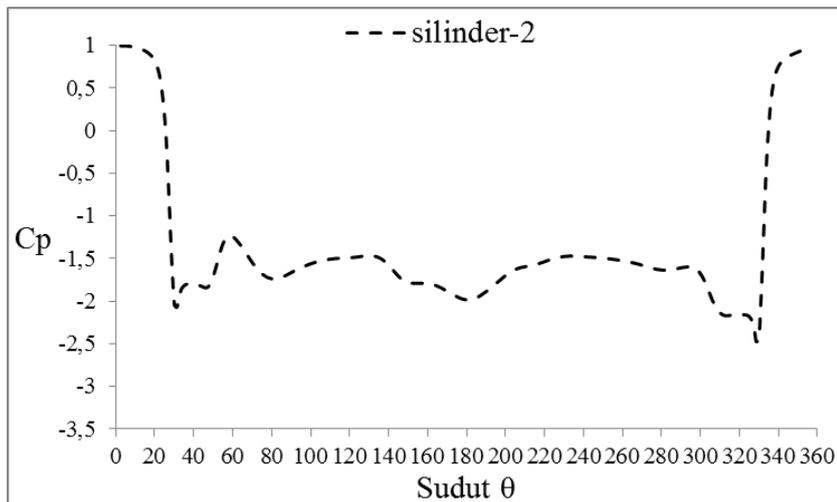
Nilai akselerasi maksimum di daerah *upper* pada silinder pengganggu terjadi pada  $\theta = 35^\circ$  pada nilai  $C_p = -0,850$ , sedangkan di daerah *lower* akselerasi maksimum terjadi pada  $\theta = 320^\circ$  dengan nilai  $C_p = -1,134$ . Separasi pada *inlet disturbance body* di daerah *upper* terjadi pada  $\theta = \pm 40^\circ$  sedangkan di daerah *lower* terjadi pada posisi  $\theta = \pm 315^\circ$ . Separasi pada daerah *upper* silinder utama terjadi pada posisi  $\theta = \pm 135^\circ$  dan  $\theta = \pm 225^\circ$  (*lower*).

Data hasil numerik yang ditampilkan pada gambar 4.19 (b) juga terlihat simetri pada bagian *upper* dan *lower*. Yang membedakan dengan hasil eksperimen adalah pada grafik koefisien tekanan hasil numerik memperlihatkan terjadinya *reattachment* aliran pada silinder utama setelah terseparasi dari *inlet disturbance body* karena terbentuknya *bubble separation* baik pada bagian *upper* maupun *lower*. Separasi aliran dari silinder pengganggu terjadi di posisi sudut  $\theta = \pm 33^\circ$  kemudian *reattach* ke silinder utama pada posisi  $\theta = \pm 48^\circ$ , aliran terseparasi dari silinder utama pada  $\theta = \pm 123^\circ$ . Fenomena aliran yang terjadi dan dijelaskan pada grafik koefisien tekanan pada gambar 4.19 (b) divisualisasikan berdasar *velocity pathline* yang tertera pada gambar 4.20. Perbedaan bentuk grafik hasil distribusi koefisien tekanan antara pengambilan data secara eksperimen maupun numerik disebabkan karena pengaruh *blockage* pada eksperimen lebih dominan dibandingkan hasil numerik. Selain itu beberapa hal juga dapat berpengaruh terhadap perbedaan hasil antara data eksperimen dan numerik ini, diantaranya data numerik diambil dengan turbulence model, kondisi awal dan *boundary condition* yang berbeda dengan kondisi aktual pengambilan data eksperimen.

## Silinder 2



(a)



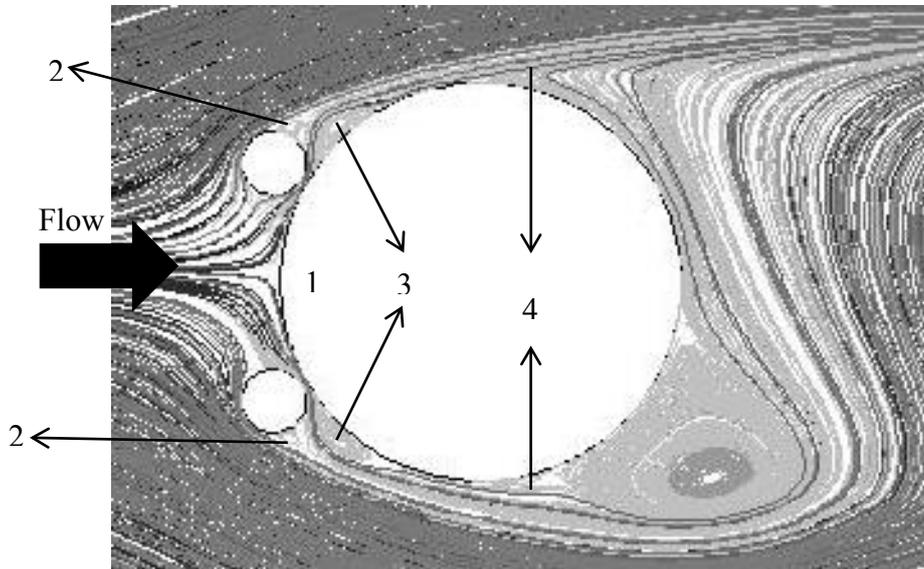
(b)

Gambar 4.21. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 2

(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 2,5$

Dari gambar 4.21 (a) yang diambil secara eksperimen dan 4.21 (b) data hasil numerik memiliki bentuk grafik distribusi koefisien tekanan yang hampir sama, yang membedakan hanya di bagian *upper* saja. Dapat terlihat pada bagian *upper* pada grafik hasil eksperimen posisi saat aliran mengalami *reattach* pada silinder utama, aliran mengalami akselerasi yang lebih besar dibandingkan dengan hasil numerik. Hal ini bisa disebabkan karena pembentukan *bubble separation* tidak tampak pada hasil eksperimen, seperti diketahui untuk data hasil eksperimen

diambil pada menit tertentu (*time average*), sedangkan data hasil numerik diambil dari rata – rata data yang diambil pada detik tertentu.



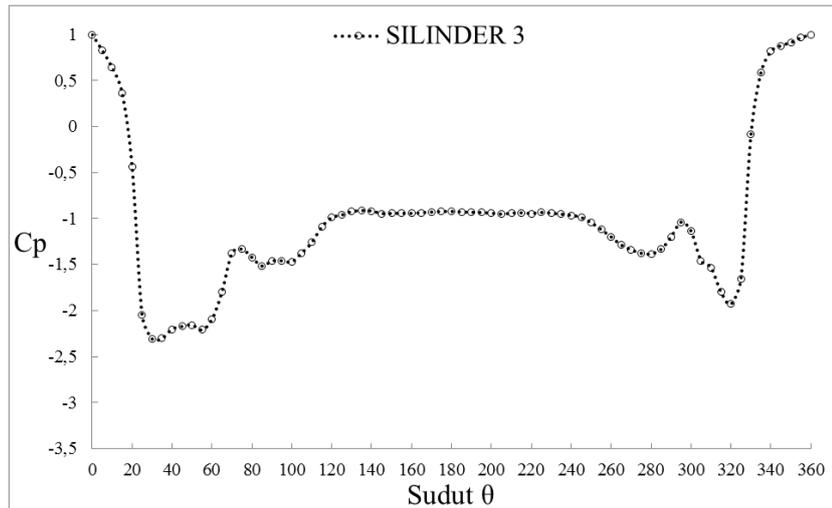
Gambar 4.22. *Velocity pathlines* silinder 2 pada  $S/D = 2,5$

Fenomena terjadinya *bubble separation* terlihat lebih jelas pada hasil numerik seperti tampak pada titik 3 gambar 4.22 sedangkan pada eksperimen tidak tampak. Adanya perbedaan hasil kuantitatif maupun kualitatif antara hasil simulasi numerik dengan hasil eksperimen dapat disebabkan berbagai faktor, dari segi numerik bisa disebabkan karena model turbulensi yang digunakan pada simulasi numerik, kondisi awal dan kondisi batas yang diinputkan, dan properti aliran fluida yang diinputkan tidak persis sama dengan kondisi saat pengambilan data secara eksperimen. Sedangkan dari segi eksperimen bisa disebabkan karena kurangnya ketelitian alat ukur yang digunakan dan *set up* benda uji, hal ini seperti disampaikan pada penelitian Vinaya (2013).

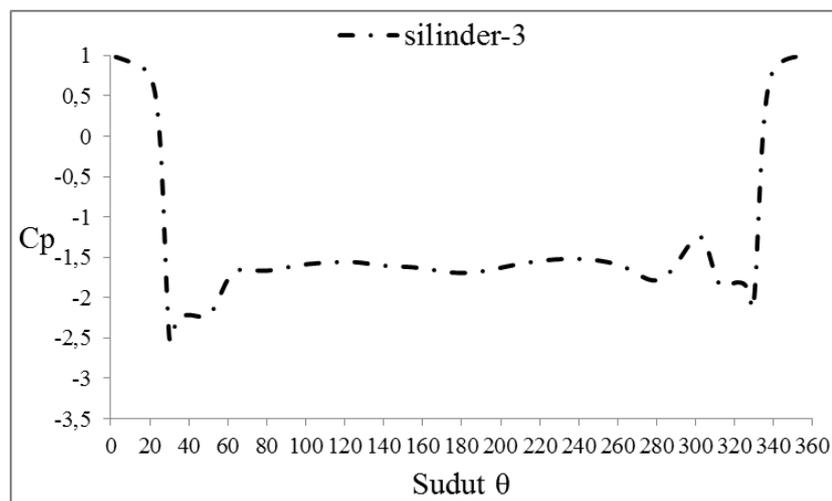
Berdasarkan grafik distribusi koefisien tekanan hasil eksperimen (4.21 (a)), akselerasi maksimum terjadi pada posisi  $\theta = \pm 35^{\circ}$  (bodi pengganggu) dan  $\theta = \pm 85^{\circ}$  (silinder utama) untuk sisi *upper*. Sedangkan pada *lower side* akselerasi maksimum hanya terjadi pada posisi  $\theta = \pm 325^{\circ}$  dengan nilai koefisien tekanan pada posisi tersebut sebesar -1,840. Hasil data numerik pada grafik koefisien tekanan tersebut menunjukkan hanya ada dua buah *peak* yang terbentuk yaitu pada posisi  $\theta = \pm 31^{\circ}$  pada bagian *upper* dan  $\theta = \pm 329^{\circ}$ . Aliran mengalami perlambatan dengan nilai koefisien tekanan tertinggi berada di daerah *upper* yaitu

pada posisi  $\theta = \pm 58^\circ$ . Hal ini disebabkan karena adanya aliran balik yang terbentuk akibat terbentuknya *vortex* di daerah *wake* dari silinder 2 seperti ditunjukkan pada gambar 4.22. Separasi aliran pada silinder utama terjadi pada  $\theta = \pm 83^\circ$  dan  $\theta = \pm 280^\circ$ .

### Silinder 3

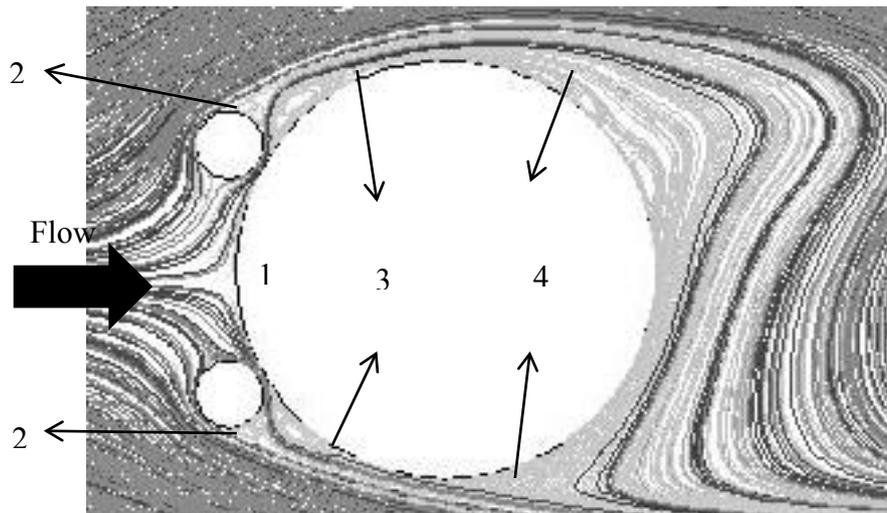


(a)



(b)

Gambar 4.23. Grafik distribusi koefisien tekanan terhadap sudut  $\theta$  pada silinder 3  
(a) secara eksperimen, (b) secara numerik pada  $S/D = 2,5$

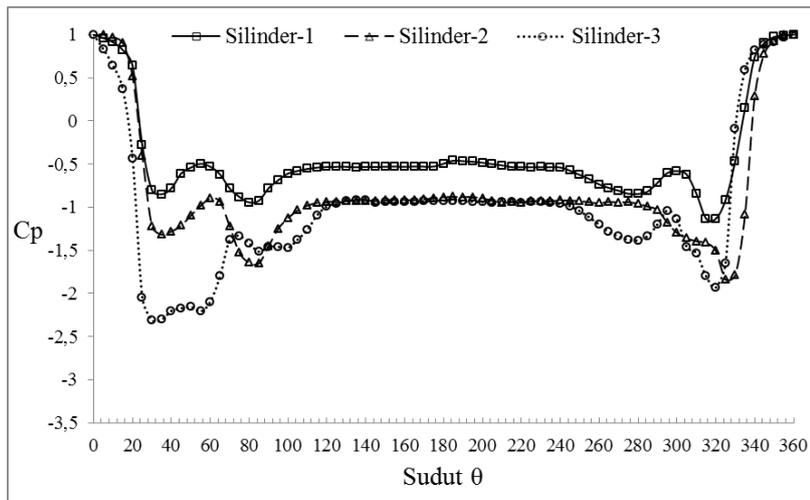


Gambar 4.24. *Velocity pathlines* silinder 3 pada  $S/D = 2,5$

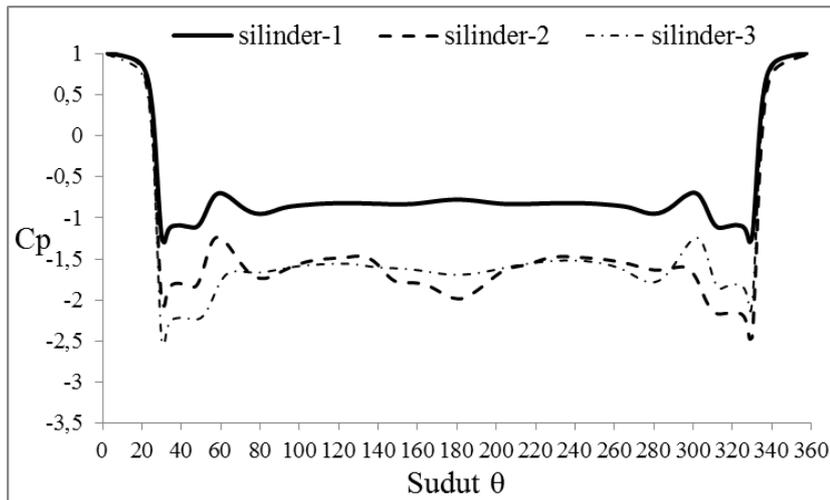
Kedua grafik baik gambar 4.23 (a) dan 4.23 (b) diatas memiliki trend yang identik hanya terdapat perbedaan pada daerah *base pressure*. Nilai *base pressure* pada hasil numerik mengalami perlambatan pada  $\theta = 81^{\circ} - 121^{\circ}$  dan  $\theta = 185^{\circ} - 237^{\circ}$  yang disebabkan karena adanya bentuk aliran di daerah *wake* seperti ditunjukkan pada gambar 4.24 yang bersifat seperti difuser.

Titik separasi pada silinder utama hasil eksperimen (gambar 4.23a) terletak pada posisi  $\theta = \pm 140^{\circ}$  dan  $220^{\circ}$ . Sedangkan titik separasi hasil numerik (gambar 4.23b) terletak pada posisi  $\theta = \pm 69^{\circ}$  dan  $280^{\circ}$ . *Peak* yang terbentuk pada bagian *upper* antara hasil eksperimen dan numerik juga sedikit berbeda. Hal ini bisa disebabkan karena pada kasus eksperimen ini bagian *upper* dari silinder 3 terpengaruh kuat oleh *shear layer* yang terseparasi dari kedua sisi silinder 1.

Silinder 2 dan silinder 3 mengalami fluktuasi pada nilai *base pressure* baik pada gambar 4.25(a) grafik hasil eksperimen maupun 4.25(b) grafik hasil numerik, hal ini juga disebabkan karena pengaruh *wake* pada silinder 3 lebih kuat pada rasio jarak ini (gambar 4.26), sehingga pada grafik ditunjukkan nilai  $C_p$  silinder 2 pada  $\theta = 180^{\circ} - 190^{\circ}$  menunjukkan kemiringan yang curam yang menunjukkan adanya perlambatan pada sudut tersebut. Perlambatan yang terjadi disini karena aliran tidak dapat menghadapi tekanan yang ditimbulkan karena adanya pertemuan *shear layer* permukaan *lower* dari silinder 2 dengan aliran yang keluar dari gap hasil dari *wake* silinder 1.

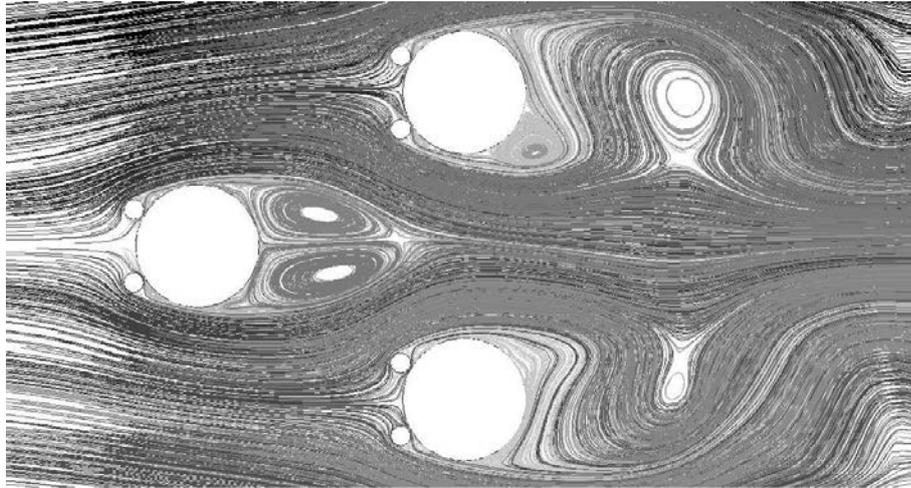


(a)



(b)

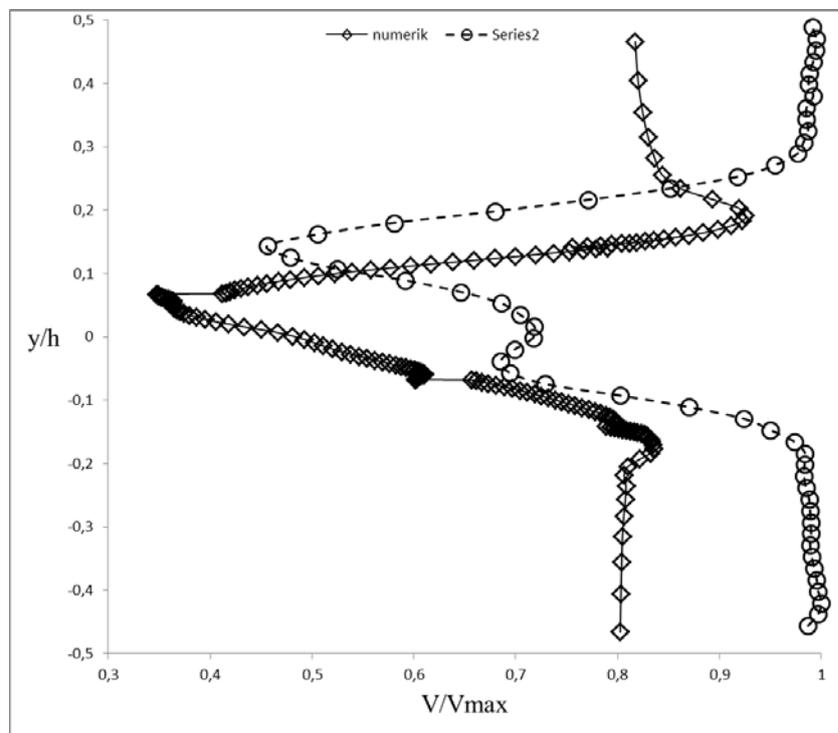
Gambar 4.25. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan tiga buah Silinder Sirkular tersusun *Equilateral Triangular* dengan penambahan IDB secara (a) eksperimen, (b) numerik pada  $S/D = 2,5$



Gambar 4.26. *Velocity Pathlines* tiga buah silinder pada  $S/D = 2,5$

### 4.3.2 Profil Kecepatan pada $S/D = 2,5$

Profil kecepatan pada jarak *stagger*  $S/D = 2,5$  baik dari hasil eksperimen maupun numerik dapat terlihat pada gambar di bawah ini,



Gambar 4.27. Grafik profil kecepatan tiga buah silinder sirkular tersusun *equilateral triangular* dengan penambahan IDB secara eksperimen dan numerik pada  $S/D = 2,5$

Sedikit berbeda dengan kasus variasi sebelumnya, pada jarak  $S/D = 2.5$  ini justru hasil simulasi numerik yang mengalami defisit momentum yang lebih besar dibandingkan dengan hasil eksperimen seperti terlihat pada grafik profil kecepatan (gambar 4.27). Sehingga dapat diketahui bahwa luasan *wake* yang terbentuk dari hasil numerik lebih besar daripada hasil eksperimen. Dan ini artinya separasi dari eksperimen lebih tertunda ke belakang karena luasan *wake* yang terbentuk lebih kecil dan aliran yang *reattach* ke silinder utama lebih turbulen bila dibandingkan dengan hasil numerik. Perbedaan nilai dari profil kecepatan ini bisa disebabkan karena pada saat pengambilan data antara eksperimen dan numerik fenomena *wake* yang terbentuk pada posisi yang sedikit berbeda, hal ini disebabkan karena *wake* yang terbentuk selalu berfluktuasi.

#### **4.4 Analisa Koefisien *Drag Pressure***

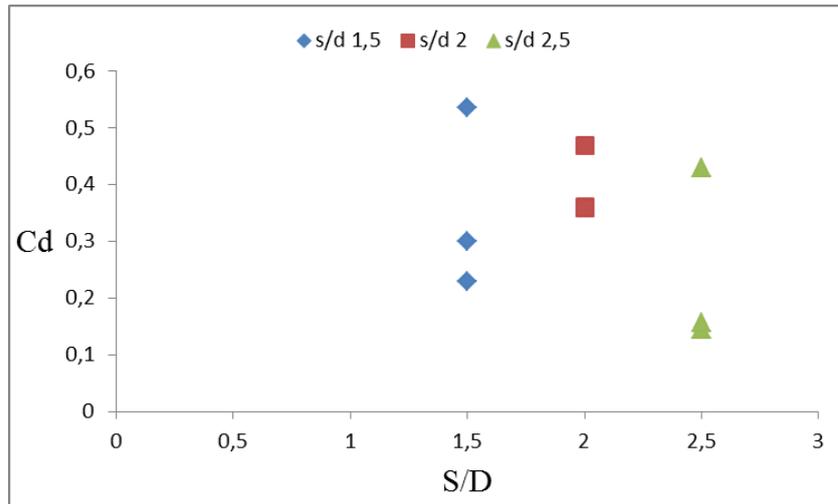
Pada subbab sebelumnya telah dijabarkan tentang grafik distribusi koefisien tekanan yang terjadi pada ketiga buah silinder berpengganggu yang tersusun secara *equilateral triangular* pada variasi jarak *stagger*  $S/D = 1.5, 2$  dan  $2.5$ . Berdasarkan penjelasan diatas besarnya nilai koefisien *drag pressure* baik secara eksperimen maupun numerik dapat diketahui. Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai besarnya nilai koefisien *drag pressure* yang terjadi baik secara eksperimen maupun numerik pada ketiga buah silinder berpengganggu yang tersusun secara *equilateral triangular* pada variasi  $S/D = 1.5, 2$  dan  $2.5$  agar diketahui secara detail kesesuaian antara hasil eksperimen dan numerik.

##### **4.4.1 Nilai Koefisien *Drag Pressure* pada Tiga Buah Silinder Berpengganggu Tersusun Secara *Equilateral Triangular* pada $S/D = 1.5$ .**

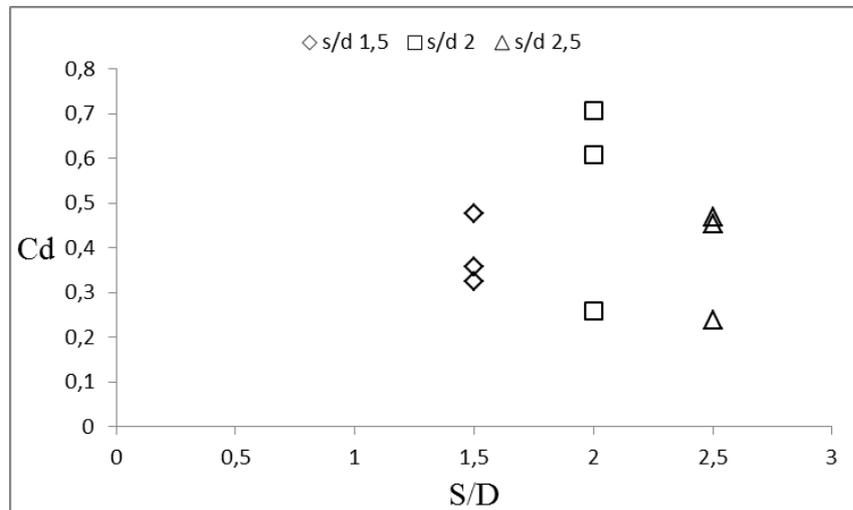
Nilai koefisien *drag pressure* dari hasil eksperimen dan numerik yang akan dijelaskan di bawah ini berdasarkan angka *Reynolds*  $= 2.0 \times 10^4$ . Nilai koefisien *drag pressure* yang dijelaskan disini adalah nilai per silinder yang akan dijabarkan dalam bentuk tabel.

Tabel 4.1 Nilai Koefisien *Drag Pressure* Pada Jarak *Stagger* ( $S/D = 1,5$ )

S/D	CDp	Numerik	Eksperimen
1,5	CDp Silinder 1	0,536	0,324
1,5	CDp Silinder 2	0,229	0,358
1,5	CDp Silinder 3	0,299	0,477



Gambar 4.28 Grafik koefisien drag ( $C_d$ ) terhadap  $S/D$  data numerik



Gambar 4.29 Grafik koefisien drag ( $C_d$ ) terhadap  $S/D$  data eksperimen

Tabel 4.1 menunjukkan kemampuan penambahan bodi pengganggu (*inlet disturbance body*) dan variasi jarak *stagger* terhadap kemampuan mereduksi gaya drag pada tiga buah silinder tersusun secara *equilateral triangular* melalui perbandingan nilai koefisien *drag pressure* antara hasil eksperimen dan numerik pada  $S/D = 1,5$ . Dari tabel diatas dapat diketahui secara detail bahwa hasil

simulasi numerik memiliki nilai koefisien drag yang lebih rendah bila dibandingkan hasil eksperimen seperti ditunjukkan secara detail perbandingannya pada gambar 4.28 dan 4.29 diatas.

#### 4.4.2 Nilai Koefisien *Drag Pressure* pada Tiga Buah Silinder Berpengganggu Tersusun Secara *Equilateral Triangular* pada $S/D = 2$ .

Tabel 4.2 Nilai Koefisien Drag Pressure Pada Jarak Stagger ( $S/D = 2$ )

S/D	CDp	Numerik	Eksperimen
2	CDp Silinder 1	0,360	0,258
2	CDp Silinder 2	0,359	0,705
2	CDp Silinder 3	0,469	0,607

Bila dilihat dari penjelasan tabel 4.2 fenomena yang terjadi pada variasi jarak  $S/D = 2$  ini hampir sama dengan fenomena pada  $S/D = 1,5$  yang menunjukkan bahwa nilai koefisien *drag pressure* hasil simulasi numerik menunjukkan nilai yang lebih rendah bila dibandingkan dengan hasil eksperimen.

#### 4.4.3 Nilai Koefisien *Drag Pressure* pada Tiga Buah Silinder Berpengganggu Tersusun Secara *Equilateral Triangular* pada $S/D = 2.5$ .

Tabel 4.3 Nilai Koefisien Drag Pressure Pada Jarak Stagger ( $S/D = 2,5$ )

S/D	CDp	Numerik	Eksperimen
2,5	CDp Silinder 1	0,429	0,452
2,5	CDp Silinder 2	0,144	0,467
2,5	CDp Silinder 3	0,157	0,239

Fenomena yang sama terjadi pada variasi jarak *stagger* terjauh pada penelitian ini yaitu pada  $S/D = 2,5$  dimana nilai koefisien *drag pressure* dari hasil simulasi numerik lebih rendah bila dibandingkan nilai koefisien *drag pressure* yang diambil secara eksperimen.

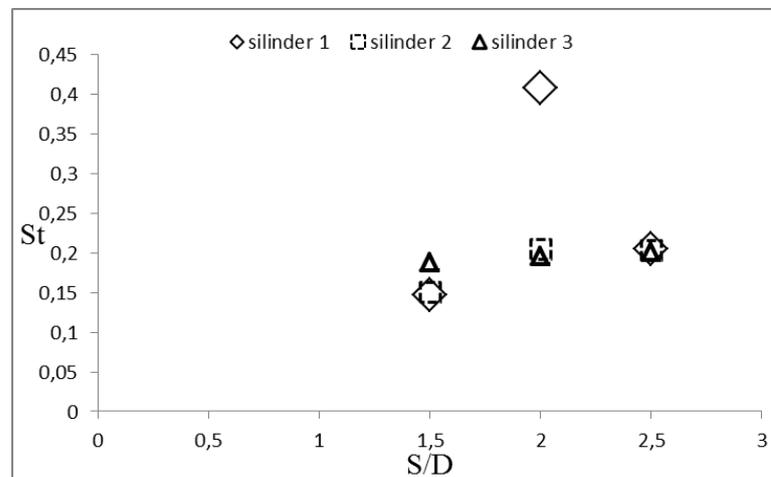
Berdasarkan penjelasan tabel 4.1, 4.2 dan 4.3 diatas yang diambil secara eksperimen dan numerik menunjukkan tren yang sama, secara eksperimen koefisien *drag pressure* terendah terjadi pada jarak *stagger*  $S/D = 2,5$  dan secara numerik koefisien *drag pressure* terendah pada jarak *stagger*  $S/D = 2,5$ . Berdasarkan kesimpulan diatas dapat kita ketahui bahwa pada penelitian ini

mendapatkan hasil reduksi *drag pressure* optimum yang sama antara data hasil simulasi numerik dan data hasil eksperimen. Hasil reduksi *pressure drag* optimum pada data baik secara eksperimen maupun numerik terjadi pada jarak  $S/D = 2,5$  sesuai penjelasan dalam penelitian Gu dan Sun (2000) yang menyatakan bahwa pada jarak  $S/D = 2,5$  masih tergolong ke dalam *medium spacing*, sehingga fenomena antar silinder masih berpengaruh signifikan.

#### 4.5 Analisa Nilai Angka Strouhal

Tabel 4.4 Perbandingan Nilai Angka Strouhal Antar Silinder Dengan Penambahan *Inlet Disturbance Body* pada Variasi Jarak *Stagger* tertentu ( $S/D = 1,5$ ; 2 dan 2,5)

S/D	St		
	Silinder 1	Silinder 2	Silinder 3
1,5	0,14736	0,15145	0,18829
2	0,40866	0,20433	0,19616
2,5	0,20551	0,20357	0,20163



Gambar 4.30 Nilai *strouhal number* silinder berkelompok susunan *equilateral triangular* pada variasi jarak *stagger* tertentu.

Bila dilihat secara detail dari keterangan pada tabel 4.4 dan gambar 4.30 diatas dapat diketahui bahwa nilai angka *Strouhal* tertinggi terjadi pada variasi jarak *stagger*  $S/D = 2,5$ . Hal ini membuktikan bahwa semakin baik kemampuan dalam mereduksi gaya drag ditunjukkan dengan nilai koefisien *pressure drag*

yang rendah, akan berbanding terbalik dengan nilai *strouhal number* (meningkat). Penjelasan ini sebagaimana dijelaskan pada penelitian Alam (2003) dan Vinaya (2013).

#### 4.6 Perbandingan dengan Tiga Buah Silinder Tanpa Pengganggu Tersusun secara *Equilateral Triangular*

Pada akhir dari pembahasan bab ini, akan disertakan perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang dijadikan acuan dalam penyusunan penelitian ini. Adapun beberapa penelitian yang akan dibahas perbandingan hasilnya dengan penelitian ini antara lain penelitian Gu dan Sun (2000) dan Bao, et al (2010).

##### 4.6.1 Perbandingan Dengan Hasil Penelitian Gu dan Sun (2000)

Penelitian Gu dan Sun ini merupakan penelitian secara eksperimen terhadap tiga buah silinder tanpa pengganggu tersusun secara *equilateral triangular* dilakukan pada angka *Reynolds*  $5,5 \times 10^4$  pada variasi rasio jarak *stagger* ( $1,7 \leq S/D \leq 4,0$ ). Untuk keperluan sebagai pembanding hasil dari penelitian, hanya diambil variasi *stagger* yang mendekati variasi yang dilakukan penelitian ini yaitu pada jarak  $S/D = 2,2$  dan  $S/D = 2,5$ .

Tabel 4.5 Nilai Koefisien Drag Penelitian Gu dan Sun (2000)

S/D	CDp Eksperimen		
	Silinder 1	Silinder 2	Silinder 3
1,7	0,728	0,801	1,041
2,2	1,001	0,821	0,875
2,5	1,185	0,888	1,145

Tabel 4.6 Nilai Koefisien Drag Penelitian Ini

S/D	CDp Numerik		
	Silinder 1	Silinder 2	Silinder 3
1,5	0,600	1,027	1,031
2	0,797	0,887	0,750
2,5	0,826	1,021	0,962

Tabel 4.5 diatas merupakan tabel nilai koefisien drag hasil penelitian secara eksperimen yang dilakukan pada angka *Reynolds*  $5,5 \times 10^4$ , sedangkan tabel 4.6 merupakan nilai koefisien drag hasil penelitian ini yang dilakukan tanpa

diberikan silinder sirkular pengganggu pada *upstream* masing – masing silinder utamanya. Penelitian ini dilakukan pada angka *Reynolds*  $2,2 \times 10^4$ . Yang diperhatikan pada penelitian Gu dan Sun (2000) difokuskan pada nilai  $C_d$  pada  $\beta = 0^\circ$ .

Bila dibandingkan antara hasil penelitian Gu dan Sun dengan hasil dari penelitian ini yang dilakukan menggunakan tiga buah silinder dengan masing – masing diberikan dua buah silinder pengganggu pada sudut  $\theta = 30^\circ$  pada variasi jarak *stagger* yang mendekati penelitian Gu dan Sun (2000) yaitu pada  $S/D = 2$  seperti telah dijelaskan pada gambar 4.28 dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag pressure* tertinggi dari penelitian ini lebih rendah ( $CD_p = 0,705$ ) bila dibandingkan dengan nilai koefisien *drag pressure* dari penelitian Gu dan Sun (2000) yang menunjukkan nilai  $CD = 1,185$ .

Hal yang sama juga ditunjukkan pada variasi jarak *stagger*  $S/D = 2,5$  yang menunjukkan bahwa nilai koefisien *drag pressure* dari hasil penelitian ini memiliki nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai koefisien *drag* dari penelitian Gu dan Sun (2000). Dapat dilihat pada tabel 4.3 pada  $S/D = 2,5$  nilai  $CD_p$  tertinggi sebesar 0,467 (dengan penambahan silinder pengganggu) dan tabel 4.6 nilai  $CD_p$  tertinggi sebesar 1,021 sedangkan pada penelitian Gu dan Sun pada jarak *stagger* yang sama memiliki nilai  $C_d$  tertinggi sebesar 1,185.

Data hasil penelitian yang dilakukan tanpa pemberian silinder sirkular pengganggu pada silinder utama yang dicantumkan pada tabel 4.6 diatas dimaksudkan untuk dijadikan acuan nilai koefisien drag awal dari penelitian ini sebelum diberikan penambahan silinder sirkular pengganggu. Sehingga dapat terlihat jelas pengaruh adanya penambahan silinder pengganggu (*inlet disturbance body*) terhadap reduksi gaya drag.

#### **4.6.2 Perbandingan Dengan Hasil Penelitian Bao, et al (2010)**

Selain perbandingan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan secara eksperimen, juga dilakukan perbandingan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan secara numerik. Perbandingan hasil penelitian secara numerik dibandingkan dengan hasil penelitian Bao, et al (2010). Perbandingan hasil

penelitian tidak hanya pada nilai koefisien *drag pressure* nya tapi juga pada nilai *Strouhal Number* yang akan dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.7 Nilai Koefisien Drag Penelitian Bao, et al (2010)

S/D	CDp Numerik		
	Silinder 1	Silinder 2	Silinder 3
1,5	1,163	0,995	1,160
2	1,258	1,255	1,048
2,5	1,305	1,062	1,308

Tabel 4.7 diatas menunjukkan nilai koefisien drag hasil penelitian Bao yang dilakukan secara numerik pada angka *Reynolds* 100. Dari hasil penelitian Bao yang dicantumkan pada tabel diatas dapat diketahui bahwa nilai koefisien drag dari penelitian Bao lebih tinggi bila dibandingkan dengan penelitian ini yang dilakukan tanpa penambahan pengganggu ( Tabel 4.6). Hal ini bisa disebabkan karena pada penelitian ini dilakukan pada bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan penelitian Bao.

Nilai koefisien *drag pressure* secara numerik penelitian ini (tanpa pengganggu) menunjukkan nilai koefisien *drag pressure* tertinggi sebesar 1,021 (S/D = 2,5) sedangkan dari hasil penelitian Bao pada S/D = 2,5 nilai CD = ±1,308. Pada S/D = 2, nilai Cd tertinggi dari penelitian Bao sebesar ±1,258 sedangkan hasil dari penelitian dengan penambahan *inlet disturbance body* pada penelitian ini menunjukkan nilai CDp yang lebih rendah yaitu sebesar 0,469 dan penelitian yang tanpa pengganggu menunjukkan nilai CDp sebesar 0,887.

Untuk besarnya angka *Strouhal* yang terjadi juga dapat dbandingkan antara hasil penelitian ini dengan hasil penelitian yang dilakukan Bao, et al (2010) berdasarkan tabel dibawah ini

Tabel 4.8 Nilai *Strouhal Number* Dengan Penambahan *Inlet Disturbance Body* Pada  $Re\ 2,2 \times 10^4$

S/D	St		
	Silinder 1	Silinder 2	Silinder 3
1,5	0,187	0,184	0,187
2	0,239	0,235	0,215
2,5	0,392	0,202	0,189

Tabel 4.9 Nilai *Strouhal Number* Penelitian Bao, et al (2010)

S/D	St		
	Silinder 1	Silinder 2	Silinder 3
1,5	0,134	0,124	0,134
2	0,139	0,139	0,139
2,5	–	–	–

Berdasarkan tabel 4.8 dan 4.9 diatas dapat diketahui bahwa secara keseluruhan angka *strouhal* pada penelitian dengan penambahan *inlet disturbance body* memiliki angka *Strouhal* yang lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian Bao, et al (2010). Hal ini berkaitan dengan nilai koefisien *drag* yang telah dijelaskan sebelumnya. Telah diketahui bahwa nilai koefisien drag berbanding terbalik dengan nilai *Strouhal Number*, sehingga dapat disimpulkan semakin tinggi nilai *Strouhal* semakin baik kemampuan pengendalian pasif (penambahan *inlet disturbance body*) dalam mereduksi drag yang terbentuk.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

Pada bab ini akan disajikan kesimpulan dari analisa yang telah dijelaskan secara detail pada bab sebelumnya. Selain itu akan disampaikan saran sehingga penelitian ini dapat dilanjutkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

#### **5.1 Kesimpulan**

Adapun kesimpulan dari penelitian yang berjudul “Studi Eksperimen dan Numerik Aliran Melintasi Tiga Buah Silinder Sirkular yang Tersusun Secara *Equilateral Triangular* dengan Penambahan *Inlet Disturbance Body* (studi kasus rasio jarak antar silinder S/D 1,5; 2 dan 2,5 pada sudut  $\theta = 30^0$ ) ini antara lain:

1. Dilihat dari karakteristik aliran yang terbentuk berdasarkan grafik distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) dan *velocity pathlines* pada kelompok silinder yang tersusun *equilateral triangular* dengan penambahan dua buah *inlet disturbance body* pada bagian depan masing – masing silinder utama, terlihat fenomena *reattachment* pada silinder. Fenomena tersebut ditandai adanya *bubble separation* yang terbentuk pada masing – masing variasi jarak *stagger*.
2. Hasil numerik lebih bisa menjelaskan fenomena yang terjadi pada aliran secara detail dibandingkan dengan hasil eksperimen seperti ditunjukkan pada grafik distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) dimana grafik koefisien tekanan hasil eksperimen tidak dapat menjelaskan secara detail fenomena terbentuknya *bubble separation* dan *reattachment* aliran.
3. Berdasarkan *strouhal number* yang terbentuk diketahui bahwa nilai *strouhal number* tertinggi terjadi pada variasi jarak *stagger* S/D = 2,5. Hal ini berkorelasi dengan hasil eksperimen yang menunjukkan hasil reduksi drag optimum terjadi pada S/D = 2,5.
4. Reduksi drag optimum yang terbentuk pada penelitian ini terjadi pada variasi jarak *staggered* (S/D) = 2,5. Reduksi silinder 1 sebesar 63,7% (numerik), 61,86% (eksperimen), silinder 2 sebesar 83,7% (numerik), 47,4%(eksperimen), dan silinder 3 sebesar 86,28%(numerik), 79,13%(eksperimen) dibandingkan dengan penelitian dari Gu dan Sun.

5. Adanya perbedaan antara hasil numerik dan eksperimen disebabkan karena eksperimen dilakukan secara 3D sedangkan numerik dilakukan secara 2D.

## 5.2 Saran

Masih banyak hal menarik yang bisa dikaji lebih dalam yang erat kaitannya dengan permasalahan dinamika fluida khususnya pada permasalahan reduksi gaya drag pada silinder baik secara *in-line*, *tandem*, *equilateral triangular* maupun *equidistance*.

Adapun beberapa hal yang harus diperhatikan dalam proses pengambilan data baik secara numerik maupun eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Secara numerik kualitas *meshing* harus diperhatikan agar dapat mendapatkan hasil kualitas karakteristik aliran yang baik.
2. Untuk pengambilan data secara numerik pemberian kondisi batas, kondisi awal serta properti fluida juga harus diperhatikan terutama jika digunakan untuk memvalidasi hasil eksperimen sehingga data hasil *post processing* yang didapatkan bisa akurat.
3. Untuk pengambilan data secara eksperimen dengan meminimalisir ketidakpastian pengukuran dengan cara menggunakan alat ukur yang sudah dikalibrasi secara berkala dan dapat terbaca secara jelas nilai pengukurannya pada mata normal.

## DAFTAR PUSTAKA

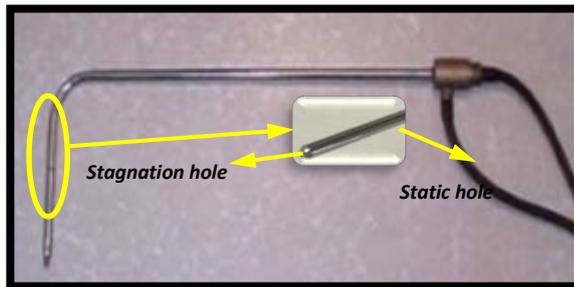
- Akilli, H., Akar, A. dan Karakus, C., 2004, "Flow characteristics of circular cylinders arranged side by side in shallow water". *J. Flow Measurement and Instrumentation* 15 (2004), 187- 197.
- Alam, M.Md., 2003, "Reduction of fluid forces acting on a single circular cylinder and two circular cylinders by using tripping rods". *J. Fluids and Structures* 18 (2003), 347- 366.
- Alam, M.Md. dan Meyer, P.J., 2013, "Global aerodynamic instability of twin cylinders in cross flow". *J. Fluids and Structures* 41 (2013), 135 – 145.
- Bao, Y., Zhou, D. Dan Huang, C., 2010, "Numerical simulation of flow over three circular cylinders in equilateral arrangements at low Reynolds number by a second order characteristics based split finite element method". *J. Computers and Fluids* 39 (2010), 882 – 899.
- Fox, W.R, Pritchard, J.P dan McDonald, T.A,(2010), *Introduction to Fluid Mechanics*, 7<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Gu, Z. Dan Sun, T., 2000, "Classification of flow pattern on three circular cylinders in equilateral – triangular arrangements". *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89 (2001), 553 – 568.
- Potter, C.M dan Wiggert, C.D, (2011), *SCHAUM'S Outlines Mekanika Fluida*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Sumner, D., Wong, T.S.S., Price, J.S., dan Paidoussis, P.M., 1998, "Fluid behaviour of side by side circular cylinders in steady cross flow". *J. Fluids and Structures* 13 (1999), 309 – 338.
- Tatsuno, M., Amamoto, H. Dan Ishi – i, K., 1997, "Effect of interference among three equidistantly arranged cylinders in a uniform flow", *Fluid Dynamics Research* 22 (1998), 297 – 315.
- Widodo, A. W dan Hidayat, N., 2014, "Experimental Study of Drag Reduction on Circular Cylinder and Reduction of Pressure Drop in Narrow Channels by Using a Cylinder Disturbance Body", *Applied Mechanics and Materials Vol* 493 (2014) pp 198 – 203.
- Wijanarko, V. D dan Widodo, A. W., 2013, "Studi numerik karakteristik aliran melintasi silinder sirkular tunggal dengan bodi pengganggu berbentuk silinder sirkular pada saluran sempit berpenampang bujur sangkar". *Seminar Nasional Teknik Mesin* 8 (2013).

*“ Halaman ini sengaja dikosongkan “*

Lampiran 1. : Gambar Benda Uji (Silinder) dan Alat ukur



Gambar 1. Benda Uji Silinder Sirkular (tiga buah)

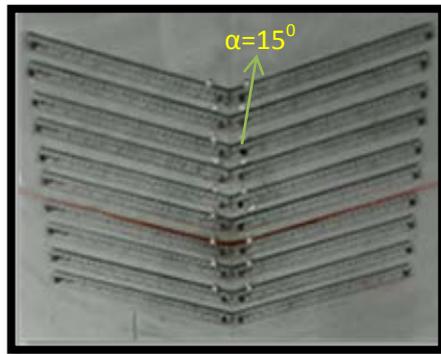


Gambar 2. Pitot Tube



Gambar 3. Tranduser Tekanan dan Data Aquisisi  
(DAQ tipe OMEGA)

Lampiran 2.:



Gambar 4. Inclined Manometer (bentuk V)



Gambar 5. Filler Gauge



Gambar 6. Termometer Digital  
(Alat ukur kelembaban dan Temperatur)

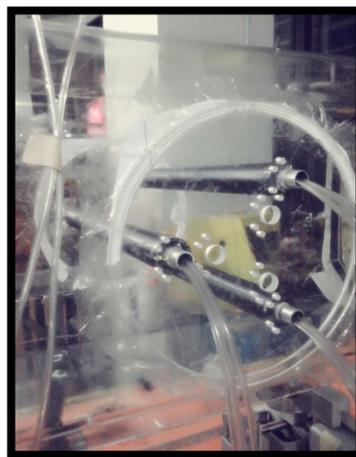
Lampiran 3 :



Gambar 7. Inverter



Gambar 8. *Open circuit subsonic wind tunnel*

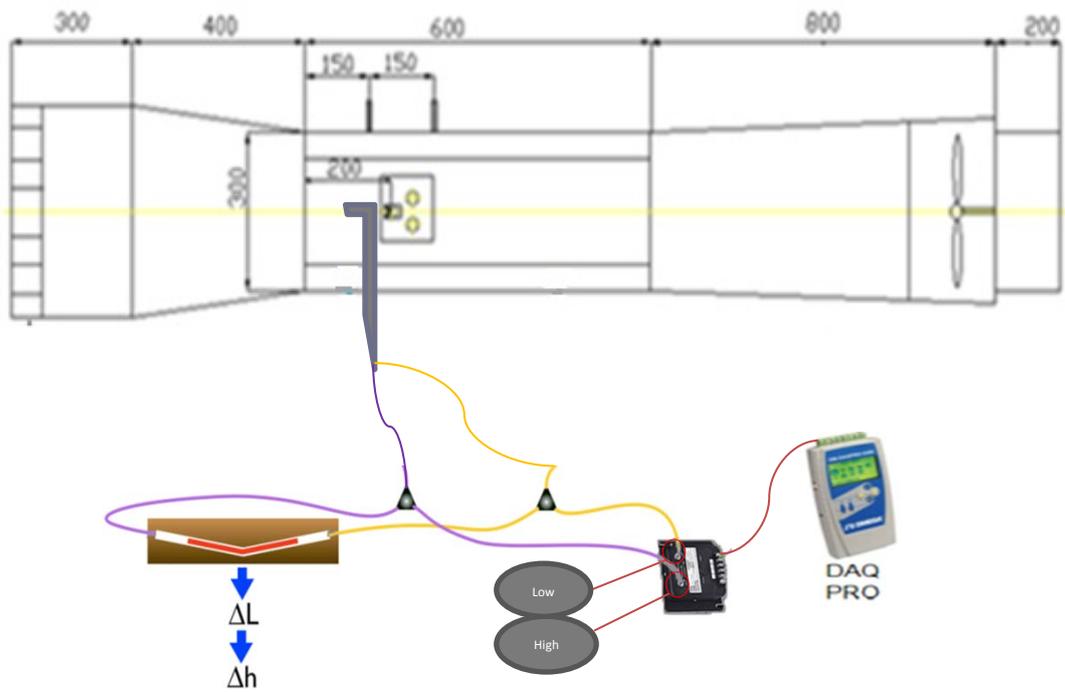


Gambar 9. Posisi benda uji pada *test section wind tunnel*

Lampiran 4 :



Gambar 10. *Inlet Disturbance Body*



Gambar 11. Skema Kalibrasi Tranduser Tekanan

## RIWAYAT PENULIS



Intan Hardiatama lahir di Kediri tanggal 28 April 1989, merupakan anak pertama dari Ibu Sri Utami dan Bapak Suhardi. Riwayat pendidikan penulis diawali dari TK Kemala Bhayangkari 41 dan SDN Bandar Kidul II. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama dan menengah atas di SMPN 1 Kediri dan SMAN 2 Kediri. Tahun 2007 penulis diterima Universitas Jember Jurusan Teknik Mesin melalui jalur PMDK dan lulus pada bulan November 2011. Pada tahun 2013, penulis diterima program Master di Institut Teknologi Sepuluh Nopember bidang keahlian Rekayasa Konversi Energi melalui jalur beasiswa BPP - DN Dikti.

Selama kuliah di jenjang Strata 1, penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan, diantaranya pernah menjadi sekretaris Himpunan Mahasiswa Mesin Universitas Jember periode 2008-2009, bendahara Himpunan Mahasiswa Mesin Universitas Jember periode 2009-2010, bendahara Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Jember. Di bidang akademik penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Konversi Energi Teknik Mesin Universitas Jember periode 2008- 2011. Pada pertengahan Semester 3 program Master penulis mengambil topik Tesis Mekanika Fluida. Berkat dukungan dari banyak pihak penulis dapat menyelesaikan program Master tepat waktu dan dinyatakan lulus pada Sidang Tesis Jumat, 26 Juni 2015. Kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan demi perkembangan penelitian ini. Apabila ada informasi serta kritik dan saran, pembaca dapat menghubungi penulis melalui email: [hardiatamaintan@gmail.com](mailto:hardiatamaintan@gmail.com).