

**TUGAS AKHIR - TM 184835**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PENAMBAHAN BODI  
PENGANGGU TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN  
MELINTASI DUA SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN  
SECARA TANDEM**

**DRESTANTA VIDYASAKTI WIBOWO**

**NRP 02111840000082**

Dosen Pembimbing

**Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**

**NIP 197104051997021001**

**Program Studi Sarjana Teknik Mesin**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



**TUGAS AKHIR - TM 184835**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PENAMBAHAN BODI  
PENGANGGU TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN  
MELINTASI DUA SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN  
SECARA TANDEM**

**DRESTANTA VIDYASAKTI WIBOWO**

**NRP 02111840000082**

Dosen Pembimbing

**Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**

**NIP 197104051997021001**

**Program Studi Sarjana Teknik Mesin**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



**FINAL PROJECT - TM 184835**

**EXPERIMENTAL STUDY THE EFFECT OF ADDITIONAL  
DISTURBANCE BODY ON THE FLOW CHARACTERISTICS  
PASSING THROUGH TWO CIRCULAR CYLINDERS IN  
TANDEM ARRANGEMENT**

**DRESTANTA VIDYASAKTI WIBOWO**

**NRP 02111840000082**

Advisor

**Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**

**NIP 197104051997021001**

**Mechanical Engineering Undergraduate Program**

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PENAMBAHAN BODI PENGGANGGU TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI DUA SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN SECARA TANDEM

#### TUGAS AKHIR

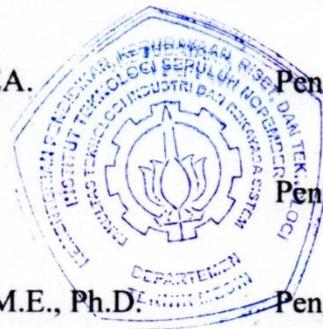
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi Sarjana Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **DRESTANTA VIDYASAKTI WIBOWO**

NRP. 0211184000082

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT. Pembimbing
2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. Penguji
3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng. Penguji
4. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. Penguji



Handwritten signatures in blue ink corresponding to the names in the list above.

**SURABAYA**

**Juli, 2022**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# APPROVAL SHEET

## EXPERIMENTAL STUDY THE EFFECT OF ADDITIONAL DISTURBANCE BODY ON THE FLOW CHARACTERISTICS PASSING THROUGH TWO CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT

### FINAL PROJECT

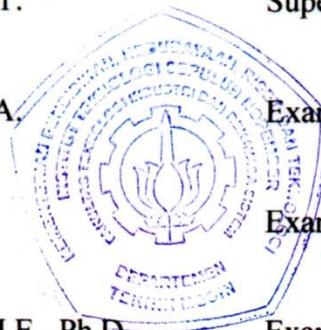
Submitted to fulfill one of the requirements  
For obtaining a Bachelor's Degree at  
Mechanical Engineering Undergraduate Program  
Departement of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Author : **DRESTANTA VIDYASAKTI WIBOWO**

NRP. 0211184000082

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT. Supervisor
2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. Examiner
3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng. Examiner
4. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. Examiner



*(Handwritten signatures in blue ink corresponding to the list above)*

**SURABAYA**

**July, 2022**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

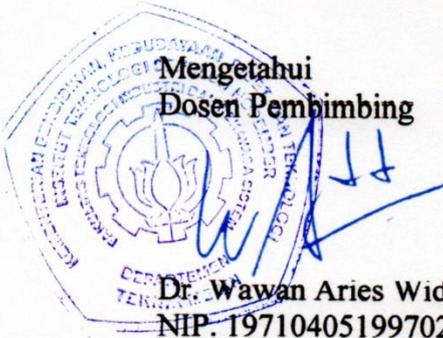
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Drestanta Vidyasakti Wibowo  
Program studi : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT. /  
197104051997021001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Studi Eksperimen Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular yang Tersusun Secara Tandem**” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2022

  
Mengetahui  
Dosen Pembimbing  
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT.  
NIP. 197104051997021001

Mahasiswa

  
Drestanta Vidyasakti Wibowo  
NRP. 0211184000082

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

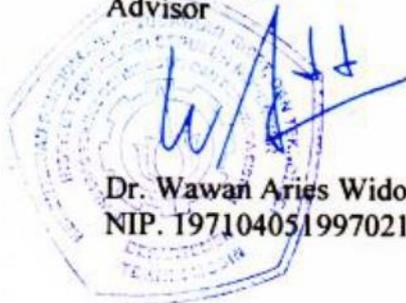
Name of student / NRP : Drestanta Vidyasakti Wibowo  
Department : Mechanical Engineering  
Advisor / NIP : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT. /  
197104051997021001

Herby declare that the Final Project with the title of **“Experimental Study The Effect of Additional Disturbance Body on The Flow Characteristics Passing Through Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement”** is the result of my own work, is original, and isn written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, that I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 2022

Acknowledged  
Advisor



Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT.  
NIP. 197104051997021001

Student

A blue ink signature of Drestanta Vidyasakti Wibowo.

Drestanta Vidyasakti Wibowo  
NRP. 0211184000082

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ABSTRAK

### STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PENAMBAHAN BODI PENGANGGU TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI DUA SILINDER SIRKULAR YANG TERSUSUN SECARA TANDEM

Nama Mahasiswa / NRP : Drestanta Vidyasakti Wibowo / 0211184000082  
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT.

#### Abstrak

Aliran fluida merupakan salah satu fenomena yang sering dijumpai. Aliran fluida ketika melewati suatu bodi berbentuk silinder akan terjadi transisi lapis batas aliran dari laminar menjadi turbulen disebabkan perubahan kecepatan, yang dapat menimbulkan separasi aliran. Separasi yang terjadi akan menyebabkan terbentuknya daerah *wake*, yang dapat menimbulkan gaya *drag*. Salah satu upaya guna mengurangi gaya *drag* yaitu dengan penambahan bodi pengganggu. Penambahan bodi pengganggu diharapkan dapat mempercepat transisi aliran agar menunda titik separasi. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai pengaruh bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran melewati silinder sirkular tersusun tandem.

Penelitian dilakukan secara eksperimen dengan model saluran berpenampang oktagon. Benda uji yang digunakan berupa silinder sirkular dengan diameter  $D = 25$  mm dengan penambahan bodi pengganggu berdiameter  $d = 5$  mm di sisi depan silinder *upstream*. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan pitot *static tube*, *wall-pressure tap* dan *inclined manometer*. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak antara kedua silinder utama dengan rasio  $L/D = 1,5$  hingga  $4,0$  dengan  $Re_{Dh}$  sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $1,33 \times 10^5$  untuk mendapatkan distribusi *Pressure drop* ( $\Delta P$ ), koefisien tekanan ( $C_p$ ), dan koefisien *drag pressure* ( $C_{DP}$ ).

Hasil yang diperoleh penurunan nilai *pressure drop* efektif terjadi pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu pada semua konfigurasi jarak antar silinder ( $L/D$ ). Penambahan bodi pengganggu  $30^\circ$  efektif mempengaruhi distribusi nilai koefisien tekanan. Nilai koefisien *pressure drag* ( $C_{DP}$ ) silinder *upstream* pada seluruh konfigurasi mengalami penurunan sebesar  $47 - 73\%$ .

**Kata Kunci:** Bodi Pengganggu, Silinder Sirkular, Tandem

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ABSTRACT

### EXPERIMENTAL STUDY THE EFFECT OF ADDITIONAL DISTURBANCE BODY ON THE FLOW CHARACTERISTICS PASSING THROUGH TWO CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT

**Student Name / NRP** : Drestanta Vidyasakti Wibowo / 0211184000082  
**Department** : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
**Advisor** : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT.

#### Abstract

Fluid flow is one of the most common phenomena. When the fluid flows through a cylindrical body, there will be a transition of the flow boundary layer from laminar to turbulent due to changes in velocity, which can lead to flow separation. The separation that occurs will cause the formation of a wake area, which can cause a drag force. One of the efforts to reduce the drag force is by adding a nuisance body. The addition of the interfering body is expected to accelerate the flow transition in order to delay the separation point. Therefore, a study was conducted on the effect of the interfering body on the flow characteristics through a circular cylinder arranged in tandem.

The research was conducted experimentally with an octagonal channel model. The test object used is a circular cylinder with a diameter of  $D = 25$  mm with the addition of a disturbing body with a diameter of  $d = 5$  mm on the front side of the upstream cylinder. Measurements in this study used a pitot static tube, wall-pressure tap and inclined manometer. The test is carried out by varying the distance between the two main cylinders with a ratio of  $L/D = 1.5$  to  $4.0$  with  $Re_{Dh}$  of  $9.7 \times 10^4$  and  $1.33 \times 10^5$  to get the distribution of Pressure drop ( $\Delta P$ ), pressure coefficient ( $C_p$ ), and the coefficient of drag pressure (CDP).

The results obtained that the decrease in the value of the effective pressure drop occurs in the tandem cylinder configuration with the interfering body in all configurations of the distance between the cylinders ( $L/D$ ). The addition of a  $30^\circ$  interfering body effectively affects the distribution of the pressure coefficient value. The value of the pressure drag coefficient (CD<sub>p</sub>) of the upstream cylinder in all configurations has decreased by 47 – 73%.

**Keywords:** *Circular Cylinder, Disturbance Body, Tandem*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Penulis mengucapkan Alhamdulillah, puji syukur kehadirat Allah SWT. yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan Tugas Akhir ini dengan lancar. Penulisan ini ditujukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar sarjana Teknik dengan judul tugas akhir “**Studi Eksperimen Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular yang Tersusun Secara Tandem**”. Penulis menyadari penulisan Tugas Akhir ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga, khususnya orang tua tercinta yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan do'a kepada penulis.
2. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberi bimbingan, arahan, semangat serta susu kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., Nur Ikhwan, S.T., M.Eng., Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph.D., selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang sangat membangun.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Mesin yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
5. Aceng, Deny, Kanda, Yapi. sebagai rekan satu bimbingan Tugas Akhir penulis yang telah memberikan dukungan, motivasi, bantuan, dan ilmu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Segenap keluarga besar Lab. Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida Teknik Mesin ITS yang senantiasa memberi dukungan dan perhatian luar biasa kepada penulis.
7. Bapak Tris yang telah membantu dalam pembuatan alat serta memberikan nasehat yang sangat bermanfaat
8. Teman-teman M61 sekalian yang telah menemani dan memberi dukungan kepada penulis selama masa kuliah.
9. Teman-teman ysc yang senantiasa memberikan semangat dalam berbagai aktivitas.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu oleh penulis

Penulis menyadari karya tulis ini tidak luput dari berbagai kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik dari berbagai pihak sangatlah membantu untuk pengembangan penelitian dimasa mendatang. Terima kasih.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	5
2.1.1 Pengaruh Variasi Sudut Bodi Pengganggu terhadap Distribusi Koefisien Tekanan (Cp)	5
2.1.2 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu terhadap Gaya Hambat pada Silinder Sirkular	6
2.1.3 Penurunan Pressure Drop pada Saluran	8
2.1.4 Karakteristik Aliran Melintasi Dua Silinder Tersusun Secara Tandem	9
2.1.5 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Tersusun Tandem	12
2.2 Dasar Teori	13
2.2.1 Boundary Layer	13
2.2.2 Aliran Inviscid dan Viscous	14
2.2.3 Pressure Drop	15
2.2.4 Pressure Coefficient	16
2.2.5 Tekanan	16
2.2.6 Bilangan Reynolds	17
2.2.7 Drag Pressure	17
	xv

BAB 3 METODOLOGI	19
3.1 Skema Penelitian	19
3.2 Parameter yang Dianalisis	19
3.2.1 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Koefisien Tekanan pada Silinder	20
3.3 Peralatan	21
3.3.1 <i>Wind Tunnel</i> (Terowongan angin)	21
3.3.2 Centrifugal Fan	22
3.3.3 Inverter	23
3.3.4 Nozzle dan Honeycomb	23
3.3.5 Benda Uji	23
3.3.6 Alat Ukur	25
3.4 Prosedur Pengambilan Data	26
3.5 Data Penelitian	27
3.6 Diagram Alir Penelitian	28
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Tunggal	29
4.2 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Upstream dan Silinder Downstream Konfigurasi Tandem tanpa Bodi Pengganggu	30
4.3 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Upstream dan Silinder Downstream Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu 30°	33
4.4 Distribusi Koefisien <i>Pressure Drag</i> Silinder Konfigurasi Tandem	36
4.5 Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder Tandem	37
4.6 Perbandingan Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada Konfigurasi Tandem	39
4.6.1 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada Konfigurasi Tandem Variasi Jarak L/D 1,5	40
4.6.2 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada Konfigurasi Tandem Variasi Jarak L/D 4,0	42
4.7 Pressure Drop pada Konfigurasi Silinder Tandem	45
4.8 Diskusi	47
BAB 5 Kesimpulan dan Saran	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN	54

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Grafik distribusi koefisien tekanan konfigurasi silinder tunggal. (CP): (a) $D = 25$ mm, $Re_{Dh} = 11,6 \times 10^4$ ; (b) $D = 25$ mm, $Re_{Dh} = 15,6 \times 10^4$ ; (c) $D = 37,5$ mm, $Re_{Dh} = 11,6 \times 10^4$ ; (d) $D = 37,5$ mm, $Re_{Dh} = 15,6 \times 10^4$ . (Hidayat & Widodo, 2014) .....	5
<b>Gambar 2.2</b>	Visualisasi aliran diantara silinder dan <i>control rod</i> untuk $d/D = 0,233$ ; (a) $L/D = 2,0$ ; (b) $L/D = 2,08$ ; (c) $L/D = 2,5$ ; (d) $L/D = 3,0$ . (Lee, et al., 2004) .....	6
<b>Gambar 2.3</b>	Grafik pengaruh posisi <i>control rod</i> terhadap penurunan koefisien hambatan silinder utama. (Lee, et al., 2004).....	7
<b>Gambar 2.4</b>	Skema penelitian. (a) konfigurasi penempatan bodi pengganggu, (b) blok dudukan silinder utama dan bodi pengganggu. (Alam, et al., 2003) .....	7
<b>Gambar 2.5</b>	Pengaruh penempatan bodi pengganggu pada silinder sirkular: $\Delta$ , $d = 4$ mm; $\bullet$ , $d = 5$ mm; $\square$ , $d = 6$ mm. (Alam, et al., 2003).....	8
<b>Gambar 2.6</b>	Grafik <i>pressure drop</i> terhadap bilangan <i>Reynolds</i> ; (a) $D = d$ ; (c) $D = 2d$ ; (e) $D = 3d$ . (Daloglu, 2007).....	9
<b>Gambar 2.7</b>	Skema penelitian dengan dua silinder tersusun tandem. (Alam, et al., 2003) .	10
<b>Gambar 2.8</b>	Koefisien <i>drag</i> dengan variasi $L/D$ . (Alam, et al., 2003).....	10
<b>Gambar 2.9</b>	Koefisien <i>pressure</i> dengan variasi $L/D$ ; (a) <i>upstream</i> silinder; (b) <i>downstream</i> silinder. (Alam, et al., 2003) .....	11
<b>Gambar 2.10</b>	Interferensi yang terjadi pada susunan dua silinder secara <i>side-by-side</i> , tandem, dan <i>staggered</i> . (Zdravkovich, 1987) .....	11
<b>Gambar 2.11</b>	Skema penelitian. (Daman & Widodo, 2014) .....	12
<b>Gambar 2.12</b>	Grafik distribusi koefisien tekanan silinder <i>upstream</i> pada konfigurasi tandem; (a) tanpa bodi pengganggu; (b) dengan bodi pengganggu. (Daman & Widodo, 2014) .....	13
<b>Gambar 2.13</b>	Grafik distribusi koefisien tekanan silinder <i>downstream</i> pada konfigurasi tandem; (a) tanpa bodi pengganggu; (b) dengan bodi pengganggu. (Daman & Widodo, 2014).....	13
<b>Gambar 2.14</b>	Skema <i>Boundary layer</i> (Pritchard, et al., 2011) .....	14
<b>Gambar 2.15</b>	Ilustrasi aliran (a) <i>Inviscid</i> ; (b) <i>Viscous</i> (Pritchard, et al., 2011).....	14
<b>Gambar 2.16</b>	<i>Boundary layer</i> dengan <i>adverse pressure gradient</i> (Pritchard, et al., 2011).....	15
<b>Gambar 3.1</b>	Ilustrasi <i>test section</i> .....	19
<b>Gambar 3.2</b>	Susunan <i>wind tunnel</i> .....	22
<b>Gambar 3.3</b>	<i>Centrifugal fan</i> .....	22
<b>Gambar 3.4</b>	<i>Inverter</i> .....	23
<b>Gambar 3.5</b>	Silinder sirkular utama.....	24
<b>Gambar 3.6</b>	Skema silinder sirkular utama.....	24
<b>Gambar 3.7</b>	Bodi Pengganggu .....	24
<b>Gambar 3.8</b>	Skema bodi pengganggu .....	25
<b>Gambar 3.9</b>	<i>Wall-pressure tap</i> .....	25
<b>Gambar 3.10</b>	<i>Pitot static tube</i> .....	26
<b>Gambar 3.11</b>	<i>Inclined manometer</i> .....	26
<b>Gambar 3.12</b>	Diagram alir penelitian .....	28

<b>Gambar 4.1</b>	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Tunggal Penelitian ini dengan (Hidayat & Widodo, 2014).....	30
<b>Gambar 4.2</b>	<i>Pressure drop</i> terhadap $Re_{Dh}$ pada konfigurasi a) tanpa bodi pengganggu; b) dengan bodi pengganggu $30^\circ$ .....	46
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) <i>Upstream</i> ; (b) <i>Downstream</i> pada Konfigurasi Tandem Tanpa Bodi Pengganggu untuk Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$ .....	32
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) <i>Upstream</i> ; (b) <i>Downstream</i> pada Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu $30^\circ$ untuk Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$ .....	35
<b>Gambar 4.5</b>	Koefisien <i>Pressure Drag</i> Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$ .....	36
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder Tanpa Bodi Pengganggu pada Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$ .....	38
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder dengan Bodi Pengganggu $30^\circ$ pada Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$ .....	39
<b>Gambar 4.8</b>	Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) <i>Upstream</i> , (b) <i>Downstream</i> , dengan Variasi Jarak $L/D$ 1,5.....	41
<b>Gambar 4.9</b>	Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Tandem dengan Variasi Jarak ( $L/D$ ) 1,5.....	42
<b>Gambar 4.10</b>	Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) <i>Upstream</i> , (b) <i>Downstream</i> , dengan Variasi Jarak $L/D$ 4,0.....	43
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Tandem dengan Variasi Jarak ( $L/D$ ) 4,0.....	44
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik Perbandingan Distribusi Koefisien <i>Pressure Drag</i> .....	47

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4.1</b>	Posisi Sudut <i>re-attachment</i> dan Separasi Silinder <i>Downstream</i> pada Konfigurasi Silinder Tandem Tanpa Bodi Pengganggu .....	32
<b>Tabel 4.2</b>	Posisi Sudut <i>re-attachment</i> dan Separasi Silinder <i>Downstream</i> pada Konfigurasi Silinder Tandem dengan Bodi Pengganggu 30° .....	35

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Aliran fluida merupakan salah satu fenomena yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Aliran air pada sungai, aliran gas pada suatu sistem perpipaan hingga aliran udara pada sistem pernafasan merupakan beberapa contoh fenomena aliran fluida. Dengan luasnya cakupan dari fenomena aliran fluida, maka penelitian mengenai fenomena ini memiliki potensi yang sangat besar untuk dilakukan. Berbagai fenomena aliran fluida banyak ditemukan dalam dunia industri salah satunya fenomena aliran fluida melintasi suatu benda ataupun saluran, seperti pondasi anjungan lepas pantai, jembatan, gedung pencakar langit, kendaraan, dan konstruksi bangunan lainnya. Fluida ketika melintasi suatu penampang dengan bentuk tertentu pasti memiliki efek atau gejala yang berbeda-beda. Pada dunia teknik benda tersebut dapat disebut sebagai *bluff body*. *Bluff body* yang dilalui fluida akan mengalami gaya akibat interaksi dengan fluida. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menentukan karakteristik aliran fluida yang melintasi *bluff body*. Dengan mengetahui karakteristiknya maka akan lebih mudah untuk dianalisis serta dikembangkan untuk kemudian dimanfaatkan baik untuk penelitian maupun penggunaan di lapangan.

Penelitian mengenai upaya penurunan gaya *drag* pada silinder sirkular dilakukan oleh **Lee, et al. (2004)**. dengan menggunakan bodi pengganggu yang diletakkan pada sisi *upstream* silinder utama. Penelitian dilakukan pada bilangan *Reynolds* sebesar  $2 \times 10^4$  dengan benda kerja berupa silinder sirkular berdiameter  $D = 30\text{mm}$  serta bodi pengganggu dengan rasio diameter  $d/D = 0,133$  hingga  $0,267$ . Penelitian menunjukkan peletakan silinder utama di belakang bodi pengganggu, di daerah pembentukan *wake* dapat menyebabkan penurunan tekanan pada permukaan silinder utama. Hasil penelitian juga menunjukkan penurunan koefisien *drag* yang bekerja pada silinder utama dengan penurunan terbesar adalah 29% yaitu ketika menggunakan bodi pengganggu dengan diameter  $d = 7\text{ mm}$  atau pada rasio diameter  $d/D = 0,233$  ketika dibandingkan dengan aliran tanpa bodi pengganggu.

**Alam, et al. (2003)** melakukan penelitian mengenai karakteristik aliran yang melewati silinder sirkular tunggal dan silinder sirkular yang disusun secara tandem dengan penambahan bodi pengganggu. Penelitian dilakukan pada bilangan *Reynolds*  $5,5 \times 10^4$ . Benda kerja yang digunakan berupa silinder sirkular utama dengan diameter  $D = 49\text{ mm}$  serta bodi pengganggu dengan variasi diameter  $d = 4\text{ mm}$  hingga  $d = 6\text{ mm}$ . Untuk sudut bodi pengganggu diatur pada sudut  $\alpha = 20^\circ$  hingga  $\alpha = 60^\circ$  yang tersusun secara simetris. Dari penelitian diketahui bahwa sudut yang dapat mereduksi gaya *drag* optimum dari susunan tersebut ketika bodi pengganggu dengan diameter  $d = 5\text{ mm}$  berada pada sudut  $\alpha = 30^\circ$ . Pada susunan silinder sirkular utama tandem, penggunaan bodi pengganggu secara efektif mengurangi fenomena *bistable* pada aliran. Gaya fluida yang bekerja pada silinder utama *upstream* juga cenderung mendekati konstan, terlepas dari adanya variasi jarak.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh **Daman, et al. (2014)** membahas mengenai pengaruh penambahan *inlet disturbance body* terhadap karakteristik aliran melewati silinder sirkular yang tersusun secara tandem. Bilangan *Reynolds* yang digunakan pada penelitian tersebut yaitu  $1,56 \times 10^5$ . Penelitian dilakukan menggunakan *wind tunnel* sebagai *test section*. *Inlet disturbance*

*body* yang digunakan pada penelitian tersebut memiliki diameter  $d = 4$  mm yang diletakkan pada sisi silinder *upstream* yang berdiameter  $D = 25$  mm. Penelitian dilakukan dengan penempatan *inlet disturbance body* pada sudut  $\alpha = 30^\circ$  serta menggunakan variasi jarak antara kedua silinder utama dengan rasio  $L/D$  sebesar 1,5 hingga 4,0. Penelitian menunjukkan penambahan bodi pengganggu pada sudut  $\alpha = 30^\circ$  di depan silinder *upstream* dapat menunda separasi aliran disebabkan terjadinya *bubble separation* pada silinder *upstream*, hal ini juga menghasilkan nilai koefisien *drag* yang rendah. Susunan silinder utama dan bodi pengganggu seperti ini mengakibatkan nilai koefisien *drag* silinder *downstream* pada susunan tandem lebih tinggi daripada silinder *downstream* pada susunan silinder tanpa bodi pengganggu. Interaksi *wake* silinder *upstream* juga semakin berkurang seiring dengan adanya variasi penambahan rasio jarak  $L/D$ .

Berdasarkan penjelasan tentang fenomena aliran melewati silinder sirkular dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka pada penelitian ini akan diamati fenomena aliran melewati silinder sirkular yang tersusun secara tandem dengan menggunakan dua kendali pasif untuk menurunkan koefisien *drag* yang diterima silinder sirkular. Serta pada penelitian ini juga diamati *pressure drop* dari beberapa variasi susunan. Dari penelitian ini dilihat pengaruh variasi susunan yang dilakukan terhadap distribusi koefisien tekanan, koefisien *drag*, dan *pressure drop* pada instalasi saluran.

## 1.2 Rumusan Masalah

Aliran fluida ketika melewati suatu bodi berbentuk silinder akan membentuk suatu *boundary layer*. Ketika aliran fluida tidak memiliki momentum yang cukup melawan gaya yang timbul sepanjang penampang suatu bodi, maka pada *boundary layer* ini akan terjadi transisi lapis batas aliran dari laminar menjadi turbulen disebabkan perubahan kecepatan yang mempengaruhi tekanan yang terjadi. Pada daerah turbulen ketika momentum aliran tidak mampu untuk melawan efek gesekan dan *adverse pressure gradient* maka aliran akan mengalami pemisahan dari kontur sehingga terjadi separasi. Separasi yang terjadi akan menyebabkan terbentuknya daerah *wake*. Ketika separasi aliran terjadi lebih awal akan menimbulkan terbentuknya daerah *wake* yang lebar, sehingga gaya *drag* pada silinder akan lebih besar. Salah satu upaya guna mengurangi gaya *drag* yaitu penerapan *passive flow control* dengan memberi penambahan bodi pengganggu. Bodi pengganggu memiliki berbagai macam jenis, salah satunya yaitu silinder sirkular. Penambahan bodi pengganggu diharapkan dapat mempercepat transisi aliran sehingga aliran lebih mampu melawan *adverse pressure gradient* serta menunda titik separasi dengan begitu daerah *wake* yang timbul dapat dipersempit sehingga gaya *drag* juga ikut menurun.

Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk melihat besar pengaruh penambahan bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran yang melewati silinder dan menemukan instalasi yang tepat agar diperoleh pengurangan gaya *drag* yang optimum. Penelitian ini dilakukan guna mengetahui pengaruh penambahan bodi pengganggu terhadap penurunan koefisien hambat dan pengaruh variasi  $L/D$  susunan dua silinder utama terhadap *pressure drop* sehingga diperoleh hasil koefisien hambat dan *pressure drop* terendah. Penelitian ini menggunakan dua buah silinder sirkular dengan variasi jarak  $L/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$  serta penambahan dua bodi pengganggu dengan pengaturan sudut  $\alpha = 30^\circ$  yang diletakkan di depan silinder utama *upstream*.

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah agar pembahasan dalam penelitian ini lebih fokus dan tidak melebar dari tujuan awal. Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Fluida kerja yang digunakan merupakan udara dalam keadaan uniform, *steady* pada sisi *upstream duct*, serta bersifat *incompressible flow*.
2. Benda uji terdiri dari dua buah silinder sirkular yang tersusun secara tandem dengan dua buah bodi pengganggu berbentuk silinder sirkular.
3. Kecepatan awal fluida dijaga dalam kondisi konstan, dengan bilangan Reynolds sebesar  $9.71 \times 10^4$  dan  $1,33 \times 10^5$ .
4. Efek perpindahan panas yang terjadi pada *test suction* diabaikan.
5. Diameter silinder utama sebesar  $D = 25$  mm dan bodi pengganggu sebesar  $d = 5$  mm.
6. Variasi rasio jarak silinder utama ( $L/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$ ) dengan penempatan bodi pengganggu pada sudut  $\alpha = 30^\circ$  dari tengah *duct* dan jarak  $\delta = 4$  mm.

### 1.4 Tujuan

Adapun tujuan umum dari penelitian ini yaitu guna mengetahui karakteristik aliran ketika melintasi dua silinder sirkular yang disusun secara tandem dengan penambahan dua buah bodi pengganggu untuk variasi jarak antara kedua silinder ( $L/D$ ) sebesar 1,5 sampai 4,0. Variasi bilangan Reynolds yang digunakan sebesar  $9.71 \times 10^4$  dan  $1,33 \times 10^5$ . Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui *pressure drop* antara saluran berpenampang oktagonal sisi *upstream* dan *downstream*.
2. Mengetahui dan menganalisis koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada silinder sirkular utama guna mengetahui fenomena aliran yang terjadi dan menentukan nilai koefisien *drag pressure* ( $C_{DP}$ ).
3. Mengetahui profil kecepatan aliran yang melewati silinder sirkular yang tersusun secara tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sisi silinder *upstream*.

### 1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman secara kualitatif dan kuantitatif mengenai karakteristik aliran fluida yang melewati dua buah silinder sirkular yang disusun secara tandem dengan dua buah bodi pengganggu.
2. Memberikan penjelasan mengenai pengaruh pengaturan variasi jarak silinder dengan penempatan dua bodi pengganggu terhadap nilai *pressure drop* dan *drag force* pada saluran berpenampang oktagonal.
3. Memberikan gambaran mengenai perbedaan profil kecepatan aliran pada dua buah silinder sirkular yang melewati saluran berpenampang oktagonal yang diberi dua bodi pengganggu dengan saluran yang tidak diberi bodi pengganggu.

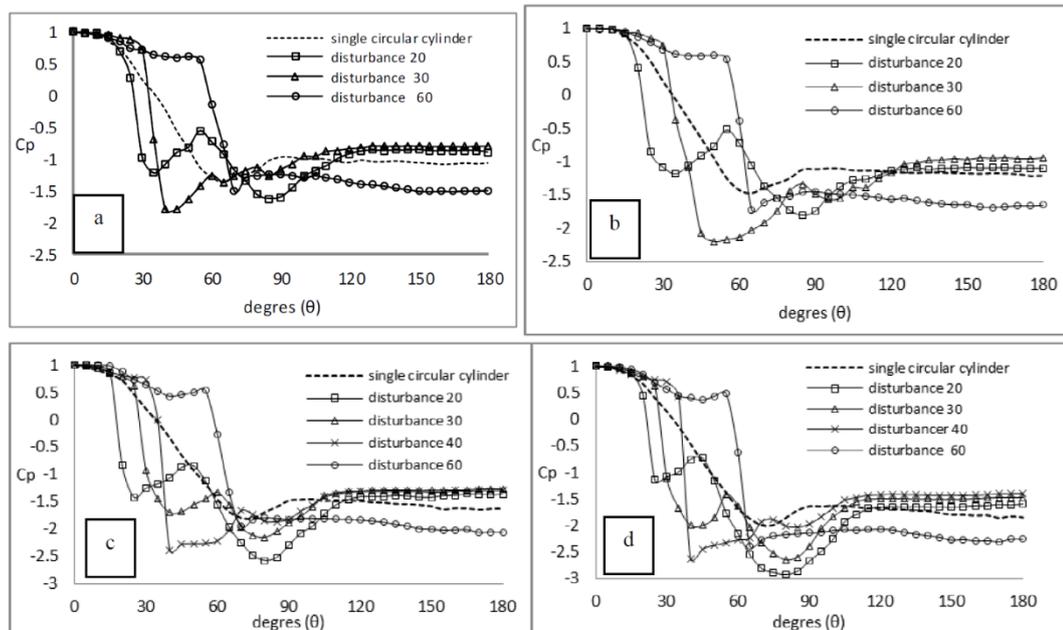
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

#### 2.1.1 Pengaruh Variasi Sudut Bodi Pengganggu terhadap Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ )

Penelitian mengenai karakteristik aliran fluida melintasi suatu penampang dengan variasi penempatan sudut bodi pengganggu dilakukan oleh **Hidayat & Widodo (2014)**. Penelitian dilakukan menggunakan saluran sempit berpenampang bujur sangkar. Benda uji yang digunakan pada penelitian merupakan silinder sirkular dengan diameter  $D = 25$  mm dan  $37,5$  mm dengan konfigurasi rasio perbandingan bodi pengganggu dengan silinder utama  $d/D = 0,16$  dan  $0,107$ . Bilangan Reynolds yang digunakan berada pada rentang,  $Re = 5,21 \times 10^4$  hingga  $15,6 \times 10^4$ . Penelitian dilakukan dengan variasi sudut bodi pengganggu  $\alpha = 20^\circ$  hingga  $\alpha = 60^\circ$ , diletakkan di sisi depan atas dan bawah silinder sirkular utama.



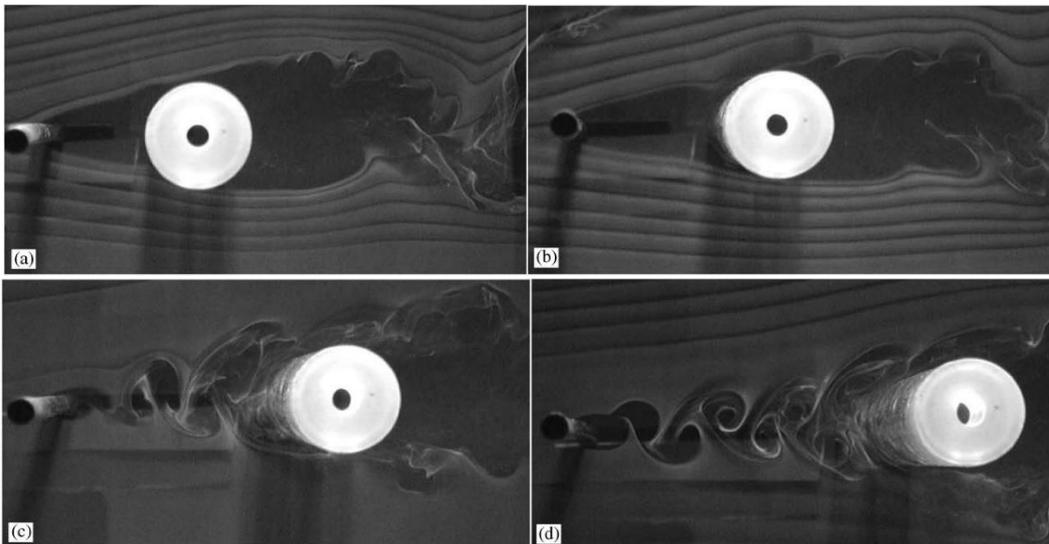
**Gambar 2. 1** Grafik distribusi koefisien tekanan konfigurasi silinder tunggal. ( $C_p$ ): (a)  $D = 25$  mm,  $Re_{Dh} = 11,6 \times 10^4$ ; (b)  $D = 25$  mm,  $Re_{Dh} = 15,6 \times 10^4$ ; (c)  $D = 37,5$  mm,  $Re_{Dh} = 11,6 \times 10^4$ ; (d)  $D = 37,5$  mm,  $Re_{Dh} = 15,6 \times 10^4$ . (**Hidayat & Widodo, 2014**)

Pada gambar 2.1, merupakan Grafik konfigurasi (a) dan (b) menunjukkan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada variasi sudut bodi pengganggu  $\alpha = 20^\circ$  dan  $\alpha = 30^\circ$  terjadi penundaan titik separasi pada sudut  $\pm 120^\circ$ . Kondisi ini mengindikasikan bahwa gaya hambat pada konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu lebih kecil ketika dibandingkan dengan silinder tunggal, dimana titik separasinya terjadi pada sudut  $\pm 90^\circ$ . Penempatan bodi pengganggu pada sudut tersebut mengakibatkan lapis batas dari silinder utama lebih cepat bertransisi dari laminar menjadi turbulen. Hal ini menimbulkan penundaan titik separasi aliran pada silinder utama. Penundaan titik separasi membuat daerah *wake* yang terbentuk menjadi lebih sempit, maka gaya hambat yang bekerja pada silinder utama menjadi lebih kecil.

Grafik konfigurasi (c) dan (d) distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada variasi sudut bodi pengganggu  $\alpha = 20^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$  dan  $\alpha = 40^\circ$  mengindikasikan nilai gaya hambat yang lebih kecil dibandingkan dengan silinder tunggal. Hal ini disebabkan oleh terjadinya penundaan titik separasi yang terjadi pada sudut  $\pm 110^\circ$ , ketika silinder tunggal mengalami separasi pada sudut  $\pm 85^\circ$ . Penundaan titik separasi mengindikasikan timbulnya gaya hambat yang lebih kecil.

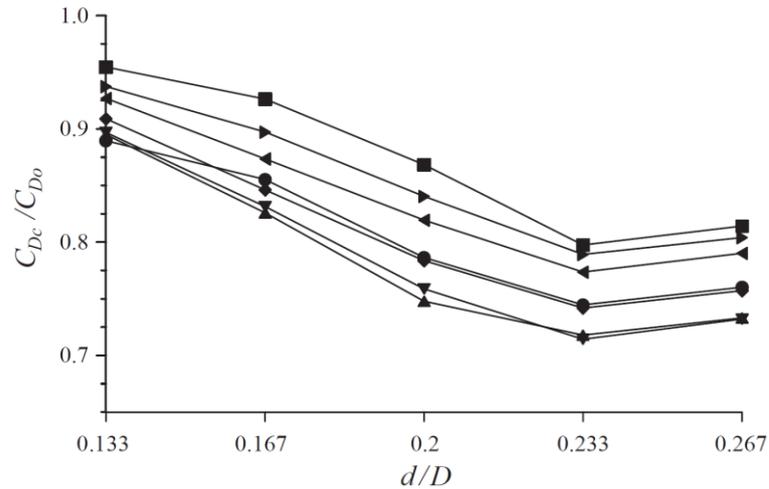
### 2.1.2 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu terhadap Gaya Hambat pada Silinder Sirkular

Lee, et al. (2004) melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan *control rod* terhadap penurunan gaya hambat pada silinder sirkular. Penelitian dilakukan secara eksperimen dengan menggunakan bilangan *Reynolds* sebesar  $Re = 2 \times 10^4$ . Penggunaan silinder yang memiliki besar diameter  $D = 30$  mm disusun secara tandem dengan *control rod* disisi *upstream* silinder. Penelitian ini menggunakan variasi jarak longitudinal antara *control rod* dengan silinder sirkular  $L/D = 1,5$  hingga  $4,0$  dan variasi diameter dari *control rod* yang digunakan yaitu diantara  $0,133 \leq d/D \leq 0,267$ .



**Gambar 2.2** Visualisasi aliran diantara silinder dan *control rod* untuk  $d/D = 0,233$ ; (a)  $L/D = 2,0$ ; (b)  $L/D = 2,08$ ; (c)  $L/D = 2,5$ ; (d)  $L/D = 3,0$ . (Lee, et al., 2004)

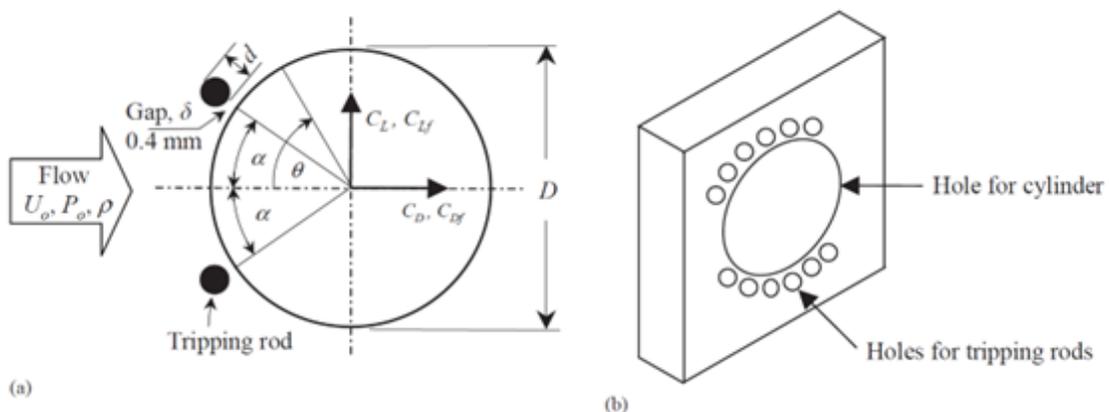
Pada gambar 2.2 menunjukkan visualisasi aliran ketika melewati silinder utama dan *control rod* untuk rasio jarak  $L/D = 2,0$  hingga  $3,0$  dengan rasio diameter *control rod* sebesar  $d/D = 0,233$ . Pada gambar 2.2 (a) dan (b), dapat diamati bahwa untuk jarak tertentu tidak terjadi pelepasan *vortex* yang terjadi karena adanya interferensi timbal balik dari kedua benda uji yang berdekatan. Lapisan geser yang terpisah setelah melewati *control rod* kembali menempel dengan silinder utama pada sisi atas dan bawah secara perlahan pada sudut  $\pm 40^\circ$ . Seiring bertambahnya jarak antara kedua silinder ketika gap yang ada melampaui rasio jarak kritis ( $L_c/D \geq 2,081$ ) maka akan timbul *vortex* di belakang *control rod*. Pada gambar 2.2 (c) dan (d) dapat diamati bahwa *vortex* mulai timbul di belakang *control rod*, Hal ini mengakibatkan kecepatan aliran yang berada di depan silinder utama lebih tinggi dibandingkan susunan pada gambar 2.2 (a) dan (b). Fenomena ini dapat menghasilkan reduksi gaya hambat yang lebih besar.



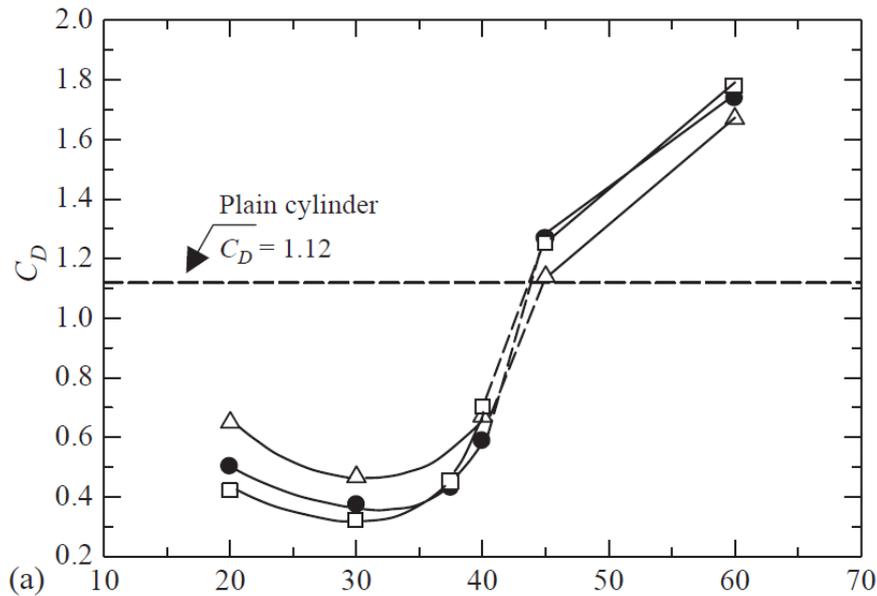
■,  $L/D = 1.5$ ; ●, 1.83; ▲, 2.0; ▼, 2.08; ◆, 2.33; ◄, 3.0; ►, 4.0.  
**Gambar 2.3** Grafik pengaruh posisi *control rod* terhadap penurunan koefisien hambatan silinder utama. (Lee, et al., 2004)

Pada gambar 2.3 menunjukkan adanya penurunan koefisien hambatan akibat pengaruh penempatan dan pemilihan *control rod*. Dapat dilihat koefisien hambatan menurun secara substansial seiring dengan bertambahnya diameter hingga  $d = 0,233$ , kemudian terjadi kenaikan koefisien hambatan yang tidak terlalu signifikan. Penurunan koefisien hambatan terbesar terjadi pada jarak  $L/D = 2,083$  dengan rasio diameter *control rod*  $d/D = 0,233$  yaitu sebesar 29% ketika dibandingkan dengan susunan silinder tanpa adanya *control rod*.

Penelitian mengenai penambahan bodi pengganggu juga dilakukan oleh Alam (2003). Pada penelitian tersebut digunakan bodi pengganggu dengan tiga macam variasi ukuran yaitu 4, 5, dan 6 mm untuk diameternya. Benda uji berupa silinder sirkular yang memiliki diameter 49 mm dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut  $20^\circ$  hingga  $60^\circ$ . Penelitian dilakukan pada bilangan Reynolds sebesar  $5,5 \times 10^4$ . Untuk skema penelitian lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Skema penelitian. (a) konfigurasi penempatan bodi pengganggu, (b) blok dudukan silinder utama dan bodi pengganggu. (Alam, et al., 2003)

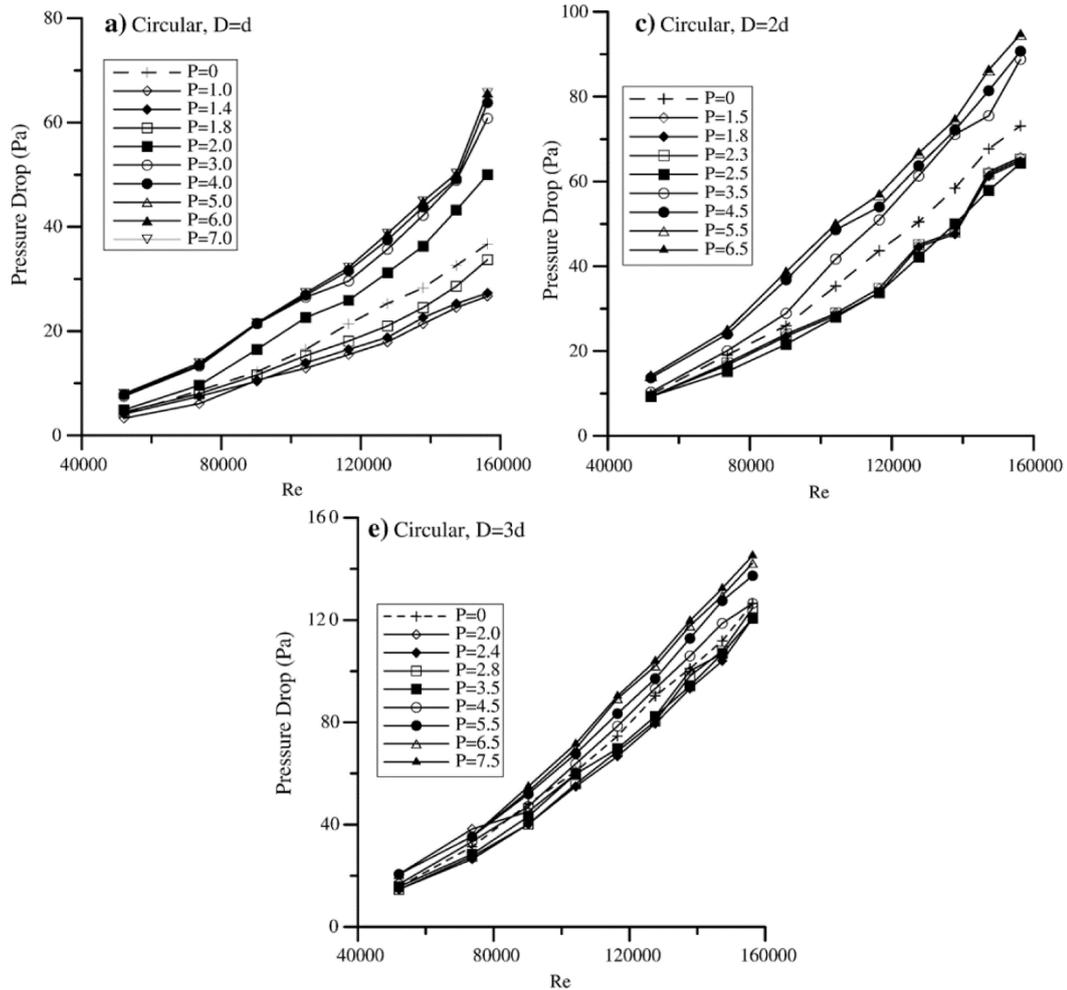


**Gambar 2.5** Pengaruh penempatan bodi pengganggu pada silinder sirkular:  $\Delta$ ,  $d = 4$  mm;  $\bullet$ ,  $d = 5$  mm;  $\square$ ,  $d = 6$  mm. (Alam, et al., 2003)

Gambar 2.5 menunjukkan hasil penelitian berupa koefisien hambat untuk tiga variasi diameter bodi pengganggu yaitu 4, 5, dan 6 mm, dengan *gap* antara bodi pengganggu dan silinder sirkular diposisikan pada jarak 0.4 mm. Dapat dilihat bahwa  $C_D$  memiliki nilai terendah pada posisi penempatan sudut sebesar  $\alpha = 30^\circ$ . Pada posisi tersebut nilai  $C_D$  mengalami penurunan untuk semua konfigurasi, namun penurunan terbesar terjadi pada konfigurasi bodi pengganggu dengan diameter 5 mm yaitu terjadi reduksi sebesar 67%. Untuk sudut  $45^\circ$  hingga  $60^\circ$  memiliki nilai  $C_D$  yang melebihi silinder tunggal tanpa bodi pengganggu, dimana nilai  $C_D$  untuk silinder tunggal tanpa bodi pengganggu yaitu sebesar 1,12.

### 2.1.3 Penurunan Pressure Drop pada Saluran

Sebuah penelitian yang dilakukan oleh Daloglu (2007) secara eksperimen mengenai *pressure drop* pada saluran dengan 2 silinder yang tersusun secara tandem. Penelitian dilakukan pada *range* bilangan Reynolds  $5,21 \times 10^4 \leq Re \leq 1,56 \times 10^5$ . Penelitian menggunakan variasi diameter silinder *upstream* ( $D$ );  $D = d$ ;  $D = 2d$ ;  $D = 3d$ . Untuk ukuran silinder *downstream* dikondisikan tetap sama ( $d$ ). Variasi jarak antara kedua silinder juga dilakukan dengan rasio jarak antara  $1,0 \leq L/d \leq 10,0$ . *Wind tunnel* yang digunakan pada penelitian merupakan tipe *open circuit* dengan penampang bujur sangkar berukuran 125 mm $\times$ 125 mm dengan Panjang 2 meter.

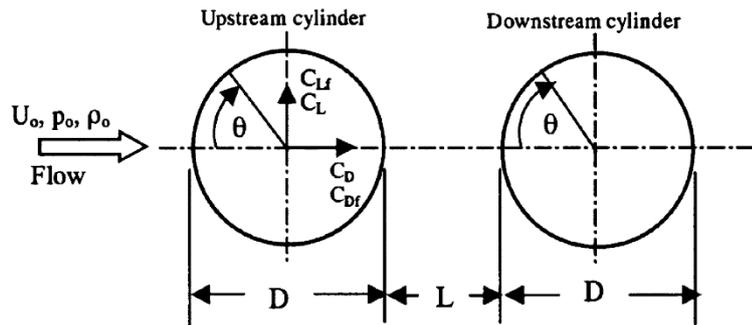


**Gambar 2.6** Grafik *pressure drop* terhadap bilangan *Reynolds*; (a)  $D = d$ ; (c)  $D = 2d$ ; (e)  $D = 3d$ . (Daloglu, 2007)

Pada gambar 2.6 menunjukkan variasi *pressure drop* terhadap bilangan *Reynold* membentuk grafik parabolik. Untuk penggunaan notasi  $P$  pada gambar merupakan rasio perbandingan jarak kedua silinder  $L/d$ . Dari gambar 2.6 (a) dapat dilihat bahwa *pressure drop* yang terjadi pada saluran dengan silinder tandem untuk pengaturan rasio jarak  $L/d < 2$  memiliki nilai yang lebih kecil daripada *pressure drop* pada saluran dengan silinder tunggal untuk semua bilangan *Reynolds*. Pada gambar 2.6 (c) dapat dilihat pengaruh jarak terhadap *pressure drop* cenderung lebih rendah dibandingkan dengan saluran silinder tunggal. Untuk variasi diameter silinder *upstream* pada gambar 2.6 (c) menunjukkan penurunan *pressure drop* untuk rasio jarak  $L/d < 2,5$ . Pengaruh variasi rasio jarak pada gambar 2.6 (e) terjadi penurunan *pressure drop* pada rasio jarak  $L/d < 4,5$ .

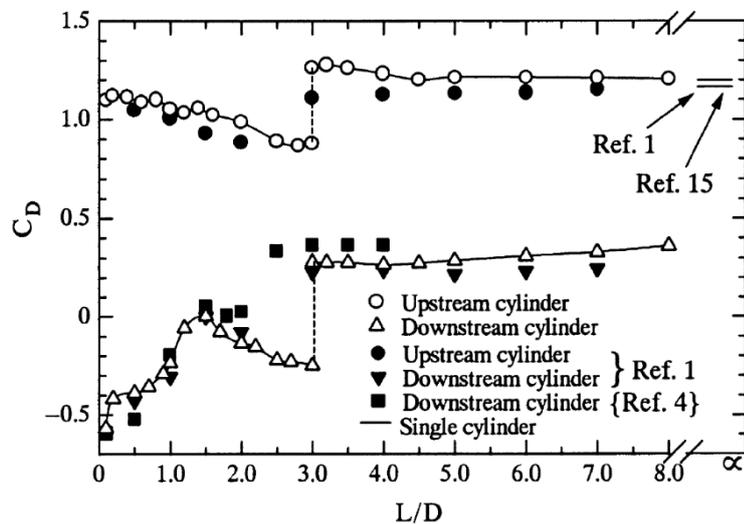
#### 2.1.4 Karakteristik Aliran Melintasi Dua Silinder Tersusun Secara Tandem

Penelitian mengenai sepasang silinder sirkular tersusun tandem dilakukan oleh Alam, et al. (2003) secara eksperimental yang membahas tentang pengaruh variasi jarak terhadap gaya hambat dan tekanan.



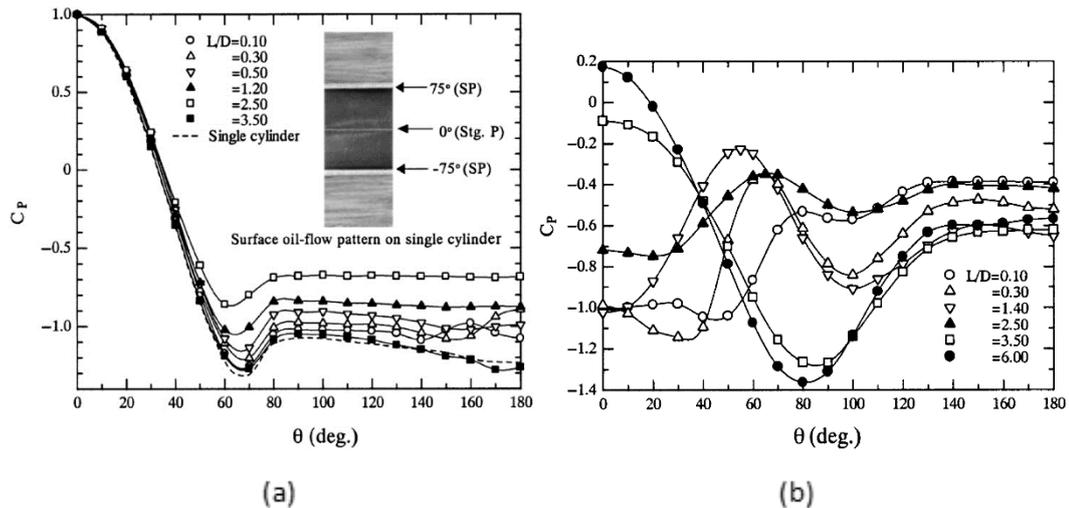
**Gambar 2.7** Skema penelitian dengan dua silinder tersusun tandem. (Alam, et al., 2003)

Penelitian dilakukan pada bilangan Reynolds  $Re = 6,5 \times 10^4$ . Variasi rasio jarak yang digunakan yaitu antara  $L/D = 0,1$  hingga  $L/D = 8,0$ . Untuk konfigurasi yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.7



**Gambar 2.8** Koefisien drag dengan variasi  $L/D$ . (Alam, et al., 2003)

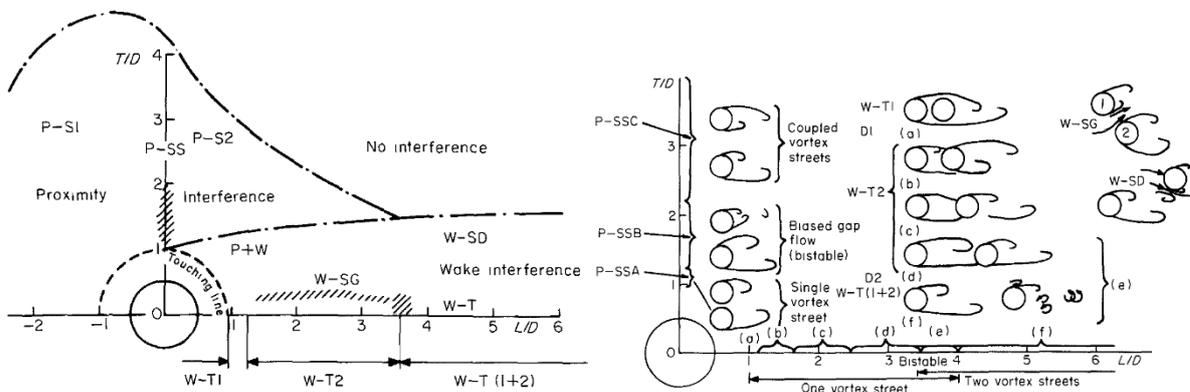
Pada gambar 2.8 didapat hasil yaitu pada  $L/D < 3,0$ ; nilai  $C_D$  pada silinder *upstream* menurun secara bertahap seiring dengan membesarnya jarak antar kedua silinder. Sedangkan pada silinder *downstream*, nilai  $C_D$  yang dihasilkan bernilai negatif dengan nilai tertinggi didapat ketika  $L/D = 1,4$ . Selain itu terjadi fenomena *bistable flow* pada  $L/D = 3$ , kedua silinder menunjukkan adanya dua nilai  $C_D$  berbeda pada variasi jarak yang sama.



**Gambar 2.9** Koefisien *pressure* dengan variasi  $L/D$ ; (a) *upstream* silinder; (b) *downstream* silinder. (Alam, et al., 2003)

Pada gambar 2.9 menampilkan tentang hasil penelitian berupa koefisien tekanan untuk kedua silinder. Untuk koefisien tekanan pada silinder *upstream* memiliki pola distribusi yang cenderung identik dengan silinder tunggal, sedangkan pada silinder *downstream* nilainya bervariasi terhadap rasio jarak  $L/D$ .

Penelitian juga dilakukan oleh Zdravkovich (1987) secara eksperimental. Dari penelitian ini didapat karakteristik khas dari aliran yang melintasi kedua silinder tandem. Adanya *wake interference* yang terjadi pada silinder *downstream* akibat didekatkan dengan silinder *upstream* pada jarak tertentu.



**Gambar 2.10** Interferensi yang terjadi pada susunan dua silinder secara *side-by-side*, tandem, dan *staggered*. (Zdravkovich, 1987)

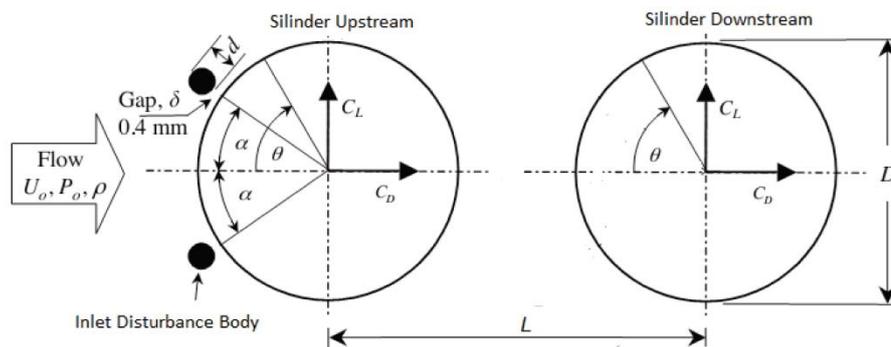
Pada gambar 2.10 variasi jarak pada dua silinder yang tersusun tandem didefinisikan oleh rasio  $L/D$ , dimana  $L$  adalah jarak longitudinal antara kedua titik pusat silinder dan  $D$  adalah diameter silinder. Pada penelitian ini, dinyatakan bahwa terdapat tiga daerah aliran yang memiliki karakteristik aliran yang berbeda yaitu  $W-T1$ ,  $W-T2$ , dan  $W-T(1+2)$ .

Pertama, pada *range*  $1 < L/D < 1,2-1,8$  (bergantung pada nilai bilangan Reynolds aliran fluida yang terseparasi setelah melewati silinder *upstream* tidak akan mengenai silinder *downstream*). Sehingga *vortex street* yang berada di belakan silinder *downstream* sebenarnya terbentuk dari *free shear layer* yang terbentuk dari silinder *upstream*. Akibat hal ini silinder

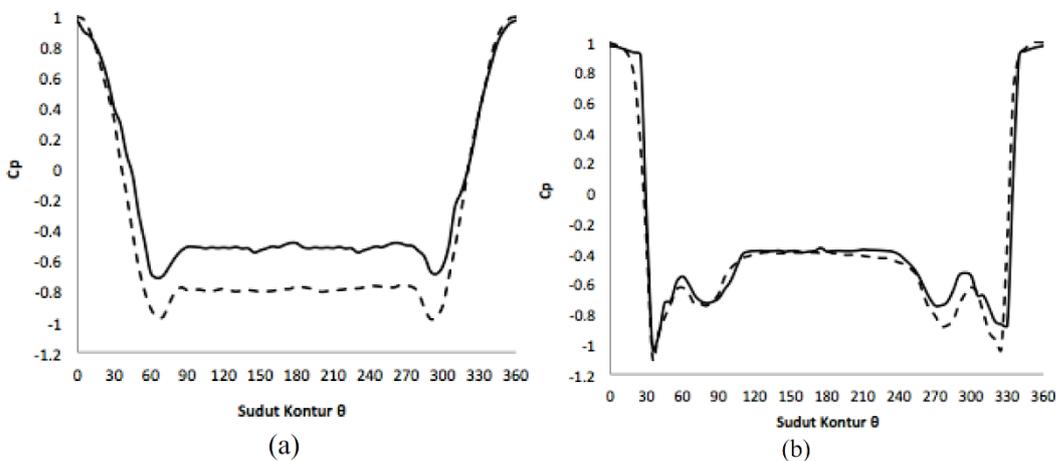
*downstream* seolah-olah terbungkus oleh aliran silinder *upstream*. Kedua, pada  $range$   $1,2-1,8 < L/D < 3,4-3,8$  (bergantung pada nilai bilangan Reynolds *free shear layer* yang terbentuk dari silinder *upstream* mengenai permukaan silinder *downstream*. Oleh karena itu, *vortex street* hanya terbentuk di belakang silinder *downstream*. Ketiga, pada  $range$   $L/D > 3,4-3,8$  *shear layer* yang terpisah akan tergulung bergantian dan membentuk *vortex* di belakang silinder *upstream* di depan silinder *downstream*. Sehingga akan tercipta dua *vortex* di belakang masing masing silinder baik *upstream* maupun *downstream* yang memiliki karakteristik menyerupai silinder tunggal.

### 2.1.5 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Tersusun Tandem

Penelitian mengenai pengaruh penambahan bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran melintasi silinder yang tersusun secara tandem telah dilakukan oleh **Daman & Widodo (2014)** secara eksperimen maupun numerik. Penelitian eksperimen dilakukan pada *wind tunnel*. Bilangan Reynolds yang digunakan berdasarkan diameter hidraulik yaitu sebesar  $Re_{DH} = 1,56 \times 10^4$ . Jarak permukaan silinder *upstream* terhadap permukaan bodi pengganggu sebesar 0,4 mm. bodi pengganggu berupa silinder sirkular dengan diameter  $d = 4$  mm yang diletakkan pada sisi *upstream* dan membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap sumbu silinder utama. Diameter kedua silinder utama yang digunakan yaitu  $D = 25$  mm, dengan variasi jarak antar sumbu silinder *upstream* dan *downstream*  $L/D = 1,5; 4,0$ . Berikut merupakan skema penelitian pada penelitian ini yang ditunjukkan pada gambar 2.11



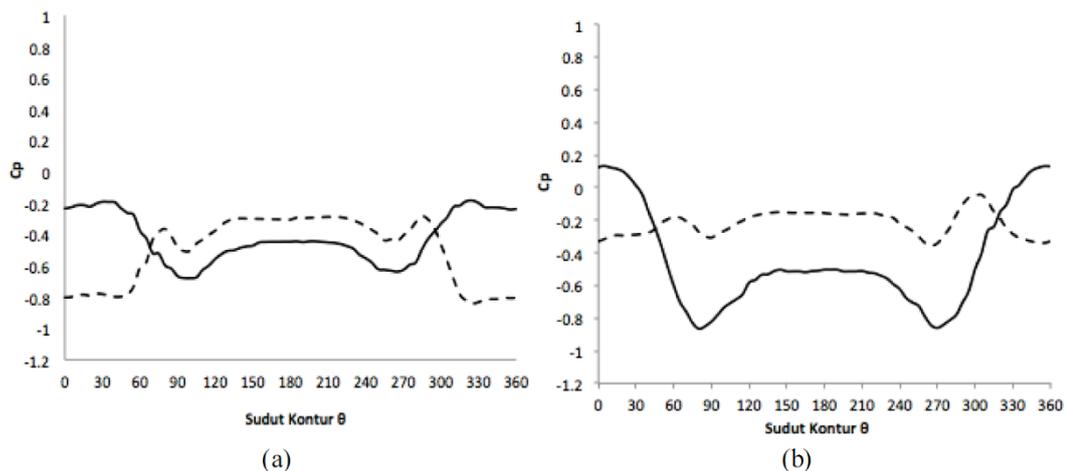
Gambar 2.11 Skema penelitian. (Daman & Widodo, 2014)



**Gambar 2.12** Grafik distribusi koefisien tekanan silinder *upstream* pada konfigurasi tandem; (a) tanpa bodi pengganggu; (b) dengan bodi pengganggu. (Daman & Widodo, 2014)

Gambar 2.12 merupakan grafik hasil penelitian yang menunjukkan titik stagnasi pada kedua susunan tandem dan pada dua variasi jarak, tepat berada pada sudut  $0^\circ$ . Untuk gambar 2.12 (a) setelah titik stagnasi aliran langsung mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik koefisien tekanan secara ekstrem hingga aliran memiliki kecepatan maksimum yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan paling rendah. Aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar  $65^\circ$ - $70^\circ$  dan  $290^\circ$ - $195^\circ$ . Aliran mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure gradient* yang ditandai dengan peningkatan tekanan. Titik separasi aliran terjadi pada sudut sekitar  $90^\circ$  dan  $270^\circ$ .

Untuk gambar 2.12 (b) setelah titik stagnasi aliran mengalami percepatan yang tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan adanya celah antara IDB dan permukaan silinder, sehingga aliran mengalami hambatan. Pada sudut  $35^\circ$ - $40^\circ$  dan  $320^\circ$ - $325^\circ$  aliran mencapai kecepatan maksimum. Setelah mencapai kecepatan maksimum aliran mulai mengalami perlambatan kemudian terjadi separasi pada sudut  $115^\circ$  dan  $235^\circ$ .



**Gambar 2.13** Grafik distribusi koefisien tekanan silinder *downstream* pada konfigurasi tandem; (a) tanpa bodi pengganggu; (b) dengan bodi pengganggu. (Daman & Widodo, 2014)

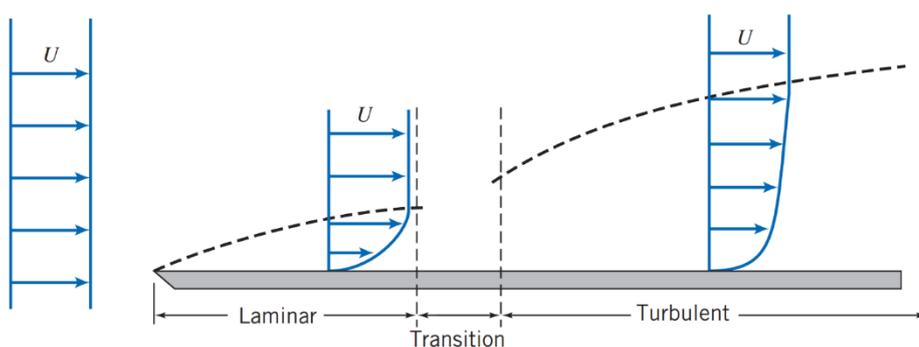
Grafik hasil penelitian pada gambar 2.13 menunjukkan bahwa distribusi koefisien tekanan pada permukaan silinder *downstream* bernilai negatif, hal ini menunjukkan bahwa silinder *downstream* masih berada pada daerah *wake* silinder *upstream*. Pada gambar 2.13 (b) dapat diamati pengaruh *wake* silinder *upstream* terhadap silinder *downstream* mulai berkurang pada jarak antar silinder  $L/D$  4 yang ditandai tren grafik mulai mendekati tren koefisien tekanan silinder tunggal. Dari kedua grafik di atas dapat diamati bahwa interaksi *wake* silinder *upstream* terhadap silinder *downstream* semakin berkurang seiring bertambahnya rasio jarak  $L/D$ .

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Boundary Layer

Konsep lapisan batas pertama kali dikemukakan pada tahun 1904 oleh Ludwig Prandtl pengaruh gesekan akan menimbulkan lapisan batas yang kemudian disebut sebagai lapisan

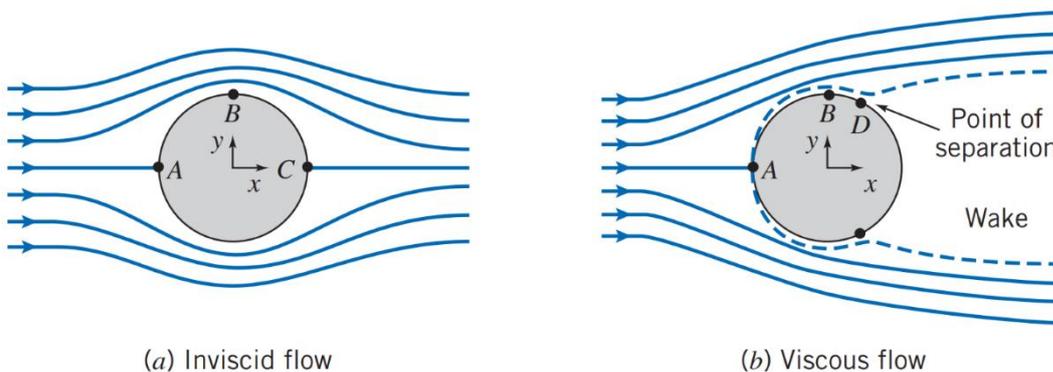
batas (*Boundary layer*). Lapisan batas adalah suatu lapisan yang terbentuk disekitar penampang yang dilalui oleh fluida tersebut, karena mengalami hambatan yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti gesekan, dan efek viskositas. Gesekan terbesar terjadi ketika fluida berada dekat dengan permukaan benda. Semakin jauh permukaan benda dengan fluida maka gaya gesek yang timbul semakin kecil pula mempengaruhi aliran fluida hingga ketika melewati batas *boundary layer edge* gaya gesek sudah tidak mempengaruhi aliran. Daerah yang tidak terpengaruh gaya gesek disebut dengan daerah *freestream*. Profil kecepatan yang diakibatkan oleh adanya gaya gesek dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Skema Boundary layer (Pritchard, et al., 2011)

### 2.2.2 Aliran Inviscid dan Viscous

Pada sub bab ini dijelaskan perbedaan mengenai aliran *viscous* dan *inviscid*. Aliran *viscous* adalah aliran yang memiliki koefisien viskositas karena adanya gaya gesek yang timbul secara signifikan. Sedangkan, aliran *inviscid* adalah aliran yang nilai koefisien viskositasnya diasumsikan nol ( $\mu = 0$ ). Meskipun, pada kenyataannya tidak ada nilai nol dalam koefisien viskositas. Berikut merupakan ilustrasi antara aliran *viscous* dan *inviscid*.

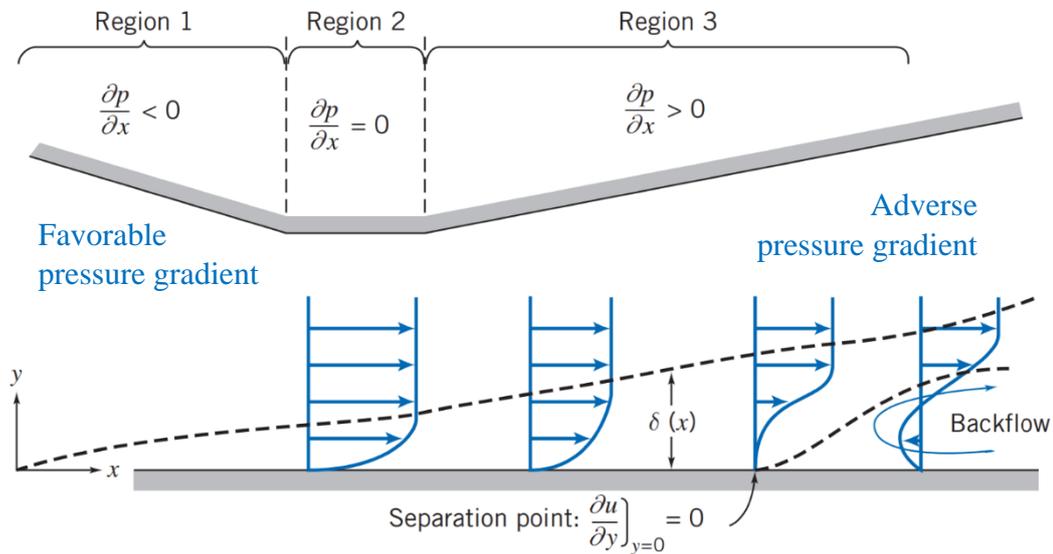


**Gambar 2.15** Ilustrasi aliran (a) *Inviscid*; (b) *Viscous* (Pritchard, et al., 2011)

Pada gambar 2.15 merupakan ilustrasi aliran fluida ketika melewati suatu permukaan bola. Untuk gambar 2.15 (a) titik A dan C menunjukkan kecepatan yang relatif rendah bahkan dapat bernilai nol sehingga nilai tekanan cenderung besar pada titik tersebut, titik A dan C merupakan titik stagnasi. Titik B merupakan titik dengan kecepatan relatif besar sehingga nilai tekanan cenderung kecil. Pada aliran *inviscid* digambarkan suatu aliran fluida tanpa dipengaruhi gesekan terhadap dinding permukaan bola sehingga profil kecepatan aliran akan menyatu kembali setelah melewati titik B.

Sedangkan untuk gambar 2.15 (b) titik A menunjukkan titik stagnasi, setelah melewati titik tersebut aliran akan membentuk *boundary layer*. Pada titik B terjadi kenaikan kecepatan yang

kemudian mengakibatkan turunnya tekanan. Pada titik D terjadi separasi aliran dimana momentum aliran utama tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser sehingga memicu timbul *wake* di daerah belakang penampang, titik D disebut sebagai titik separasi. *Wake* merupakan suatu kerugian karena hal tersebut aliran yang mengalir menjadi berkurang akibat timbulnya *pressure drop*.



**Gambar 2.16** Boundary layer dengan adverse pressure gradient (Pritchard, et al., 2011)

Dari gambar 2.16 dapat dilihat bahwa adanya perubahan luasan aliran mempengaruhi profil kecepatan aliran. Ditunjukkan pada region 1 ( $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$ ) terjadi percepatan aliran karena bidang alir menyerupai *nozzle* atau disebut daerah *favorable pressure gradient*. Pada region 2 ( $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ ) merupakan kecepatan aliran konstan atau disebut *zero pressure gradient*. Pada region 3 ( $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ ) terjadi perlambatan aliran karena bidang alir menyerupai *diffuser* atau disebut daerah *adverse pressure gradient*, dimana pada daerah ini terjadi separasi aliran yang diakibatkan momentum aliran tidak mampu melawan gaya gesek permukaan benda dan tekanan akibat pelebaran penampang. Akibat separasi ini maka akan terjadi *backflow* atau aliran yang berbalik arah dari aliran utama.

### 2.2.3 Pressure Drop

*Pressure drop* timbul akibat adanya gesekan dengan analisa penampang konstan dan dalam kondisi horizontal. Untuk aliran turbulen dan laminar memiliki perbedaan dalam perumusan ketika melakukan analisa. Hal ini dikarenakan perlu adanya pengembangan perumusan berdasarkan kombinasi antara teori dan eksperimen. Adanya *losses* akibat *friction* terdiri dari dua kategori: *major losses*, *losses* yang terjadi akibat adanya gesekan dalam pipa atau *duct* dengan luas area konstan dan *minor losses* (lebih besar dari pada *major losses*), *losses* yang terjadi akibat adanya *fitting* pada pipa atau *duct* seperti *valve*, *elbows* dan lain-lain.

*Pressure drop* dapat diperoleh dari  $P_{inlet}$  dan  $P_{outlet}$ , seperti berikut:

$$\Delta p = P_{inlet} - P_{outlet}$$

Dimana :  $\Delta p$  : *Pressure drop*

$P_{inlet}$  : Pressure inlet

$P_{outlet}$  : Pressure outlet

#### 2.2.4 Pressure Coefficient

Koefisien tekanan merupakan bilangan yang tak berdimensi menunjukkan selisih antara tekanan *local* dan tekanan *freestream*. Koefisien tekanan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_p = \frac{p_k - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (2.1)$$

Dimana :  $C_p$  : Pressure coefficient

$p_k$  : Tekanan statis pada kontur local

$p_\infty$  : Tekanan statis pada aliran

$\frac{1}{2} \rho V^2$ : Tekanan dinamis aliran

#### 2.2.5 Tekanan

Tekanan terdiri dari tiga macam, yaitu tekanan statis, tekanan stagnasi, dan tekanan dinamis. Tekanan statis merupakan tekanan yang diukur dengan alat ukur tekanan yang memiliki kecepatan yang sama dengan kecepatan aliran fluida. Tekanan ini semakin menurun sepanjang aliran karena adanya gesekan, dan besarnya sama pada tiap titik di potongan penampang aliran.

Tekanan stagnasi dapat didefinisikan sebagai tekanan yang diukur pada daerah dimana aliran fluida diperlambat hingga nol dengan proses perlambatan tanpa gesekan. Tekanan yang diukur pada titik stagnasi, dimana kecepatan aliran fluida diperlambat sampai berhenti tanpa proses gesekan (*frictionless*).

Pada aliran *incompressible*, persamaan *Bernoulli* dapat digunakan untuk menghubungkan perubahan kecepatan dan tekanan sepanjang sebuah *streamline*. Dengan mengabaikan ketinggian, maka persamaan *Bernoulli* dituliskan menjadi:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = constant$$
$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

Dengan kondisi kecepatan stagnasi ( $V_0$ ) sama dengan nol, persamaan menjadi:

$$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.2)$$

Dimana :  $p_0$  : Tekanan stagnasi

$p$  : Tekanan statis

$\rho$  : Densitas fluida

$V^2$ : Kecepatan aliran fluida

Persamaan 2.2 merupakan bentuk matematis definisi dari tekanan stagnasi, untuk aliran *incompressible*. Dengan  $\frac{1}{2}\rho V^2$  merupakan tekanan dinamis. Sehingga tekanan dinamis dapat didefinisikan sebagai tekanan fluida akibat kecepatan aliran, yaitu selisih antara tekanan stagnasi dengan tekanan statis. Dari persamaan 2.2, kecepatan lokal bisa didapat dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (2.3)$$

### 2.2.6 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang mengklasifikasi jenis aliran fluida. Pada umumnya jenis aliran fluida dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu laminar, transisi dan turbulen. Dalam aplikasinya, aliran transisi jarang digunakan. Aliran fluida lebih sering diklasifikasikan menjadi 2 jenis aliran yaitu aliran laminar dan turbulen. Bilangan Reynolds dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Re = \rho \frac{v \cdot L}{\mu} \quad (2.4)$$

Untuk aliran fluida yang melewati saluran dengan penampang tidak berbentuk *circular*, maka menggunakan diameter hidrolis ( $D_h$ ), dengan  $D_h$  dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (2.5)$$

Dimana:  $D_h$  : Diameter hidroilis  
 A : Luas penampang  
 P : Keliling penampang

Sehingga,

$$Re = \rho \frac{v \cdot D_h}{\mu} \quad (2.6)$$

Dimana : Re : Bilangan Reynolds  
 $\rho$  : Massa jenis fluida  
 V : Kecepatan aliran fluida  
 $D_h$  : Diameter hidrolis  
 $\mu$  : Viskositas dinamik fluida

### 2.2.7 Drag Pressure

*Pressure drag* merupakan gaya hambat yang berkaitan dengan tekanan, dan sangat bergantung pada bentuk penampang bendanya. Gaya hambat ini bekerja tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul akibat adanya tekanan dari fluida. *Pressure drag* dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$D_p = \int P \cos \theta dA \quad (2.7)$$

Dimana:  $P$  : Tekanan pada kontur

$\theta$  : Sudut posisi tekanan pada kontur

Adapun untuk koefisien *pressure drag* juga dapat diperoleh dengan hasil integrasi dari distribusi tekanan ( $C_p$ ) sepanjang kontur silinder utama. Adapun koefisien *pressure drag* ( $C_{Dp}$ ) diperoleh dengan mengintegrasikan distribusi tekanan sepanjang kontur dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_{Dp} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (2.8)$$

Dimana:  $C_{Dp}$  : Koefisien *pressure drag*

$C_p(\theta)$  : Koefisien tekanan kontur pada posisi  $\theta$

$\theta$  : Sudut posisi *pressure tap* pada kontur

Untuk mendapatkan nilai koefisien *drag pressure* digunakan penyelesaian integrasi numerik dengan menggunakan metode Simpson 1/3 segmen berganda yang dirumuskan sebagai berikut:

$$I \cong \underbrace{(b-a)}_{\text{lebar}} \underbrace{\frac{f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n)}{3n}}_{\text{Tinggi rata-rata}} \quad (2.9)$$

Dimana:  $a$  : Sudut awal =  $0^\circ$

$b$  : Sudut akhir =  $2\pi$

$n$  : Jumlah data

$f(x_0)$  : Data pertama

$f(x_i)$  : Data ganjil

$f(x_j)$  : Data genap

$f(x_n)$  : Data terakhir

Sehingga,

$$C_{Dp} = \frac{b-a}{2 \times 3n} \left\{ y_0 + 4(y_1 + \dots + y_{n-1}) + 2(y_2 + \dots + y_{n-2}) + y_n \right\} \quad (2.10)$$

Dimana:  $y_0$  : Data pertama

$4(y_1 + \dots + y_{n-1})$ : Jumlah data ganjil

$2(y_2 + \dots + y_{n-2})$ : Jumlah data genap

$y_n$  : Data terakhir

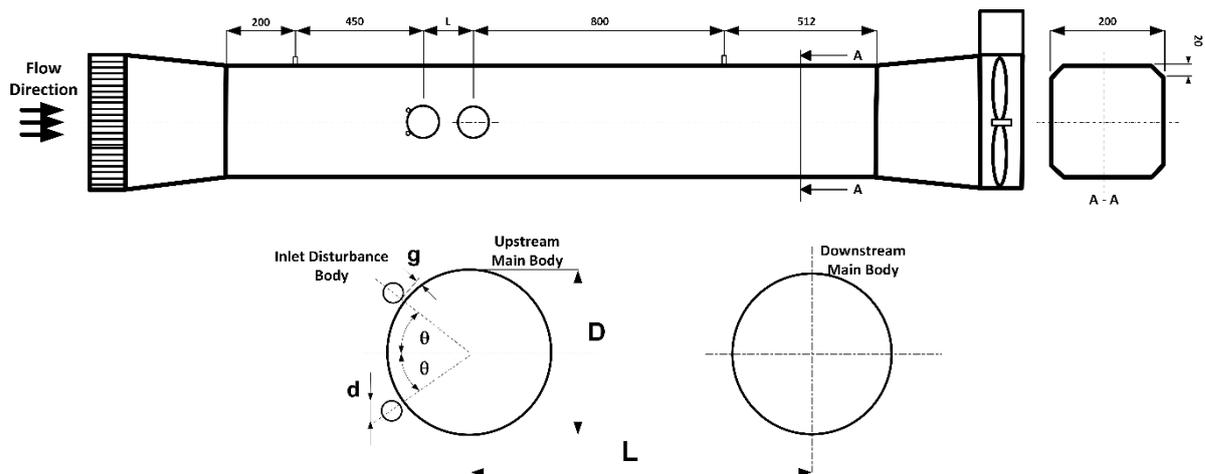
## BAB 3 METODOLOGI

Pada bab ini akan dibahas tentang metode penelitian yang digunakan. Metode yang digunakan adalah eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran melalui silinder sirkular yang tersusun tandem dengan dua buah bodi pengganggu pada sisi *inlet*.

Penelitian eksperimen ini menggunakan dua buah silinder sirkular utama dengan diameter 25 mm dengan dua buah bodi pengganggu (*Cylinder circular Disturbance Body*) dengan diameter 5 mm yang diletakkan membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap sumbu silinder utama. perbandingan jarak antara dua silinder sirkular utama divariasikan dengan rasio yaitu  $L/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$ .

### 3.1 Skema Penelitian

Penelitian ini menggunakan saluran berpenampang oktagon. Gambar 3.1 menunjukkan sketsa *test section* dari pandangan samping, dengan peletakkan benda uji silinder sirkular utama yang disusun secara tandem dengan penambahan bodi pengganggu atau *Inlet disturbance body* (IDB). *Wall-pressure tap* diletakkan pada sisi *upstream* dan *downstream test section* guna memperoleh selisih tekanan yang terjadi.



**Gambar 3.1** Ilustrasi *test section*

### 3.2 Parameter yang Dianalisis

Analisis dimensi parameter berfungsi untuk mengetahui pengaruh parameter tersebut pada penelitian yang dilakukan. Parameter yang saling berhubungan ditunjukkan dengan bentuk parameter-parameter tak berdimensi. Parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran di sepanjang saluran sebagai berikut:

- $\rho$  : massa jenis fluida
- $\mu$  : viskositas fluida
- $U_\infty$  : kecepatan fluida
- $D_h$  : diameter hidrolis

- D : diameter silinder sirkular
- d : diameter bodi pengganggu
- $\delta$  : jarak antara silinder dengan bodi pengganggu
- L : jaran antara dua silinder utama

### 3.2.1 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Koefisien Tekanan pada Silinder

Analisis koefisien tekanan pada silinder dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga fungsi parameter dapat digunakan untuk mengetahui koefisien tekanan. Perumusan secara matematik dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_\infty, D_h, D, d, \delta, L)$$

Dimana:  $\Delta p$  : perbedaan tekanan (N/m<sup>2</sup>)

Menggunakan theorem *Buckingham p* dengan parameter berulang  $\rho$ ,  $\mu$ , dan  $D$ ; didapat 8 kelompok tak berdimensi yaitu:

1.  $\pi_1 = \frac{\Delta p}{\rho \cdot U_\infty^2}$  Koefisien tekanan
2.  $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho \cdot U_\infty \cdot D}$  Bilangan Reynolds
3.  $\pi_3 = \frac{d}{D}$  Perbandingan diameter bodi pengganggu dengan diameter silinder sirkular
4.  $\pi_4 = \frac{a}{D}$  Perbandingan tinggi *center to center* antara bodi pengganggu dengan diameter silinder sirkular
5.  $\pi_5 = \frac{b}{D}$  Perbandingan jarak *center to center* antara bodi pengganggu dengan diameter silinder sirkular
6.  $\pi_6 = \frac{\delta}{D}$  Perbandingan jarak bodi pengganggu dengan pusat silinder utama
7.  $\pi_7 = \frac{L}{D}$  Perbandingan jarak antara titik pusat silinder *upstream* dan silinder *downstream*
8.  $\pi_8 = \frac{\pi_4}{\pi_5} = \frac{a}{b} = \theta$  Perbandingan jarak bodi pengganggu dengan tinggi bodi pengganggu, didapat sudut bodi pengganggu  $\theta$ .

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut:

$$\pi_1 = f(\pi_2 \pi_3 \pi_4 \pi_5 \pi_6 \pi_7)$$

$$\frac{\Delta p}{\rho U_\infty} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{a}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\delta}{D}, \frac{L}{D}\right)$$

Karena nilai sudut pengganggu didapatkan dari nilai  $\pi_4$  dan  $\pi_5$ , maka fungsi bilangan tak berdimensi menjadi :

$$\frac{\Delta p}{\rho U_\infty} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{\delta}{D}, \theta, \frac{L}{D}\right)$$

Pada penelitian ini  $\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{\delta}{D}$  bernilai konstan, sedangkan untuk jarak antara kedua silinder utama divariasikan, untuk melihat perbandingan reduksi gaya hambat yang terjadi diantara variasi tersebut, sehingga diperoleh:

$$\frac{\Delta p}{\rho U_\infty} = f_3\left(\theta, \frac{L}{D}\right)$$

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

$$C_p = \frac{\Delta p}{\rho U_\infty} = f_3\left(\theta, \frac{L}{D}\right)$$

### 3.3 Peralatan

#### 3.3.1 *Wind Tunnel* (Terowongan angin)

Penelitian dengan menggunakan *wind tunnel* tipe *open circuit* ini dimaksudkan untuk dapat menguji benda dalam skala model yang lebih kecil. Hal ini dilakukan sebab pengukuran sebenarnya akan sulit dan membutuhkan biaya tidak sedikit. Oleh karena itu *wind tunnel* dirancang dengan kondisi yang hampir sama dengan kondisi nyata benda uji digunakan. Sehingga hasil yang didapat cukup akurat. *Wind tunnel* ini merupakan jenis *subsonic*. Berikut merupakan susunan *wind tunnel* pada gambar 3.2.

Spesifikasi *wind tunnel*:

- Jenis : *subsonic, open circuit wind tunnel*
- Bentuk saluran uji : penampang oktagonal
- Panjang : 2000 mm
- Tinggi : 200 mm
- Lebar : 200 mm
- Wall-pressure tap : 1 pada masing masing sisi



**Gambar 3.2** Susunan *wind tunnel*

Keterangan:

1. *Honeycomb*
2. *Duct*
3. *Centrifugal fan*
4. *Inverter*

### 3.3.2 Centrifugal Fan

Pada penelitian ini menggunakan 1 buah *centrifugal fan* seperti pada gambar 3.3 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Merek : Vanco
- Tipe : VCD/4 - 225
- Daya : 0,75 kW
- Putaran : 1400 RPM
- Tegangan : 220 V
- Frekuensi : 50 Hz



**Gambar 3.3** *Centrifugal fan*

### 3.3.3 Inverter

Pada penelitian ini menggunakan satu buah *inverter* yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putaran dari *centrifugal fan*, ilustrasi *inverter* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.4 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Model : ATV31HU15M2A
- Tegangan : input = 200/240 Ø1  
output = 200/240 Ø3
- Frekuensi : input = 50/60  
output = 0.5/500
- Arus : input = 15,8  
output = 8,0
- Daya : 1,5 kW



Gambar 3.4 Inverter

### 3.3.4 Nozzle dan Honeycomb

*Nozzle* berfungsi untuk menambah kecepatan aliran sebelum memasuki *test section*. Didalam *nozzle* terdapat *honeycomb* yang berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati *uniform* dan mengurangi turbulensi aliran ketika memasuki instalasi *test section*.

### 3.3.5 Benda Uji

Adapun benda uji yang digunakan spesifikasinya dijelaskan sebagai berikut:

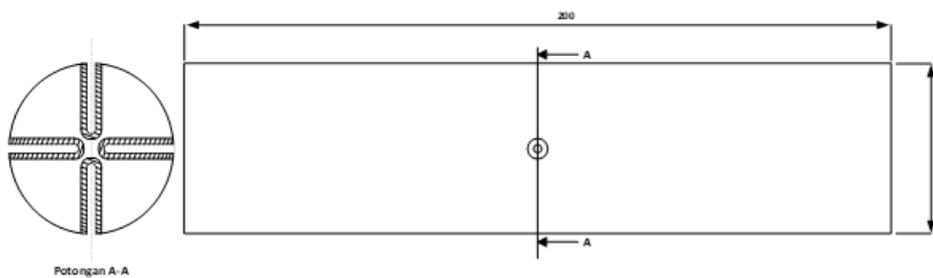
#### 1. Silinder sirkular utama

Silinder utama yang digunakan terdapat dua buah seperti pada gambar 3.5 dan 3.6.

- Diameter : 25 mm
- Panjang : 200 mm
- *Pressure tap* : 4 lubang
- Bahan : Pipa PVC



**Gambar 3.5** Silinder sirkular utama



**Gambar 3.6** Skema silinder sirkular utama

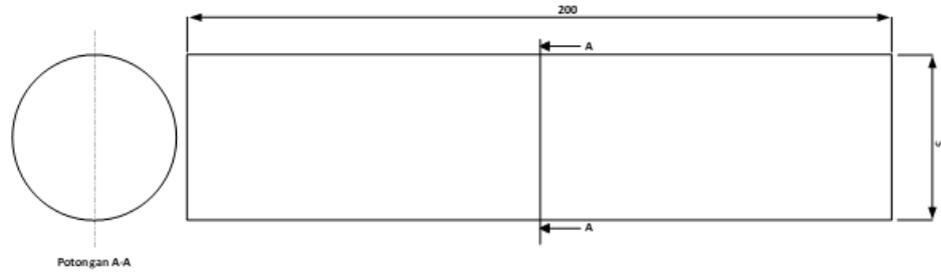
2. Bodi pengganggu

Bodi pengganggu yang digunakan terdapat dua buah seperti pada gambar 3.7 dan 3.8.

- Tipe : polos
- Panjang : 20 mm
- Diameter : 5 mm



**Gambar 3.7** Bodi Pengganggu



**Gambar 3.8** Skema bodi pengganggu

### 3.3.6 Alat Ukur

#### 1. *Wall-pressure tap*

*Wall-pressure tap* ini berupa lubang-lubang kecil yang terletak di dinding Terowongan angin pada sisi *upstream* dan *downstream* dan tegak lurus dengan permukaan dinding. Berikut merupakan ilustrasi *wall-pressure tap* yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 3.9** *Wall-pressure tap*

#### 2. *Pitot Static Tube*

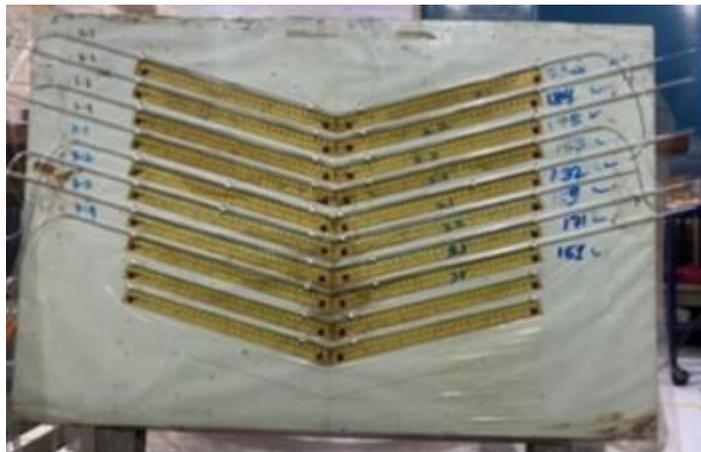
*Pitot static tube* digunakan untuk mengukur tekanan statis dan tekanan stagnasi aliran. Pada penelitian ini, *pitot static tube* digunakan untuk mengukur tekanan *free stream* dan tekanan di belakang benda uji untuk mendapatkan kecepatan aliran. Alat ini kemudian dihubungkan dengan *inclined manometer*. *Pitot static tube* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.10.



**Gambar 3.10** *Pitot static tube*

### 3. *Inclined Manometer*

*Inclined manometer* digunakan untuk mengamati perubahan  $\Delta h$  yang kemudian akan dipakai untuk mencari tekanan dan kecepatan aliran. Alat ini dihubungkan dengan terowongan angin melalui *pitot static tube* dan juga *wall pressure tap*. Manometer ini dirancang kemiringannya sebesar  $15^\circ$ . Manometer yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.11.



**Gambar 3.11** *Inclined manometer*

## 3.4 **Prosedur Pengambilan Data**

Adapun langkah-langkah dalam proses pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Meletakkan peralatan dan memasang benda uji yang digunakan untuk penelitian.
2. Mengukur kondisi udara di dalam ruangan saat pengujian (temperatur, dan tekanan).
3. Memasang benda uji pada saluran *wind tunnel*, yaitu dua buah silinder sirkular berdiameter  $D = 25$  mm yang disusun secara tandem dengan jarak  $L/D$  1,5 hingga 4,0,

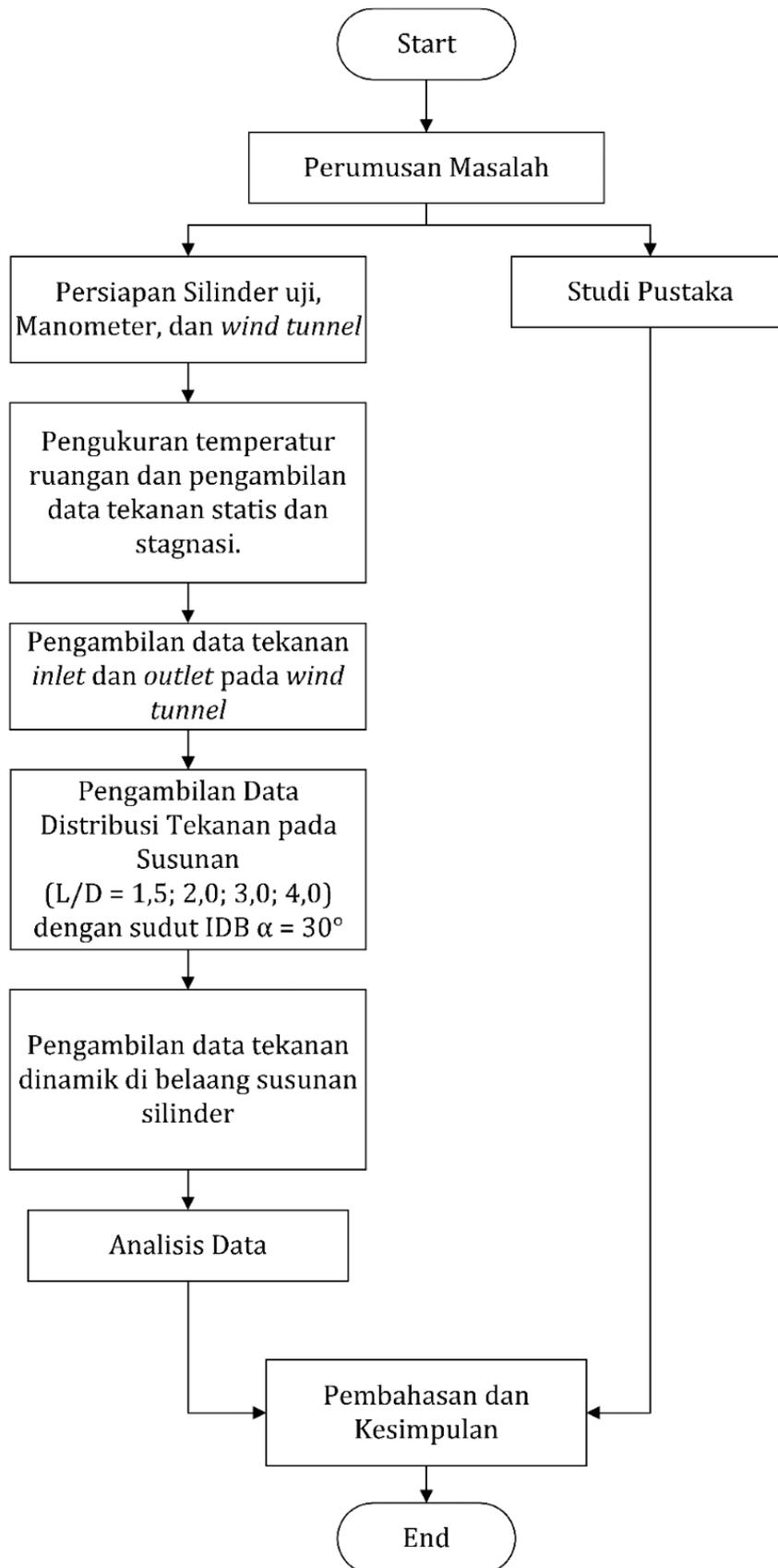
kemudian bodi pengganggu dengan diameter ( $d$ ) = 5 mm yang di letakkan pada sudut  $30^\circ$  pada depan silinder *upstream*.

4. Mengukur kesejajaran silinder dan dinding dengan *water pass*.
5. Menghidupkan *wind tunnel* dan mengatur kecepatan secara perlahan hingga kondisi *steady*.
6. Mengukur tekanan pada *wall pressure tap upstream* dan *downstream* yang dihubungkan dengan menggunakan *inclined manometer*.
7. Mengukur tekanan pada *pressure tap* yang terdapat di permukaan silinder utama, dan mengukur profil kecepatan di belakang *downstream* silinder dengan menggunakan *pitot static tube* yang dihubungkan dengan *inclined manometer*.

### 3.5 Data Penelitian

- a. Data hasil pengukuran
  - Perbedaan tekanan pada saluran sisi *inlet* dan *outlet* dari benda uji.
  - Distribusi tekanan pada silinder.
  - Profil kecepatan di belakang susunan silinder
- b. Data yang diolah
  - Tekanan pada saluran dan silinder
  - Profil kecepatan di belakang susunan silinder
- c. Data hasil perhitungan
  - *Pressure drop* dengan adanya susunan *bluff body* ( $\Delta P$ )
  - Koefisien distribusi tekanan ( $C_p$ ) pada permukaan silinder utama
  - Koefisien *drag pressure* ( $C_{dp}$ ) susunan silinder utama

### 3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.12 Diagram alir penelitian

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan menampilkan hasil dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan secara eksperimen. Hasil pengukuran yang diperoleh dari penelitian berupa pengukuran tekanan pada sisi *inlet* dan *outlet wind tunnel* pada empat konfigurasi silinder tandem, pengukuran tekanan statis dan tekanan stagnasi *free stream*, tekanan statis permukaan silinder *upstream* maupun *downstream*, pengukuran tekanan statis dan stagnasi di belakang konfigurasi silinder tandem. Hasil pengukuran tersebut kemudian diolah sehingga diperoleh nilai *pressure drop* ( $\Delta p$ ) pada *wind tunnel*, distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada permukaan silinder sirkular *upstream* maupun *downstream*, koefisien *drag pressure* ( $C_{Dp}$ ) silinder *upstream* maupun *downstream*, dan profil kecepatan aliran di belakang susunan konfigurasi silinder tandem.

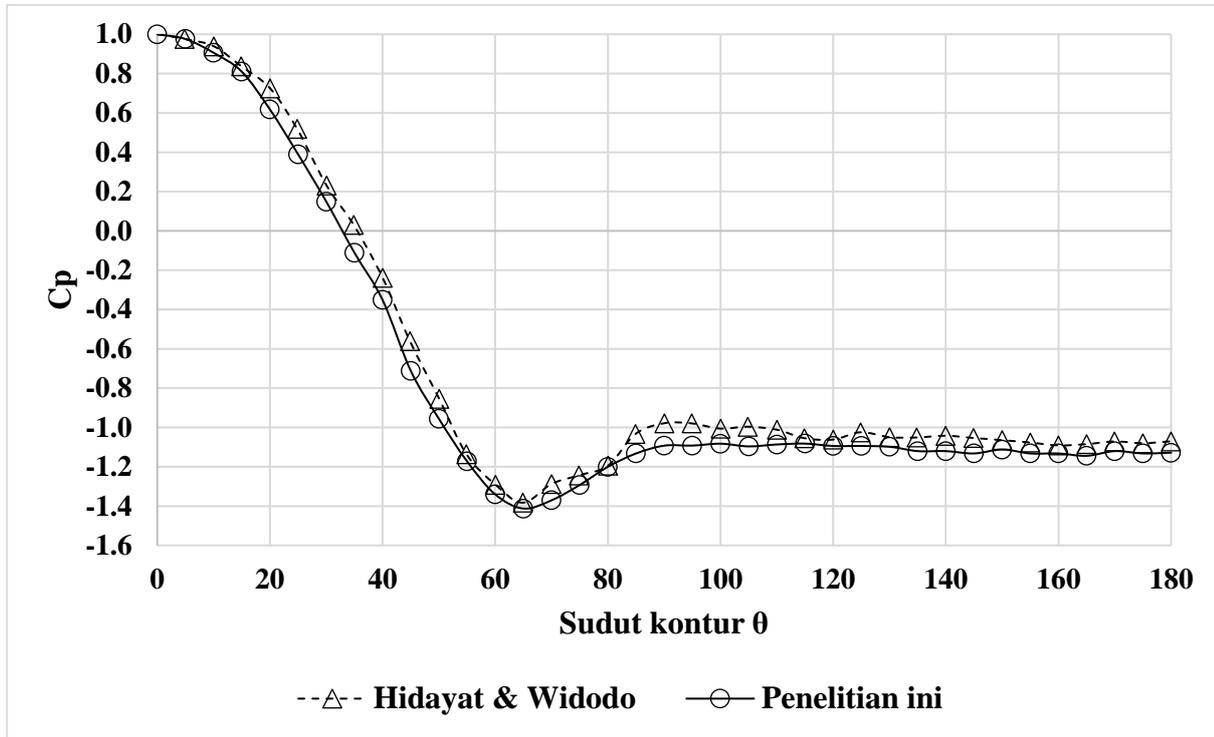
Struktur penulisan pada bab ini membahas mengenai penambahan bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran yang melewati silinder sirkular tandem pada variasi jarak antar sumbu silinder ( $L/D$ ). Penulisan diawali pembahasan mengenai pengaruh peningkatan bilangan Reynolds terhadap *pressure drop* saluran. Selanjutnya ditampilkan hasil dan pembahasan distribusi koefisien tekanan silinder *upstream* dan silinder *downstream* untuk konfigurasi tandem. Kemudian pada bab ini akan ditampilkan distribusi koefisien *drag pressure* untuk masing-masing konfigurasi silinder tandem. Untuk memperjelas perbedaan tiap konfigurasi tandem, ditampilkan pula profil kecepatan di belakang konfigurasi tandem. Hasil yang ditampilkan pada bab ini hanya beberapa konfigurasi jarak antar sumbu silinder. Untuk hasil lengkap dapat dilihat pada bagian lampiran.

#### 4.1 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Tunggal

Pada sub bab ini akan dibahas perbandingan data hasil eksperimen dengan hasil pada penelitian terdahulu yang memiliki topik dan tujuan sama dalam pelaksanaan penelitiannya. Penelitian yang akan dibandingkan adalah hasil dari penelitian yang dilakukan oleh **Hidayat & Widodo (2014)**. Pada sub bab ini ditampilkan data hasil eksperimen meliputi distribusi koefisien tekanan permukaan ( $C_p$ ) yang diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.1) untuk silinder tunggal tanpa bodi pengganggu yang kemudian dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) dari penelitian terdahulu pada konfigurasi yang sama yaitu silinder sirkular dengan diameter  $D = 25$  mm.

Pada **Gambar 4.1** ditampilkan perbandingan koefisien tekanan pada konfigurasi silinder tunggal tanpa bodi pengganggu antara penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan oleh **Hidayat & Widodo (2014)** pada *wind tunnel* dengan diameter silinder sirkular  $D=25$ mm yang diuji pada bilangan Reynolds sebesar  $1,56 \times 10^5$ , sedangkan penelitian saat ini dilakukan pada bilangan Reynolds ( $Re_{Dh}$ )  $1,33 \times 10^5$ . Dapat dilihat pada **Gambar 4.1** bahwa terlihat perbandingan grafik tidak memiliki perbedaan yang signifikan, tren yang ditunjukkan sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Hidayat & Widodo (2014)**. Pada kedua grafik menunjukkan bahwa terjadi titik stagnasi pada sudut  $0^\circ$  dengan nilai  $C_p$  sebesar 1, lalu aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik secara ekstrem hingga mencapai titik maksimum yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan paling rendah pada sudut sekitar  $70^\circ$ , kemudian aliran mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure gradient* yang ditandai dengan peningkatan koefisien tekanan. Pada satu titik, aliran

tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan hingga terjadi separasi yang ditandai dengan koefisien tekanan yang mulai *steady* pada sudut sekitar 90°.



**Gambar 4.1** Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Tunggal Penelitian ini dengan (Hidayat & Widodo, 2014)

#### 4.2 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Upstream dan Silinder Downstream Konfigurasi Tandem tanpa Bodi Pengganggu

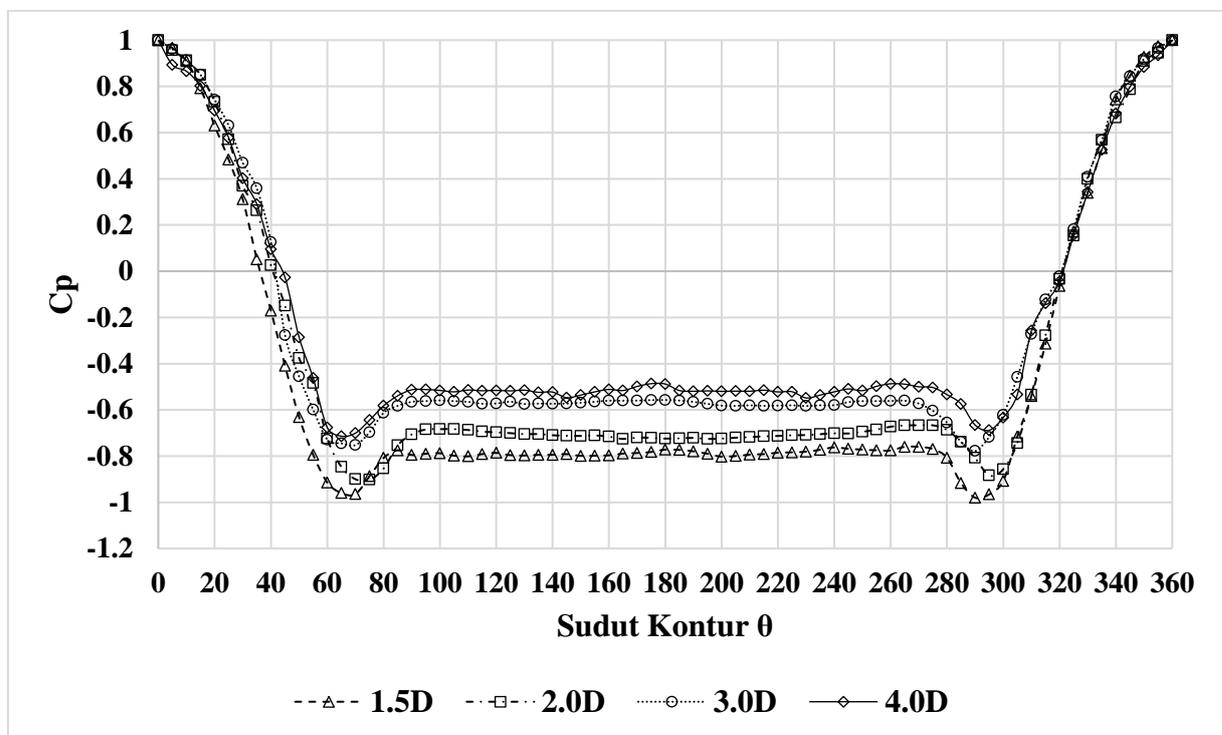
Pada sub bab ini menampilkan data kuantitatif hasil eksperimen meliputi distribusi koefisien tekanan permukaan ( $C_p$ ) yang diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.1) untuk konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu. Data koefisien tekanan disajikan dalam bentuk grafik. Data yang akan disajikan pada bagian ini untuk variasi konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 1,5; 2,0; 3,0; dan 4,0. Pembahasan data dilakukan pada bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ , untuk hasil eksperimen lebih lengkap dapat dilihat pada lampiran.

Distribusi koefisien tekanan permukaan silinder *upstream* **Gambar 4.2** (a) menunjukkan tren grafik yang hampir sama untuk tiap variasi jarak ( $L/D$ ). Posisi letak titik stagnasi berada tepat pada sudut 0°, dengan nilai koefisien tekanan sama dengan 1 (satu). Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan penurunan nilai  $C_p$  pada grafik secara ekstrem hingga aliran mencapai kecepatan maksimum yang ditandai dengan nilai koefisien tekanan terendah. Pada konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 1,5 aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 65°-70° untuk sisi *upper side*, sedangkan untuk sisi *lower side* aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 290°. Pada konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 2,0 aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 70°-75° untuk sisi *upper side*, dan sudut 295° untuk sisi *lower side*. Pada konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 3,0 sisi *upper side* aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 65°-70°, dan untuk sisi *lower side* sudut

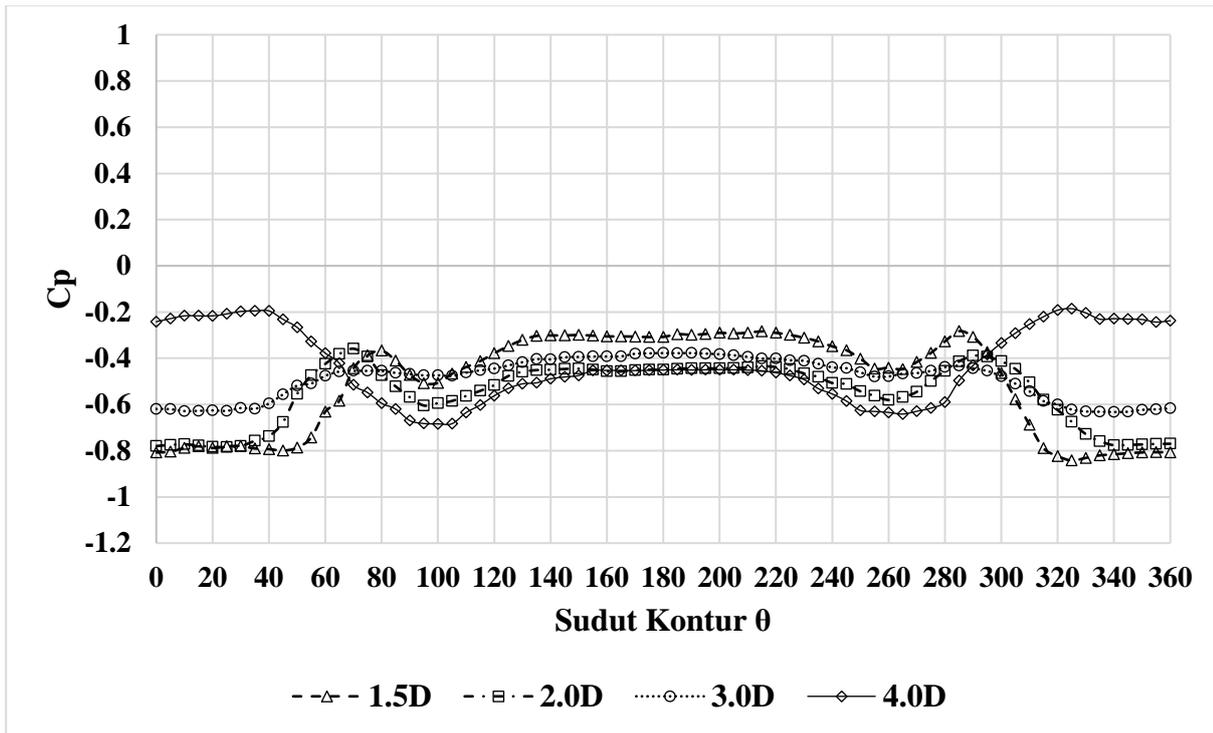
290°. Pada konfigurasi jarak (L/D) 4,0 aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 65°-70° untuk sisi *upper side*, dan sudut 295° untuk sisi *lower side*.

Aliran kemudian mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure* yang ditandai dengan adanya kenaikan pada nilai koefisien tekanan, hingga pada satu titik dimana aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga terjadi separasi. Pada grafik, titik separasi ditandai dengan nilai koefisien tekanan yang mulai stabil. Pada semua konfigurasi jarak tanpa bodi pengganggu titik separasi aliran relatif sama yaitu pada sudut 90° untuk sisi *upper* dan sudut 270° untuk sisi *lower*. Adapun perbedaan dari masing-masing variasi jarak terlihat pada *base pressure* atau nilai tekanan yang berada disepanjang daerah separasi aliran, dimana nilai *base pressure* tertinggi berada pada konfigurasi jarak (L/D) 4,0 sedangkan nilai *base pressure* terendah berada pada konfigurasi jarak (L/D) 1,5.

**Gambar 4.2** (b) menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) permukaan silinder *downstream* untuk konfigurasi tanpa bodi pengganggu. Konfigurasi silinder *downstream* tanpa bodi pengganggu memiliki distribusi koefisien tekanan yang bernilai negatif untuk semua konfigurasi jarak (L/D), hal tersebut dikarenakan pada jarak tertentu silinder *downstream* masih berada pada daerah wake dari silinder *upstream* sehingga silinder *downstream* masih terpengaruh aliran fluida silinder *upstream*. Pada kasus seperti yang terjadi pada **Gambar 4.2** (b), dimana terdapat peak pada sisi *upper* maupun sisi *lower* dalam distribusi koefisien tekanan menunjukkan bahwa *shear layer* silinder *upstream* mengalami *re-attachment* pada silinder *downstream*, hingga terbagi menjadi dua arah aliran yaitu *forward shear layer* (FSL) aliran yang mengalir kembali ke arah silinder *upstream* dan *backward shear layer* (BSL) dimana aliran mengalir menuju silinder *downstream*.



(a)



(b)

**Gambar 4.2** Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*; (b) *Downstream* pada Konfigurasi Tandem Tanpa Bodi Pengganggu untuk Bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ .

Aliran yang melewati silinder *downstream* tanpa bodi pengganggu, untuk konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 1,5 aliran mengalami *re-attachment* pada sudut  $80^\circ$  untuk sisi *upper* dan sudut  $285^\circ$  untuk sisi *lower*, yang ditandai dengan adanya *peak* pada distribusi grafik koefisien tekanan, kemudian terjadi percepatan aliran hingga sudut sekitar  $90^\circ$  lalu aliran mengalami perlambatan hingga akhirnya terseparasi pada sudut  $130^\circ$  untuk sisi *upper* dan sudut  $215^\circ$  untuk sisi *lower*. Selanjutnya untuk konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 2,0, titik *re-attachment* terletak pada sudut  $70^\circ$  untuk *upper side* dan pada sudut  $290^\circ$  untuk *lower side*, kemudian aliran mengalami separasi pada sudut  $130^\circ$  pada sisi *upper* dan sudut  $220^\circ$  pada sisi *lower*. Lalu untuk konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 3,0, pada sisi *upper* aliran mengalami *re-attachment* pada sudut sekitar  $70^\circ$  dan pada sisi *lower* aliran mengalami *re-attachment* pada sudut  $285^\circ$  dan aliran mengalami separasi di titik yang terletak pada sudut  $135^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $205^\circ$  untuk *lower side*. Kemudian untuk konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 4,0 titik *re-attachment* aliran terjadi pada sudut  $35^\circ$  pada *upper side* dan sudut  $325^\circ$  pada *lower side* dan aliran terseparasi pada sudut  $155^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $215^\circ$  untuk *lower side*. Untuk perbandingan titik *re-attachment* dan separasi silinder *downstream* tanpa bodi pengganggu untuk tiap konfigurasi jarak dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

**Tabel 4.1** Posisi Sudut *re-attachment* dan Separasi Silinder *Downstream* pada Konfigurasi Silinder Tandem Tanpa Bodi Pengganggu

L/D	<i>Upper side</i>		<i>Lower side</i>	
	<i>Re-attach</i>	Separasi	<i>Re-attach</i>	Separasi
1,5	$80^\circ$	$130^\circ$	$285^\circ$	$215^\circ$

2,0	70°	130°	290°	220°
3,0	70°	135°	285°	220°
4,0	35°	155°	325°	215°

### 4.3 Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Upstream dan Silinder Downstream Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu 30°

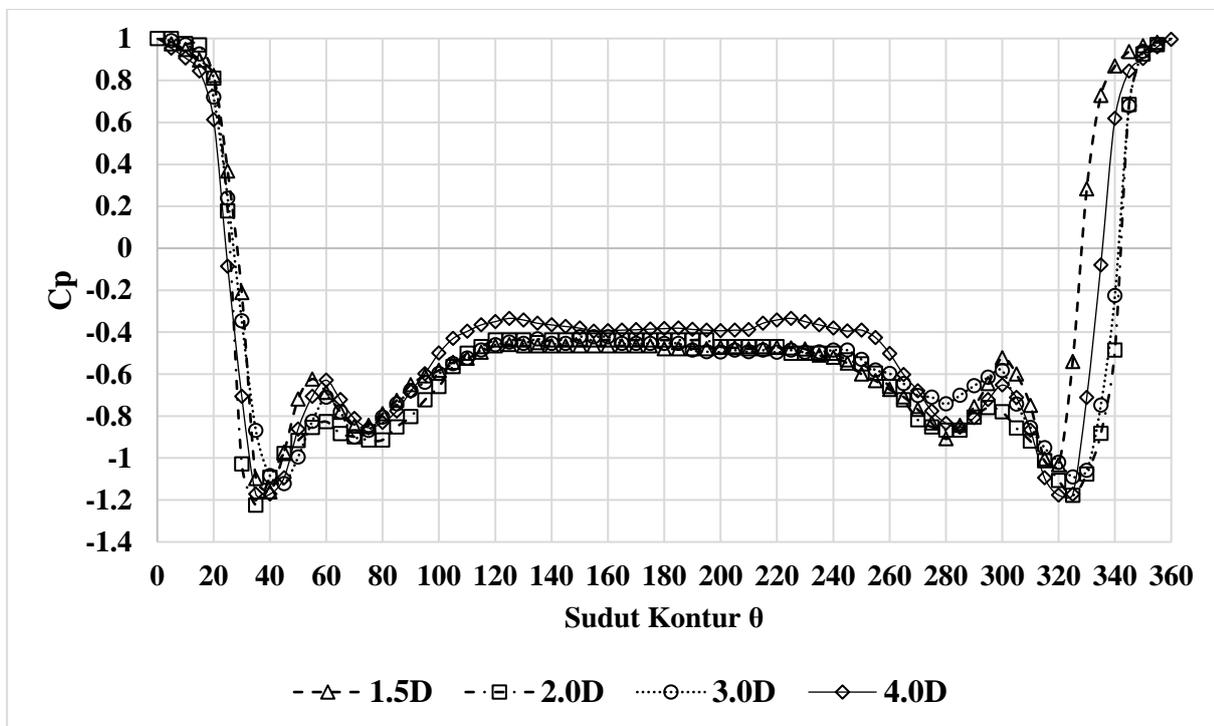
Pada bagian ini sama seperti sub bab sebelumnya, akan ditampilkan data kuantitatif hasil eksperimen meliputi distribusi koefisien tekanan permukaan ( $C_p$ ) yang diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.1) untuk konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30°. Data koefisien tekanan disajikan dalam bentuk grafik yang terbagi menjadi dua, yaitu grafik silinder *upstream* dan grafik silinder *downstream*. Data yang akan disajikan pada bagian ini untuk variasi konfigurasi jarak (L/D) 1,5; 2,0; 3,0; dan 4,0. Pembahasan data dilakukan pada bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ , untuk hasil eksperimen lebih lengkap dapat dilihat pada lampiran. Untuk melihat perubahan yang terjadi di sepanjang kontur permukaan silinder seperti titik stagnasi, titik separasi maka akan dianalisa melalui grafik koefisien tekanan yang ditunjukkan pada **Gambar 4.3**.

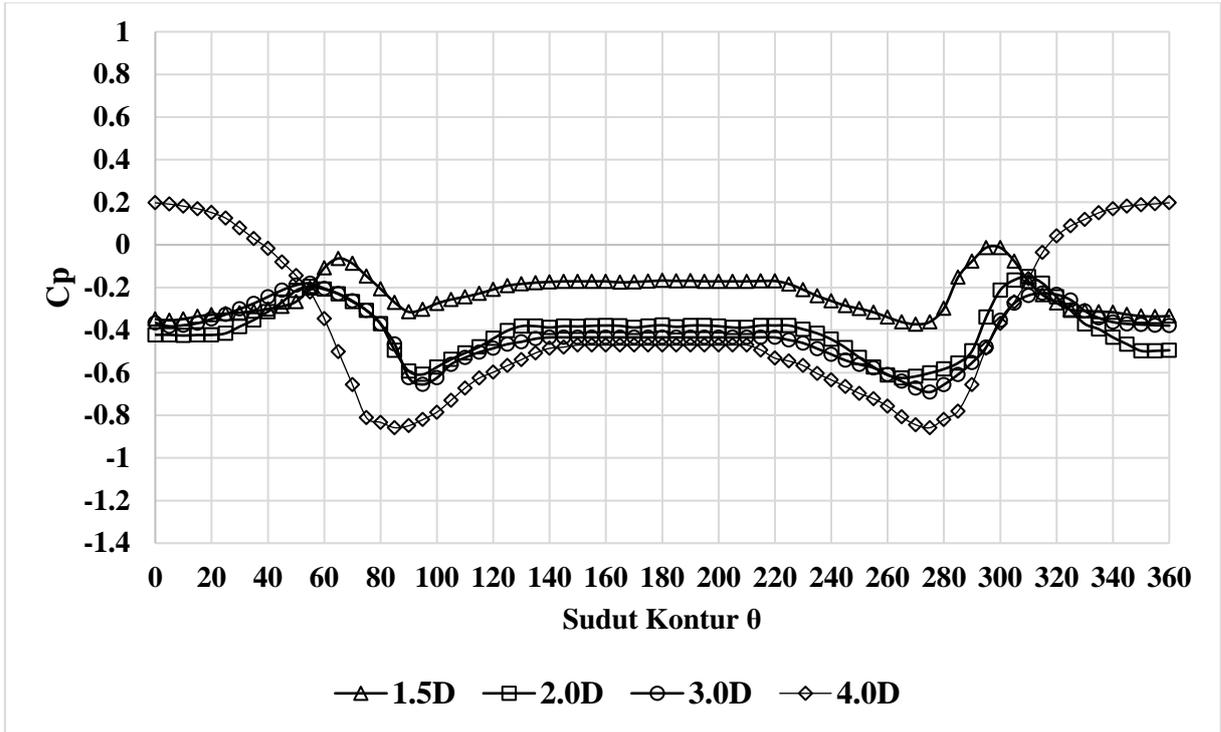
Distribusi koefisien tekanan silinder *upstream* konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30° **Gambar 4.3** (a) sama seperti distribusi tekanan pada konfigurasi lain, dimana titik stagnasi koefisien tekanan silinder *upstream* untuk konfigurasi ini bernilai satu dan terletak pada sudut 0°. Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang tidak terlalu signifikan ditandai dengan turunnya nilai koefisien tekanan secara perlahan. Hal tersebut akibat adanya penambahan bodi pengganggu pada sisi *inlet* sehingga menghambat laju fluida yang mengalir. Selanjutnya aliran mulai mengalami percepatan yang signifikan hingga aliran mencapai kecepatan maksimumnya pada sudut 40° untuk *upper side* dan pada sudut 320° untuk *lower side*. Kecepatan maksimum aliran terjadi sesaat setelah aliran melewati bodi pengganggu, hal ini diakibatkan oleh timbulnya boundary layer diantara silinder utama dan bodi pengganggu. Setelah melewati daerah kecepatan maksimum, aliran kemudian mulai mengalami perlambatan hingga terjadi separasi, namun akibat adanya pengaruh wake dari bodi pengganggu dan momentum aliran yang lebih besar daripada momentum aliran yang terseparasi maka menyebabkan terlepasnya shear layer akan mengalami *re-attachment* ke permukaan silinder *upstream* hal tersebut dapat diamati melalui adanya *peak* pada grafik distribusi koefisien tekanan. Titik terjadinya fenomena *re-attachment* terjadi pada sudut 55° untuk *upper side* dan sudut 300° untuk *lower side*. Selanjutnya aliran kembali mengikuti kontur permukaan silinder yang ditandai dengan penurunan nilai koefisien tekanan dimana aliran mengalami percepatan sesaat hingga akhirnya mencapai kecepatan maksimumnya yg lain dan mulai mengalami perlambatan dikarenakan aliran melewati daerah *adverse pressure*. Pada satu titik, ketika aliran sudah tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan yang timbul, maka terjadilah separasi aliran yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan yang cenderung stabil.

Distribusi titik *re-attachment* silinder *upstream* pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30°, pada variasi (L/D) 1,5 aliran mengalami *re-attachment* pada sudut 55° untuk *upper side* dan sudut 300° untuk *lower side*. Selanjutnya untuk variasi (L/D) 2,0 aliran mengalami *re-attachment* pada sudut 60° untuk *upper side* dan sudut 295° untuk *lower side*. Kemudian pada variasi (L/D) 3,0 aliran mengalami *re-attachment* pada sudut 60° untuk *upper*

side dan sudut  $300^\circ$  untuk *lower side*. Lalu, pada variasi (L/D) 4,0 aliran mengalami *re-attachment* pada sudut  $60^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $300^\circ$  untuk *lower side*. Untuk distribusi titik separasi aliran melalui silinder *upstream* pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu  $30^\circ$ , pada variasi (L/D) 1,5 aliran mengalami separasi pada sudut  $120^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $230^\circ$  untuk *lower side*. Pada variasi (L/D) 2,0 aliran mengalami separasi pada sudut  $120^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $240^\circ$  untuk *lower side*. Selanjutnya untuk variasi (L/D) 3,0 aliran mengalami separasi pada sudut  $120^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $245^\circ$  untuk *lower side*, dan pada variasi (L/D) 4,0 aliran mengalami separasi pada sudut  $120^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $250^\circ$  untuk *lower side*.

Distribusi koefisien tekanan silinder *downstream* konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu  $30^\circ$  **Gambar 4.3 (b)** memiliki tren yang cenderung serupa untuk konfigurasi jarak (L/D) 1,5 hingga 3,0, koefisien tekanan pada konfigurasi tersebut bernilai negatif. Sama hal tersebut menunjukkan bahwa silinder *downstream* masih berada pada daerah yang terlindungi oleh wake silinder *upstream*. Adanya *peak* pada distribusi koefisien tekanan mengindikasikan bahwa *shear layer* yang terpisah dari silinder *upstream* mengalami *re-attachment* dengan permukaan silinder *downstream*. Pada konfigurasi jarak (L/D) 1,5, aliran mengalami *re-attachment upper side* pada sudut  $65^\circ$  dan *lower side* pada sudut  $295^\circ$ , dengan titik separasi yang terjadi pada sudut  $135^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $220^\circ$  untuk *lower side*. Pada konfigurasi jarak (L/D) 2,0, aliran mengalami *re-attachment upper side* pada sudut  $55^\circ$  dan *lower side* pada sudut  $310^\circ$ , dengan titik separasi yang terjadi pada sudut  $130^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $220^\circ$  untuk *lower side*. Pada konfigurasi jarak (L/D) 3,0, aliran mengalami *re-attachment upper side* pada sudut  $55^\circ$  dan *lower side* pada sudut  $315^\circ$ , dengan titik separasi yang terjadi pada sudut  $140^\circ$  untuk *upper side* dan sudut  $220^\circ$  untuk *lower side*.





(b)

**Gambar 4.3** Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*; (b) *Downstream* pada Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu 30° untuk Bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ .

**Tabel 4.2** Posisi Sudut *re-attachment* dan Separasi Silinder *Downstream* pada Konfigurasi Silinder Tandem dengan Bodi Pengganggu 30°.

L/D	<i>Upper side</i>		<i>Lower side</i>	
	<i>Re-attach</i>	Separasi	<i>Re-attach</i>	Separasi
1,5	65°	135°	295°	220°
2,0	55°	130°	310°	220°
3,0	55°	140°	315°	220°
4,0	0°	140°	360°	210°

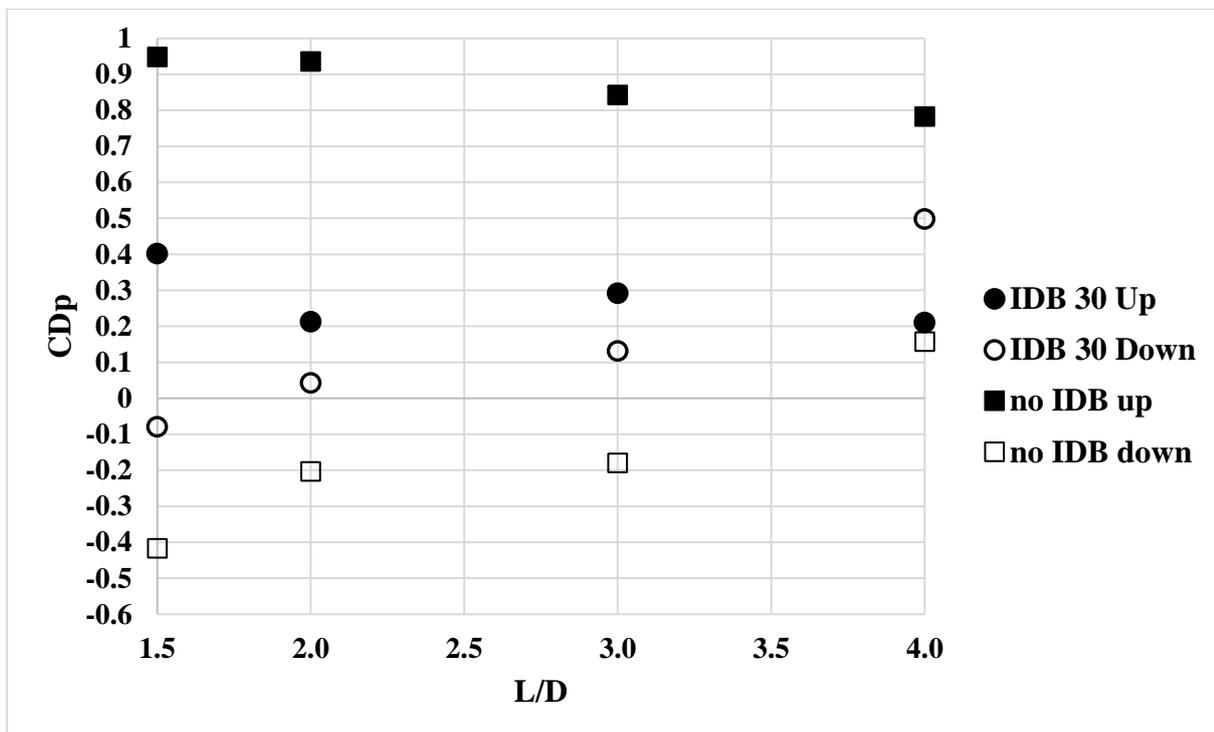
Tren grafik distribusi koefisien tekanan pada konfigurasi jarak (L/D) 4,0 mulai mendekati tren koefisien silinder tunggal, hal ini merupakan akibat pengaruh dari *wake* silinder *upstream* yang mulai berkurang terhadap silinder *downstream*. Posisi titik letak terjadinya *attach shear layer* dari silinder *upstream* berada pada sudut 0°, lalu akibat pengaruh dari *wake* silinder *upstream* yang sudah semakin berkurang sama halnya seperti pola distribusi koefisien tekanan silinder tunggal aliran mengalami percepatan hingga mencapai kecepatan maksimum pada sudut sekitar 85° pada *upper side*. Setelah mengalami percepatan hingga mencapai kecepatan maksimum, aliran mengalami perlambatan perlambatan akibat adanya *adverse pressure* hingga pada satu titik, aliran tidak mampu untuk melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga terjadi separasi yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan yang mulai stabil pada sudut 140°. Distribusi posisi titik *re-attachment* dan Separasi Silinder *Downstream* untuk

Konfigurasi Silinder Tandem dengan Bodi Pengganggu 30° secara lebih jelas dapat dilihat pada **Tabel 4.2**.

#### 4.4 Distribusi Koefisien *Pressure Drag* Silinder Konfigurasi Tandem

Untuk silinder yang diberi penambahan bodi pengganggu di sisi arah fluida datang, maka akan terjadi suatu proses interaksi antara *streamline* bodi pengganggu dengan *streamline* silinder yang saling mempengaruhi satu dengan lainnya. Sehingga akan menimbulkan gaya *drag*. Seperti diketahui bahwa koefisien *drag* (gaya hambat) terdiri dari koefisien *pressure drag* dan *skin friction drag*. Namun, pada kasus silinder sirkular koefisien *pressure drag* ( $C_{Dp}$ ) jauh lebih dominan dibandingkan dengan *skin friction drag*. Sehingga koefisien *pressure drag* ( $C_{Dp}$ ) dapat dikatakan mendekati nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ). Pada bagian ini dibahas pengaruh penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi tandem maupun pengaruh variasi jarak antar silinder ( $L/D$ ) terhadap distribusi koefisien *pressure drag* ( $C_{Dp}$ ). Nilai koefisien *pressure drag* ( $C_{Dp}$ ) pada kedua silinder sirkular untuk tiap konfigurasi ditampilkan pada **Gambar 4.4**. koefisien *pressure drag* silinder *upstream* maupun silinder *downstream* diperoleh menggunakan persamaan (2.9).

Dari **Gambar 4.4**, untuk silinder *upstream* terlihat bahwa koefisien nilai *pressure drag* tertinggi terjadi pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu (IDB) pada jarak  $L/D$  1,5 dan untuk yang terendah pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu pada jarak  $L/D$  4,0. Untuk silinder *downstream* distribusi koefisien *pressure drag* relatif lebih rendah, kecuali pada jarak  $L/D$  4,0 yang lebih tinggi daripada silinder *upstream*. Nilai distribusi koefisien *pressure drag* silinder *downstream* tertinggi yaitu sebesar 0,497 pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu jarak  $L/D$  4,0. Hal tersebut diakibatkan oleh distribusi koefisien tekanan pada konfigurasi ini yang hampir mendekati silinder tunggal seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.2** (b).



**Gambar 4.4** Koefisien *Pressure Drag* Bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ .

Penambahan bodi pengganggu pada sudut  $30^\circ$  dapat mereduksi gaya *drag* silinder *upstream* secara optimal hal tersebut dapat diamati dari terjadinya penurunan nilai  $C_{Dp}$  dari silinder *upstream* untuk semua konfigurasi jarak ( $L/D$ ), namun gaya *drag* silinder *downstream* cenderung lebih tinggi daripada gaya *drag* silinder *downstream* pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu. Pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu pada jarak  $L/D$  1,5 silinder *downstream* memiliki nilai *base pressure* yang relatif tinggi oleh karena itu konfigurasi tersebut memiliki nilai koefisien *pressure drag* ( $C_{Dp}$ ) yang rendah, sedangkan pada konfigurasi  $L/D$  2,0; 3,0; dan 4,0 memiliki nilai *base pressure* yang cenderung lebih rendah sehingga untuk konfigurasi yang sama memiliki nilai koefisien *pressure drag* lebih tinggi meningkat seiring dengan bertambahnya jarak. Nilai  $C_{Dp}$  yang negatif menunjukkan bahwa luas daerah *wake* yang ditimbulkan berada di depan dari silinder *downstream*.

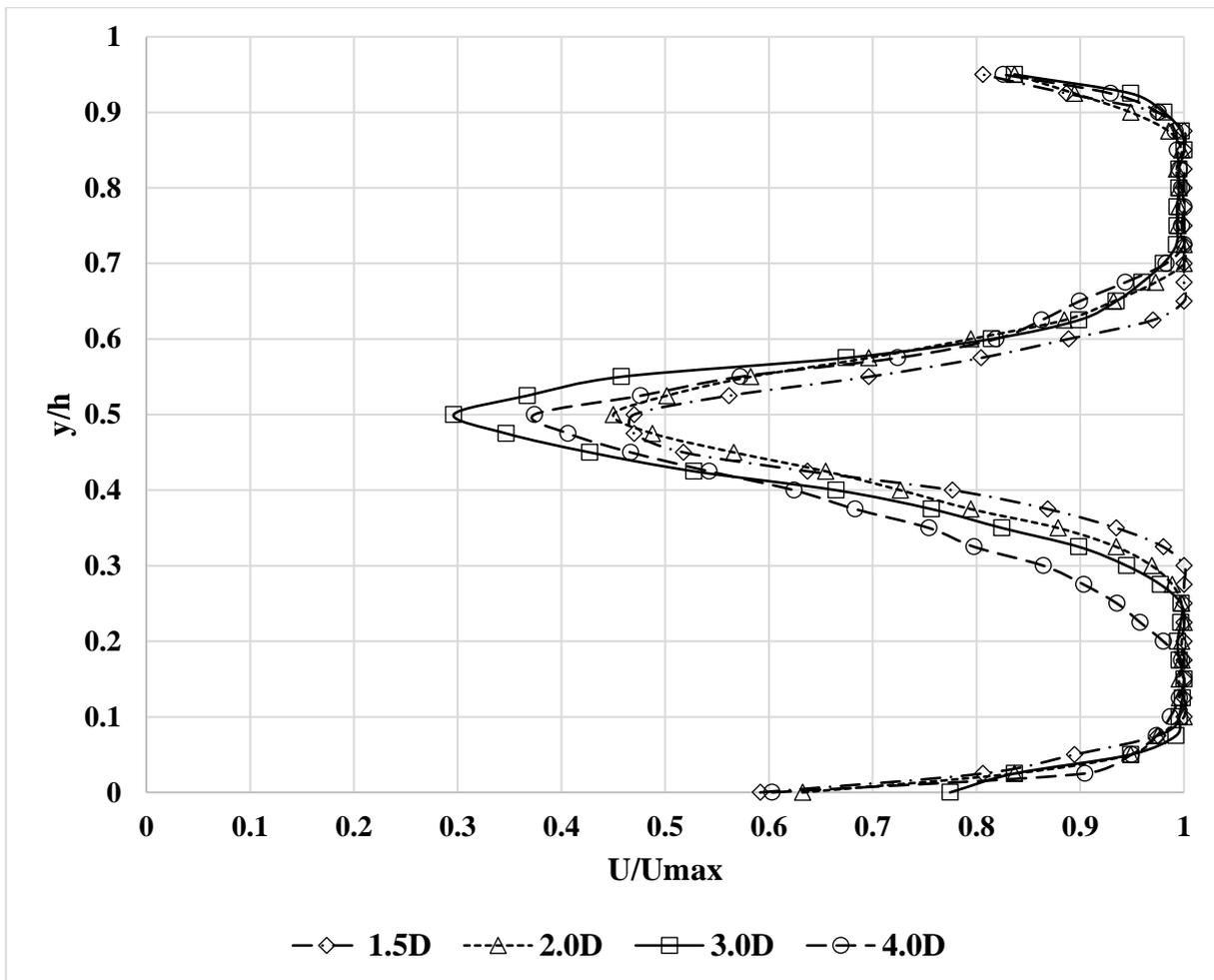
Distribusi koefisien *pressure drag* pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu untuk silinder *upstream* menunjukkan pola yang cenderung berfluktuasi untuk tiap variasi jaraknya. Seperti dapat dilihat pada **Gambar 4.4** terjadi penurunan nilai koefisien *pressure drag* pada variasi jarak  $L/D$  1,5 dan 2,0 dikarenakan terdapat perbedaan nilai *base pressure* dari kedua konfigurasi tersebut, dimana nilai *base pressure* dari konfigurasi jarak  $L/D$  2,0 lebih tinggi jika dibandingkan dengan konfigurasi jarak  $L/D$  1,5. Lalu nilai koefisien *pressure drag* silinder *upstream* mengalami peningkatan pada konfigurasi jarak  $L/D$  2,0 dan 3,0, hal tersebut dapat diamati juga dimana nilai *base pressure* konfigurasi jarak  $L/D$  2,0 lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi jarak  $L/D$  3,0. Setelah itu nilai koefisien *pressure drag* kembali mengalami penurunan menuju nilai terendah yaitu pada konfigurasi jarak  $L/D$  4,0, hal serupa seperti sebelumnya juga dapat diamati ketika suatu konfigurasi memiliki nilai *base pressure* yang lebih tinggi, maka nilai koefisien *pressure drag* pada konfigurasi tersebut cenderung akan lebih rendah.

#### 4.5 Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder Tandem

Pada sub bab ini ditampilkan hasil eksperimen berupa distribusi profil kecepatan di belakang konfigurasi silinder tandem pada *wind tunnel* berpenampang oktagonal. Profil kecepatan merupakan bilangan tak berdimensi yang terdiri dari perbandingan  $y/h$  dan  $U/U_{max}$  atau kecepatan referensi. Nilai  $y/h$  bernilai nol pada posisi tepat di sisi bawah *duct* dan bernilai tepat satu ketika berada tepat di sisi atas *duct*. Sedangkan besar  $U/U_{max}$  nilainya bervariasi bergantung pada besar profil kecepatan pada suatu titik. Pengambilan data profil kecepatan menggunakan *pitot static tube* yang diletakkan di belakang konfigurasi silinder tandem pada jarak minimal  $4D$  dari silinder *downstream*. Konfigurasi silinder tandem divariasikan tanpa bodi pengganggu dan dengan penambahan bodi pengganggu di sisi *inlet*. Dengan posisi penempatan bodi pengganggu pada sudut  $30^\circ$  dan variasi konfigurasi jarak antar silinder  $L/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$ . Pembahasan data dilakukan pada bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ , untuk hasil eksperimen lebih lengkap dapat dilihat pada lampiran.

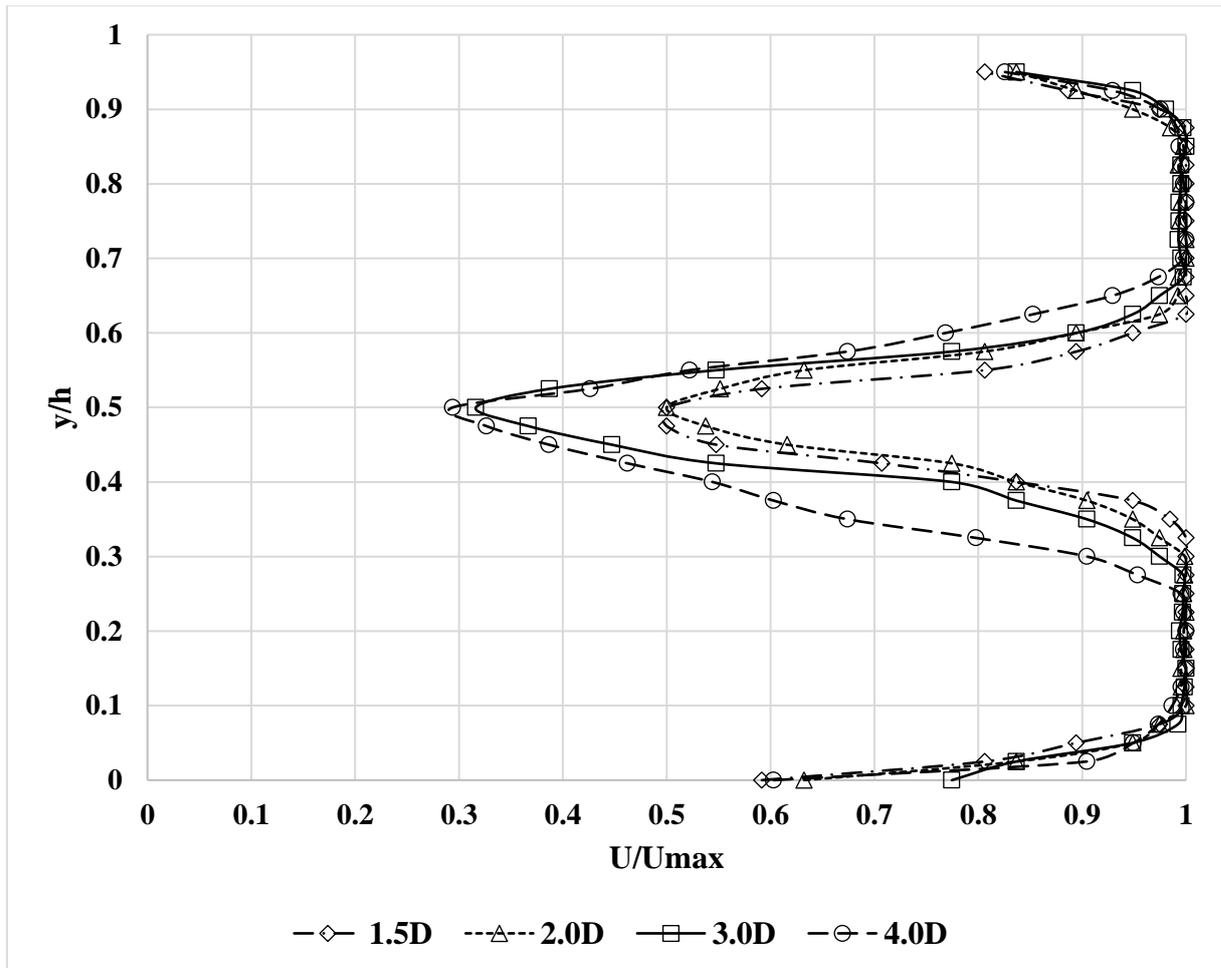
Pembahasan mengenai profil kecepatan di belakang konfigurasi silinder tanpa bodi pengganggu (**Gambar 4.5**) yang diperoleh secara eksperimen. Hasil distribusi profil kecepatan menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem tanpa bodi pengganggu terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara variasi konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 1,5 dan 2,0 dibandingkan dengan variasi konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 3,0 dan 4,0. Dari grafik dapat dilihat bahwa pada konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 4,0 dan 3,0 terjadi defisit momentum yang besar, dimana defisit terbesar terjadi

pada konfigurasi jarak  $L/D$  3,0, hal tersebut ditandai dengan nilai  $U/U_{max}$  yang paling rendah daripada konfigurasi jarak lainnya. Pada konfigurasi silinder tandem aliran yang melintasi silinder *upstream* akan mempengaruhi silinder *downstream*, dimana *wake* yang timbul akan mengenai silinder *downstream* pada jarak tertentu. Pada jarak yang lebih dekat *wake* yang terjadi akibat silinder *upstream* cenderung melingkupi silinder *downstream*, adapun ketika jarak relatif jauh maka *wake* yang timbul akibat silinder *upstream* semakin kecil pula mempengaruhi silinder *downstream* hingga silinder aliran yang melintasi silinder *downstream* mendekati silinder tunggal. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa adanya pengurangan nilai  $U/U_{max}$  mengindikasikan *wake* yang terbentuk di belakang susunan konfigurasi silinder. Hasil distribusi profil kecepatan menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem tanpa bodi pengganggu pada jarak  $L/D$  1,5 memiliki lebar *wake* tersempit.



**Gambar 4.5** Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder Tanpa Bodi Pengganggu pada Bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ .

Data hasil distribusi profil kecepatan **Gambar 4.6** menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu  $30^\circ$  menunjukkan pada konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 4,0 dan 3,0 terjadi defisit momentum yang besar, dimana defisit terbesar terjadi pada konfigurasi jarak  $L/D$  4,0, hal tersebut ditandai dengan nilai  $U/U_{max}$  yang paling rendah daripada konfigurasi jarak lainnya. Pada konfigurasi lain menunjukkan nilai  $U/U_{max}$  yang lebih tinggi, hal tersebut mengindikasikan bahwa defisit momentum yang terjadi lebih kecil.



**Gambar 4.6** Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder dengan Bodi Pengganggu 30° pada Bilangan Reynolds  $1,33 \times 10^5$ .

Pada konfigurasi silinder tandem aliran yang melintasi silinder *upstream* akan mempengaruhi silinder *downstream*, dimana *wake* yang timbul akan mengenai silinder *downstream* pada jarak tertentu. Pada jarak yang lebih dekat *wake* yang terjadi akibat silinder *upstream* cenderung melingkupi silinder *downstream*, adapun ketika jarak semakin jauh maka *wake* yang timbul akibat silinder *upstream* semakin kecil pula mempengaruhi silinder *downstream* hingga aliran yang melintasi silinder *downstream* akan mendekati silinder tunggal. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa adanya pengurangan nilai  $U/U_{max}$  mengindikasikan *wake* yang terbentuk di belakang susunan konfigurasi silinder. Hasil distribusi profil kecepatan menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu 30° pada jarak  $L/D$  1,5 memiliki lebar *wake* tersempit, sedangkan lebar *wake* terbesar terjadi pada konfigurasi jarak  $L/D$  4,0.

#### 4.6 Perbandingan Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada Konfigurasi Tandem

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai pengaruh penambahan bodi pengganggu 30° terhadap karakteristik aliran pada silinder *upstream* maupun *downstream* pada konfigurasi jarak ( $L/D$ ) 1,5 dan ( $L/D$ ) 4,0 dengan bilangan Reynolds sebesar  $1,33 \times 10^5$ . Pembahasan diawali

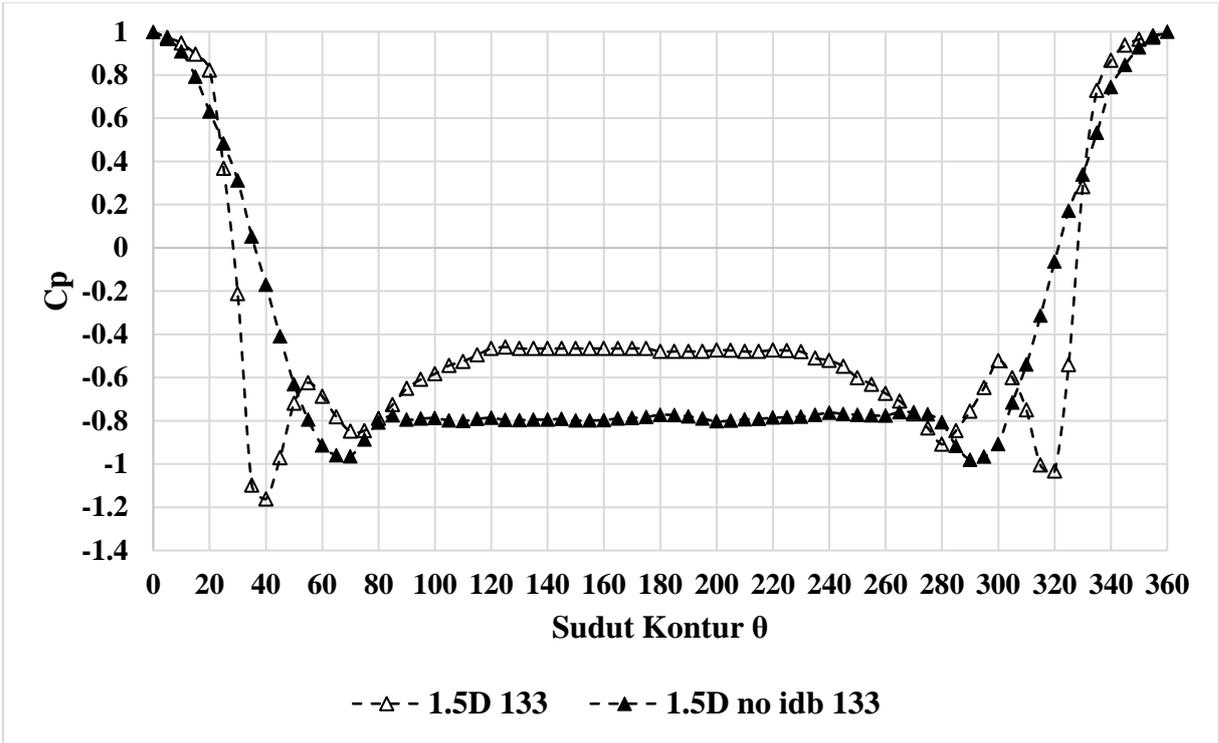
dengan membandingkan distribusi koefisien tekanan silinder *upstream* dan silinder *downstream*, lalu membandingkan profil kecepatan di belakang konfigurasi tandem hasil eksperimen.

#### 4.6.1 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada Konfigurasi Tandem Variasi Jarak L/D 1,5

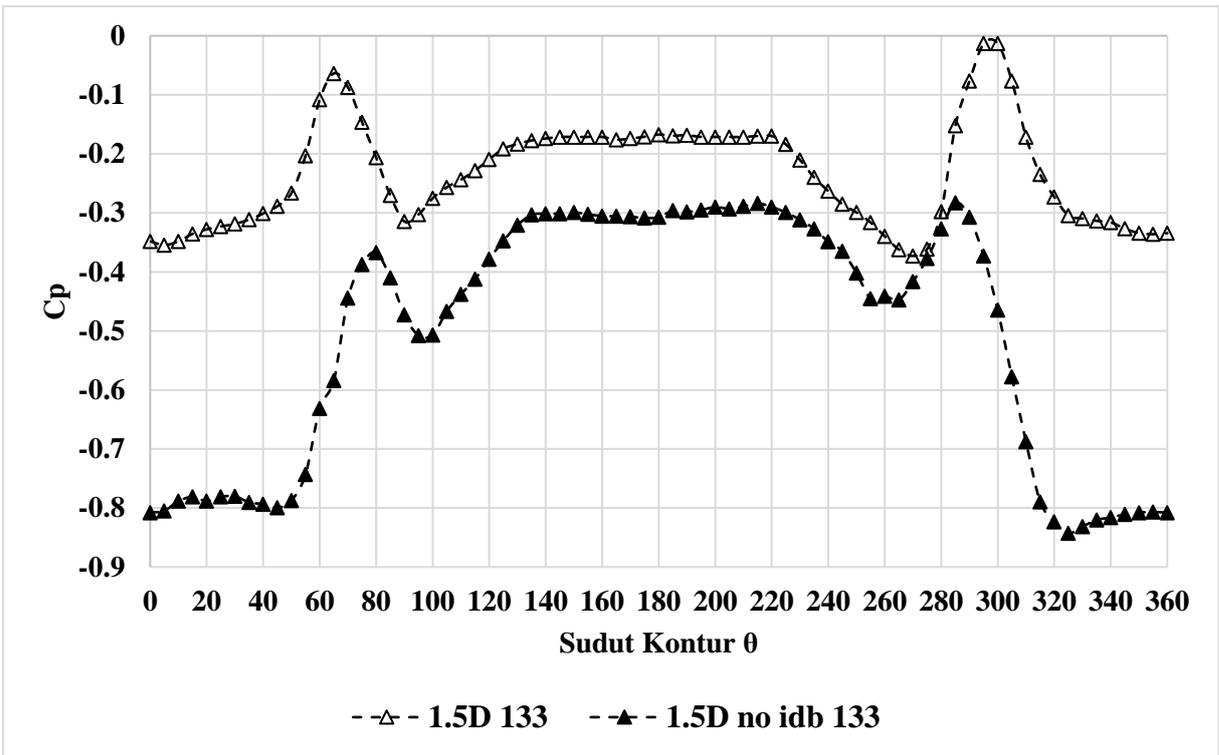
Pada bagian ini membahas pengaruh penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi tandem dengan variasi jarak (L/D) 1,5. Pembahasan meliputi perbedaan yang terjadi pada distribusi koefisien tekanan maupun profil kecepatan. Data yang dibahas akan disajikan dalam bentuk grafik silinder *upstream* dan *downstream* untuk distribusi koefisien tekanan dan grafik distribusi profil kecepatan.

**Gambar 4.7 (a)** menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder *upstream*. Tampak bahwa aliran pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu  $30^\circ$  lebih awal mengalami akselerasi menuju kecepatan maksimum pada sudut  $40^\circ$ , meskipun di awal konfigurasi ini sempat mengalami akselerasi yang tidak terlalu signifikan akibat adanya bodi pengganggu yang menghalangi laju aliran. Sedangkan pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu mengalami akselerasi lebih lambat menuju kecepatan maksimum yang terjadi pada sudut  $70^\circ$ . Untuk nilai koefisien tekanan terendah pada konfigurasi silinder tandem terjadi pada susunan dengan penambahan bodi pengganggu dengan nilai koefisien tekanan terendah yaitu sebesar -1,162. Untuk letak titik separasi, konfigurasi tanpa bodi pengganggu mengalami separasi aliran terlebih dahulu pada sudut  $90^\circ$  diikuti konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu yang berhasil menunda terjadinya separasi aliran menjadi lebih lambat yaitu terjadi pada sudut  $120^\circ$ . Hal tersebut karena pada konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu distribusi koefisien tekanan aliran mengalami *re-attachment* pada kontur yang terjadi pada sudut  $55^\circ$ , sedangkan pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu tidak terjadi fenomena tersebut.

**Gambar 4.7 (b)** menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder *downstream*. Tampak bahwa tren grafik distribusi koefisien tekanan relatif sama dengan distribusi koefisien tekanan yang bernilai negatif. Hal tersebut mengindikasikan bahwa silinder *downstream* baik pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu maupun dengan penambahan bodi pengganggu masih berada dalam daerah *wake* silinder *upstream*. Konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu memiliki distribusi koefisien tekanan lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu. Titik *re-attachment* konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu terjadi lebih awal yaitu pada sudut  $65^\circ$ , lalu diikuti oleh konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu yang mengalami *re-attachment* pada sudut  $80^\circ$ . Hal tersebut mengindikasikan bahwa daerah *wake* silinder *upstream* konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu lebih sempit dibandingkan dengan konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu.

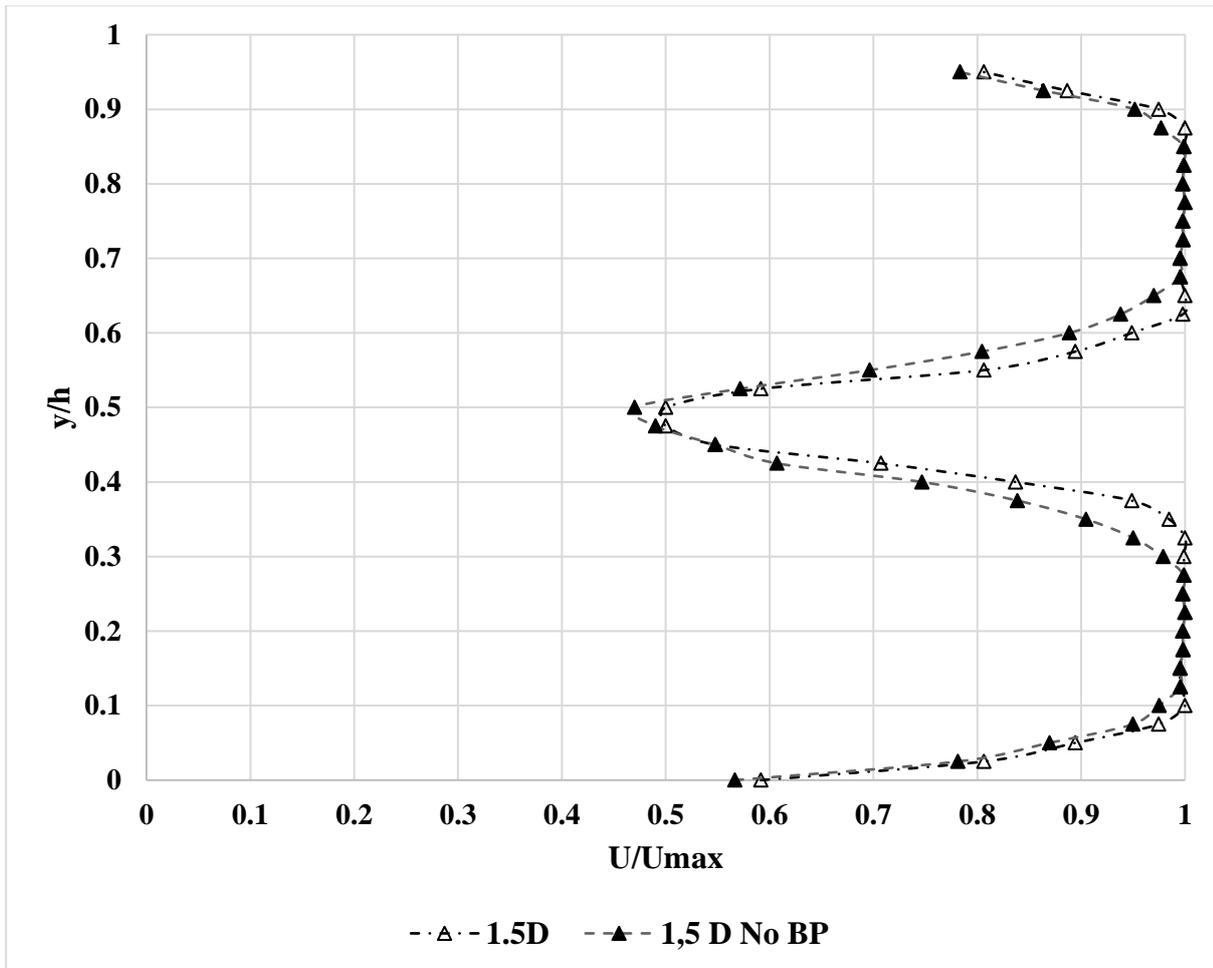


(a)



(b)

**Gambar 4.7** Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*, (b) *Downstream*, dengan Variasi Jarak  $L/D$  1,5.

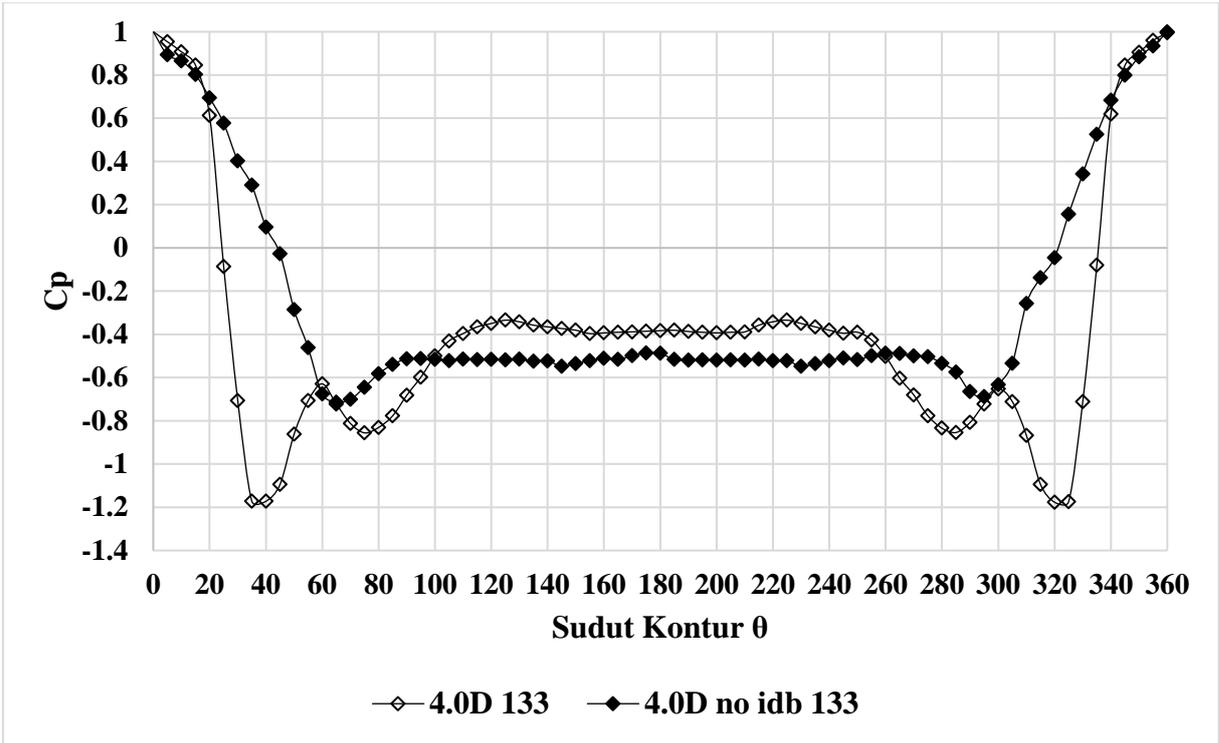


**Gambar 4.8** Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Tandem dengan Variasi Jarak ( $L/D$ ) 1,5.

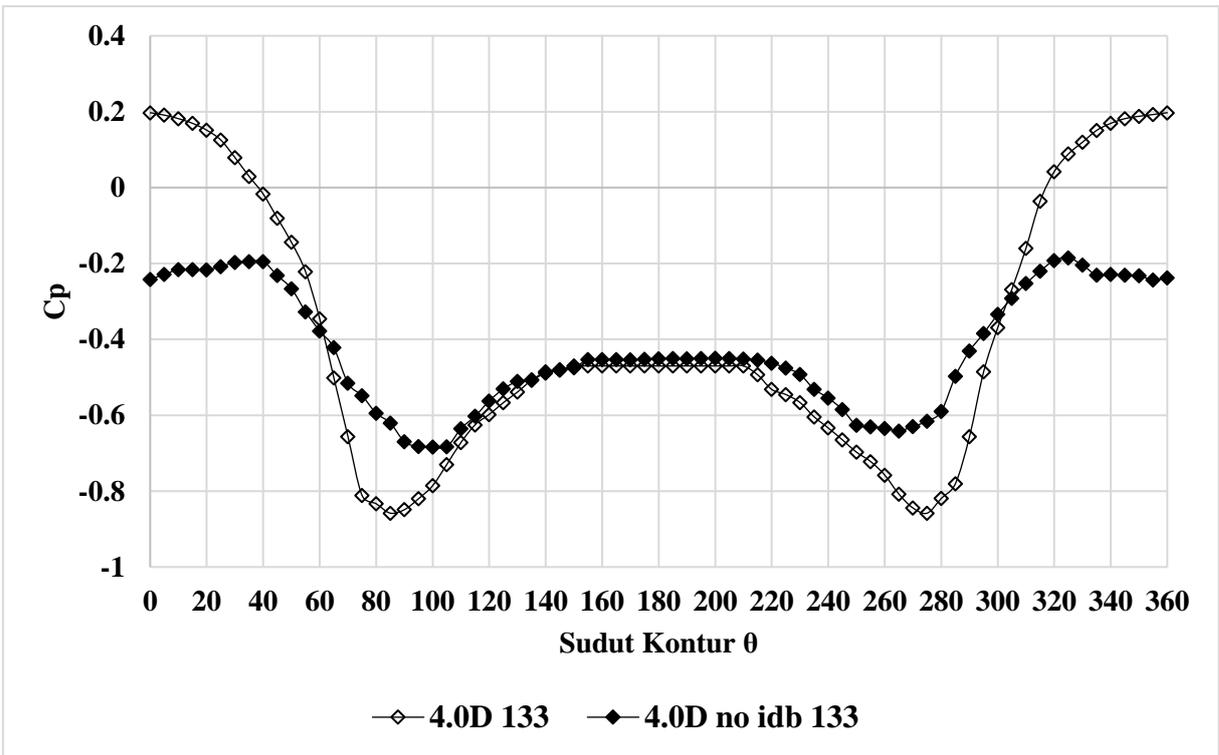
**Gambar 4.8** menunjukkan perbandingan distribusi profil kecepatan di belakang konfigurasi tandem pada variasi jarak ( $L/D$ ) 1,5. Tampak bahwa tren profil kecepatan dari variasi konfigurasi tandem sama. Lebar daerah *wake* antara konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu dan konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu hampir sama, namun pada konfigurasi dengan bodi pengganggu  $0,35 \leq y/h \leq 0,625$  terjadi penyempitan sedikit dibandingkan dengan konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu  $0,3 \leq y/h \leq 0,65$ .

#### 4.6.2 Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada Konfigurasi Tandem Variasi Jarak $L/D$ 4,0

Pada bagian ini membahas pengaruh penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi tandem dengan variasi jarak ( $L/D$ ) 4,0. Pembahasan meliputi perbedaan yang terjadi pada distribusi koefisien tekanan maupun profil kecepatan. Data yang dibahas akan disajikan dalam bentuk grafik silinder *upstream* dan *downstream* untuk distribusi koefisien tekanan dan grafik distribusi profil kecepatan.



(a)

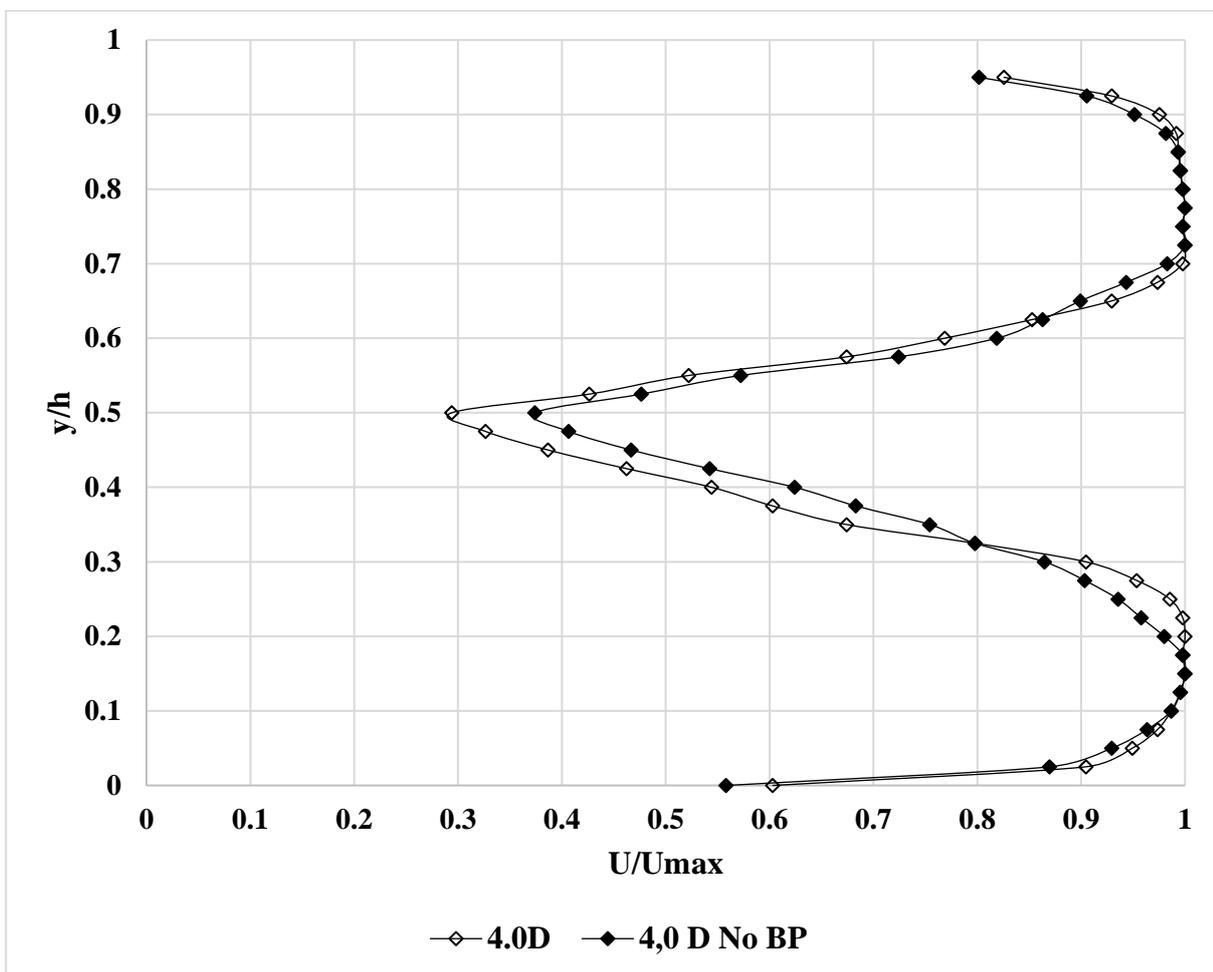


(b)

**Gambar 4.9** Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*, (b) *Downstream*, dengan Variasi Jarak  $L/D$  4,0.

**Gambar 4.9** (a) menampilkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder *upstream*. Dapat dilihat bahwa aliran pada konfigurasi tandem dengan bodi

pengganggu  $30^\circ$  lebih awal mengalami akselerasi menuju kecepatan maksimum pada sudut  $35^\circ$ - $40^\circ$ , meskipun di awal konfigurasi ini sempat mengalami akselerasi yang tidak terlalu signifikan akibat adanya bodi pengganggu yang menghalangi laju aliran. Sedangkan pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu mengalami akselerasi lebih lambat menuju kecepatan maksimum yang terjadi pada sudut  $75^\circ$ . Untuk nilai koefisien tekanan terendah pada konfigurasi silinder tandem terjadi pada susunan dengan penambahan bodi pengganggu dengan nilai koefisien tekanan terendah yaitu sebesar  $-1,171$ . Untuk letak titik separasi, konfigurasi tanpa bodi pengganggu mengalami separasi aliran terlebih dahulu pada sudut  $90^\circ$  diikuti konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu yang berhasil menunda terjadinya separasi aliran menjadi lebih lambat yaitu terjadi pada sudut  $125^\circ$ . Hal tersebut karena pada konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu distribusi koefisien tekanan aliran mengalami *re-attachment* pada kontur yang terjadi pada sudut  $60^\circ$ , sedangkan maka konfigurasi tanpa bodi pengganggu tidak terjadi fenomena tersebut.



**Gambar 4.10** Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Tandem dengan Variasi Jarak ( $L/D$ ) 4,0.

**Gambar 4.9** (b) menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder *downstream*. Dapat dilihat bahwa grafik distribusi koefisien tekanan pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu bernilai negatif, hal tersebut menunjukkan bahwa silinder *downstream* masih terlingkupi oleh daerah *wake* dari silinder *upstream*. Silinder *downstream*

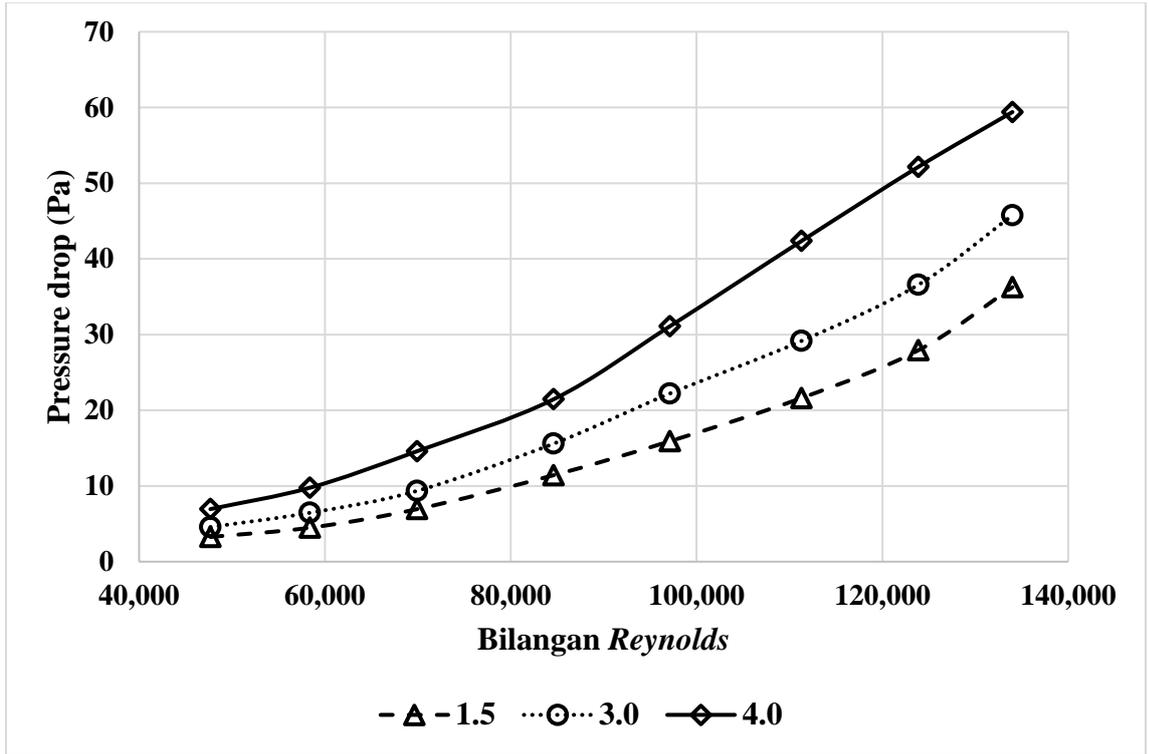
pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu mulai mendekati tren distribusi koefisien tekanan silinder tunggal namun masih mengalami *re-attachment* pada sudut  $35^{\circ}$ - $40^{\circ}$  pada *upper side* dan pada sudut  $325^{\circ}$  untuk *lower side*, belum tepat berada pada sudut  $0^{\circ}$ . Sedangkan pada konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu menunjukkan tren yang sudah menyerupai silinder tunggal, dengan titik *re-attachment* yang tepat berada pada sudut  $0^{\circ}$ , dengan nilai koefisien tekanan tertinggi yaitu sebesar 0,197.

**Gambar 4.10** menyajikan grafik perbandingan distribusi profil kecepatan di belakang konfigurasi silinder tandem pada variasi jarak ( $L/D$ ) 4,0. Tampak grafik menunjukkan kesamaan tren, namun dengan perbedaan lebar daerah *wake* dan nilai perbandingan  $U/U_{\max}$  yang dapat digunakan guna menentukan defisit momentum yang terjadi. Lebar daerah *wake* pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu berada diantara  $0,2 \leq y/h \leq 0,7$ . Daerah *wake* pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu cenderung lebih sempit yaitu berada diantara  $0,25 \leq y/h \leq 0,675$ . Penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi silinder tandem memperbesar defisit momentum yang terjadi dibandingkan dengan konfigurasi tanpa bodi pengganggu.

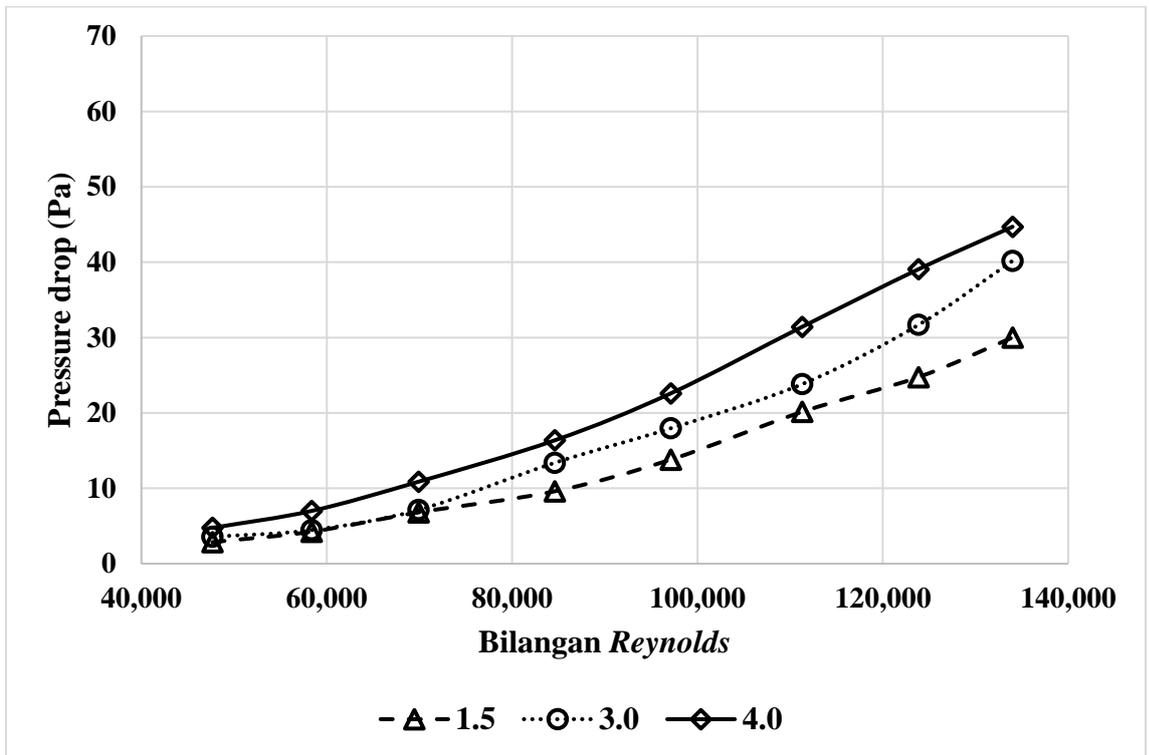
#### 4.7 Pressure Drop pada Konfigurasi Silinder Tandem

Data *pressure drop* diambil untuk saluran dengan konfigurasi silinder tandem tanpa bodi pengganggu, dan saluran dengan konfigurasi silinder tandem yang diberi bodi pengganggu. Data hasil eksperimen ditampilkan dalam bentuk grafik *pressure drop* fungsi bilangan Reynolds, dengan hubungan kenaikan bilangan Reynolds terhadap nilai *pressure drop* saluran (**Gambar 4.11**) menunjukkan seiring bertambahnya bilangan Reynolds, *pressure drop* yang terjadi semakin besar pula. Semakin besar bilangan Reynolds, maka kecepatan aliran semakin tinggi sehingga *pressure drop* meningkat.

Pada **Gambar 4.11**, dapat dilihat pengaruh penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi silinder tandem pada *wind tunnel* berpenampang oktagon terhadap penurunan nilai *pressure drop* efektif terjadi pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu yang diletakkan pada sudut  $30^{\circ}$  dengan semua konfigurasi jarak antar silinder ( $L/D$ ). Distribusi *pressure drop* pada **Gambar 4.11**(b) lebih rendah dibandingkan dengan **Gambar 4.11**(a), namun kedua grafik menunjukkan *trend* yang sama yaitu nilai *pressure drop* semakin tinggi seiring bertambahnya bilangan Reynolds. Peningkatan *pressure drop* yang terjadi pada bilangan Reynolds  $< 8,46 \times 10^4$  tidak terlalu signifikan, Pada berbagai variasi bilangan Reynolds, nilai *pressure drop* tertinggi terjadi pada konfigurasi jarak  $L/D$  40. Nilai *pressure drop* tertinggi untuk konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu terjadi pada konfigurasi jarak  $L/D$  4.0 sebesar 44.7 pa.



(a)

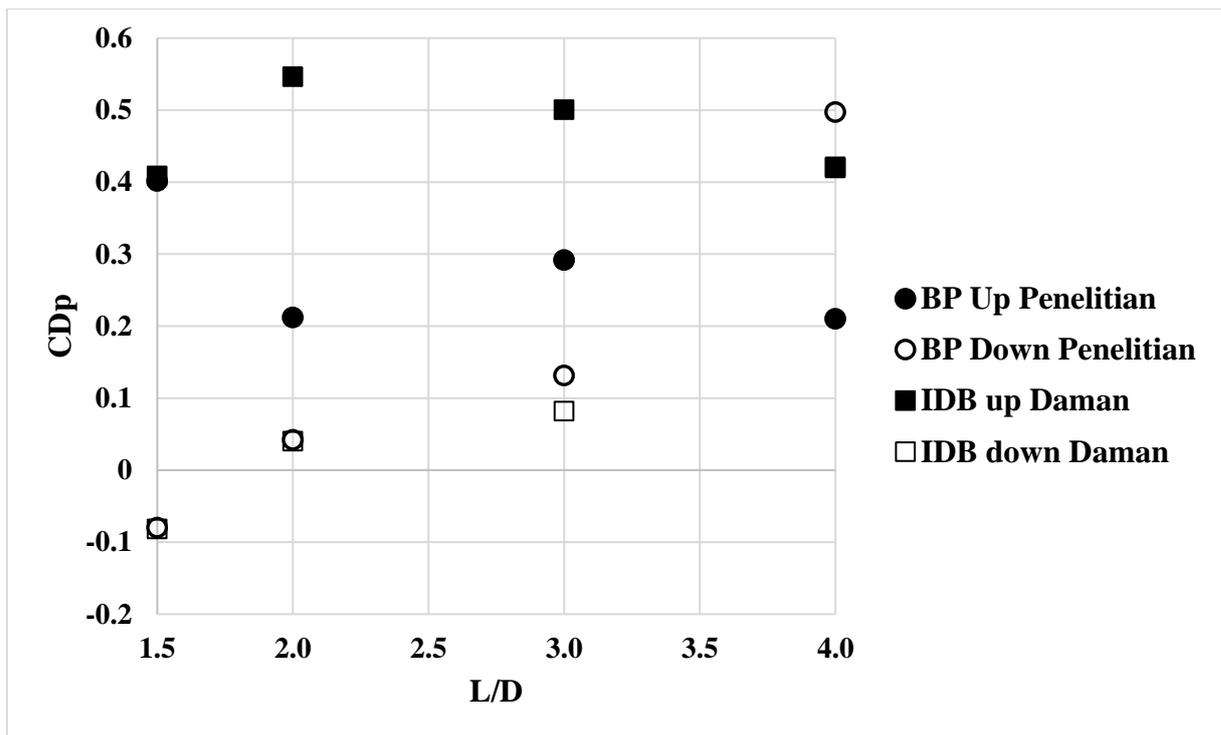


(b)

**Gambar 4.11** *Pressure drop* terhadap  $Re_{Dh}$  pada konfigurasi a) tanpa bodi pengganggu; b) dengan bodi pengganggu  $30^\circ$ .

## 4.8 Diskusi

Pada bagian ini akan dibahas mengenai perbandingan hasil eksperimen dengan penelitian terdahulu yang memiliki topik dan tujuan yang sama dalam pelaksanaan penelitiannya. Penelitian yang akan dibandingkan adalah hasil penelitian dari **Daman & Widodo (2014)**. Penelitian mengenai studi eksperimen dan numerik pengaruh silinder panggalgu terhadap karakteristik aliran melintasi silinder sirkular yang dilakukan oleh **Daman & Widodo (2014)**, menggunakan dua silinder yang disusun tandem berdiameter  $D = 25\text{mm}$  dengan bodi panggalgu berdiameter  $d = 4\text{mm}$  dan Bilangan *Reynolds* yang digunakan berdasarkan diameter hidraulik yaitu sebesar  $Re_{DH} = 1,56 \times 10^4$ . Jarak permukaan silinder *upstream* terhadap permukaan bodi panggalgu sebesar  $0,4\text{ mm}$ . Bodi panggalgu berupa silinder sirkular yang diletakkan pada sisi *upstream* dan membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap sumbu silinder utama. Dengan variasi jarak antar sumbu silinder *upstream* dan *downstream*  $L/D = 1,5$  hingga  $4,0$ . Pada penelitian saat ini menggunakan dua silinder yang tersusun tandem dengan bodi panggalgu berdiameter  $d = 5\text{ mm}$ , dan dilakukan pada bilangan *Reynolds*  $1,33 \times 10^5$ . Data yang hendak dibandingkan pada sub bab ini berupa data koefisien *pressure drag* hanya pada variasi jarak ( $L/D$ )  $1,5$ ;  $2,0$ ;  $3,0$ ; dan  $4,0$  disesuaikan dengan penelitian saat ini.



**Gambar 4.12** Grafik Perbandingan Distribusi Koefisien *Pressure Drag*

Pada **Gambar 4.12** dapat dilihat perbandingan data hasil eksperimen berupa koefisien *pressure drag* dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh **Daman & Widodo (2014)**. Dari grafik perbandingan diatas dapat diketahui bahwa nilai koefisien *pressure drag* silinder sirkular yang didapat tidak jauh berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan oleh **Daman & Widodo (2014)**. Nilai koefisien *pressure drag* untuk silinder *upstream* penelitian saat ini memiliki nilai yang lebih kecil dengan selisih yang bervariasi, dengan penurunan terbesar terjadi pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi panggalgu pada variasi jarak

(L/D) 2,0 yaitu terjadi penurunan nilai koefisien *pressure drag* sebesar 61%. Sedangkan untuk silinder *downstream* penelitian saat ini memiliki nilai yang relatif sama pada konfigurasi jarak (L/D) 1,5 dan (L/D) 2,0 dan memiliki nilai koefisien *pressure drag* yang lebih tinggi pada konfigurasi jarak (L/D) 3,0 dan (L/D) 4,0.

Pembahasan mengenai perbandingan koefisien *pressure drag* menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai koefisien *pressure drag* untuk silinder *upstream*, hal tersebut sesuai dengan penelitian **Alam, et al., (2003)** yang menyebutkan bahwa penambahan bodi pengganggu dengan diameter  $d = 5$  mm efektif menurunkan koefisien *drag*. Sedangkan untuk silinder *downstream*, tren yang ditunjukkan sesuai dengan penelitian **Daman & Widodo (2014)** yaitu koefisien *drag* cenderung meningkat pada jarak (L/D) 1,5 hingga (L/D) 4,0, akan tetapi terdapat sedikit perbedaan dimana nilai koefisien *drag pressure* penelitian saat ini pada jarak (L/D) 3,0 dan 4,0 meningkat melebihi nilai koefisien *drag* penelitian **Daman & Widodo (2014)**.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 5 Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian pada tugas akhir kali ini, didapatkan beberapa data hasil penelitian dan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Nilai *pressure drop* tertinggi terjadi pada susunan silinder tandem dengan bodi pengganggu  $30^\circ$  pada jarak ( $L/D$ ) 4,0 dan  $Re$   $1,33 \times 10^5$  yaitu sebesar 50.49 pa. Nilai *pressure drop* semakin tinggi seiring bertambahnya bilangan Reynolds.
2. Penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi silinder tandem pada *wind tunnel* berpenampang oktagon terhadap penurunan nilai *pressure drop* efektif terjadi pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu yang diletakkan pada sudut  $30^\circ$  dengan semua konfigurasi jarak antar silinder ( $L/D$ ).
3. Penambahan bodi pengganggu  $30^\circ$  secara efektif mempengaruhi distribusi nilai koefisien tekanan, terjadi penundaan titik separasi pada setiap variasi jarak antar silinder ( $L/D$ ) Kondisi ini mengindikasikan bahwa gaya hambat pada konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu lebih kecil ketika dibandingkan dengan silinder tandem tanpa bodi pengganggu. Nilai koefisien *pressure drag* ( $C_{Dp}$ ) silinder *upstream* pada seluruh konfigurasi mengalami penurunan sebesar 47 – 73%, sedangkan untuk silinder *downstream* nilai  $C_{Dp}$  mengalami peningkatan.
4. Pengamatan profil kecepatan dilakukan pada bidang vertikal menunjukkan bahwa, luas daerah *wake* pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu  $30^\circ$  cenderung lebih sempit dibandingkan dengan konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu.

### 5.2 Saran

Penelitian mengenai upaya mereduksi gaya hambat masih selalu dikembangkan dan dikaji. Untuk penelitian selanjutnya yang menggunakan penelitian ini sebagai referensi, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan ketika melakukan penelitian dan pengambilan data, adapun hal yang harus diperhatikan sebagai berikut:

1. Penggunaan alat ukur ketika melakukan pengambilan data sebaiknya menggunakan peralatan yang memiliki tingkat ketelitian yang tinggi.
2. Kondisi udara ketika pengambilan data harus diperhatikan.
3. Pembuatan benda uji dan peralatan penunjang lainnya seperti dudukan benda uji sebaiknya dilakukan lebih presisi guna mempermudah pengambilan data dan didapat data yang lebih akurat.
4. Diperlukan adanya *maintenance* alat guna menunjang penelitian.
5. Diperlukan simulasi numerik guna memperkuat hasil penelitian eksperimen yang telah dilakukan dan melihat fenomena lain yang tidak dapat dilihat pada penelitian ini

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. M., Sakamoto, H., & Moriya, M. (2003). Reduction of fluid forces acting on a single circular cylinder and two circular cylinders by using tripping rods. *Journal of Fluids and Structures*, 18(3-4), 347-366.
- Alam, M. M., Sakamoto, H., & Moriya, M. (2003b). Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(1-2), 139-154.
- Daloglu, Alican. (2008). Pressure drop in a channel with cylinders in tandem arrangement. *International Communications in Heat and Mass Transfer - INT COMMUN HEAT MASS TRANS.* 35. 76-83. 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.011.
- Daman, Aida & Widodo, Wawan. (2014). Pengaruh Penambahan Inlet Disturbance Body terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Sirkular Tersusun Tandem. *Thermofluid VI, Seminar Nasional 2014*, 6(1), 79-84.
- Lee, S.-J., Lee, S.-I., & Park, C.-W. (2004). Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod. *Fluid Dynamic Research*, 34, 233-250.
- Pritchard, P.J., Leylegian, J.C., Robert W. Fox., Alan T. McDonald. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics* (Vol.8). Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc.
- Widodo, W. A., & 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. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 493, pp. 198-203). Trans Tech Publications Ltd.
- Zdravkovich, M. M. (1987). The effect of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and Structures*, 1(2), 239-261.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### A. Contoh Perhitungan

Penelitian ini menggunakan udara sebagai fluida kerja yang dengan asumsi aliran udara dalam keadaan *steady* dan *incompressible* yang memiliki nilai standar sebagai berikut.

1. Tekanan absolut udara dalam keadaan standar ( $P_{\text{std}} = 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ).
2. Temperatur udara dalam keadaan standar ( $T_{\text{std}} = 288,2 \text{ K}$ ).
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar ( $\rho_{\text{std}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ).
4. Temperatur udara saat penelitian ( $T_2 = 26^\circ\text{C} = 299 \text{ K}$ ).

*Properties* diatas digunakan untuk pengolahan data hasil eksperimen dan perhitungan pada penelitian.

#### 1. Perhitungan bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$Re_D = \frac{\rho U D}{\mu}$$

Di mana :

$Re_D$  : bilangan Reynolds

$\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  : kecepatan aliran fluida ( $\text{m/s}$ )

$D$  : Diameter silinder sirkular ( $\text{m}$ )

$\mu$  : viskositas dinamik fluida ( $\text{Ns/m}^2$ )

##### a. Perhitungan densitas fluida ( $\rho$ )

Dengan persamaan Boyle-Gay Lussac tentang pemuain gas sebagai berikut :

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Karena  $V = \frac{m}{\rho}$ , maka persamaan menjadi:

$$\frac{P_1 m_1}{T_1 \rho_1} = \frac{P_2 m_2}{T_2 \rho_2}$$

Di mana keadaan 1 menyatakan dalam kondisi standar, sedangkan keadaan 2 dalam kondisi pengukuran. Diasumsikan keadaan 1 dan 2 memiliki ketinggian yang sama, sehingga  $P_1 = P_2$  dan  $m_1 = m_2$ . Dengan demikian, maka dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \rho_2 &= \frac{T_1 \rho_1}{T_2} \\ \rho_2 &= \frac{288,2 \text{ K} \times 1,225 \text{ kg/m}^3}{299 \text{ K}} \\ \rho_2 &= 1,181 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

b. Perhitungan viskositas udara ( $\mu$ )

Nilai viskositas udara dapat dicari dengan menggunakan persamaan *Sutherland* sebagai berikut:

$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{S + T}$$

Di mana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{msK^{1/2}}$$

$$S = 110,4 \text{ K}$$

$$T = \text{temperatur saat penelitian} = 299 \text{ K}$$

Dengan nilai-nilai tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan 4.4 sehingga didapatkan:

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{msK^{1/2}} \times (299)^{3/2}}{(110,4 + 299)K}$$

$$\mu = 1,8412 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}$$

c. Menghitung bilangan Reynolds

Perhitungan bilangan Reynolds didasarkan pada diameter silinder sirkular, (D). Persamaan untuk menghitung bilangan Reynolds sebagai berikut:

$$Re_D = \frac{\rho UD}{\mu}$$

Dimana:

$Re_D$  : Bilangan Reynolds

$\rho$  : Massa jenis udara : 1,181 kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  : Viskositas udara : 1,8412  $\times 10^{-5}$  kg/ms

D : Diameter silinder : 25 mm = 0,025 m

$D_h$  : Diameter hidrolis : 200 mm = 0.2 m

U : Kecepatan *freestream* udara : 10.448 m/s

Dengan nilai kecepatan *freestream* udara didapatkan nilai bilangan Reynolds sebagai berikut:

$$Re_{Dh} = \frac{1,181 \frac{kg}{m^3} \times 10,448 \frac{m}{s} \times 0,2 \text{ m}}{1,8412 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}}$$

$$Re_{Dh} = 1,33 \times 10^5$$

$$Re_D = \frac{1,181 \frac{kg}{m^3} \times 10,448 \frac{m}{s} \times 0,025 \text{ m}}{1,8412 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}}$$

$$Re_D = 1,67 \times 10^4$$

Re dihitung berdasarkan diameter silinder untuk analisis aliran eksternal dimana pada analisis  $Re_D = 1,67 \times 10^4$  sama dengan analisis aliran internal untuk bilangan Reynolds sebesar  $Re_{Dh} = 1,33 \times 10^5$ .

## 2. Perhitungan Coefficient Pressure (Cp)

Pada contoh perhitungan ini, bilangan Reynolds yang digunakan sebesar  $1,33 \times 10^5$ . Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data sebagai berikut:

- Cairan pengisian manometer adalah Red Oil dengan SG : 0,804
- Massa jenis air ( $\rho$ ) : 999 kg/m<sup>3</sup>
- Massa jenis udara saat T = 299 K : 1,181 kg/m<sup>3</sup>
- Percepatan gravitasi (g) : 9,81 m/s<sup>2</sup>
- Kecepatan *free stream* : 8,23 m/s

### a. Menghitung tekanan statis *freestream*

Untuk menghitung tekanan statis pada *free stream*, digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$P_{sf} = \frac{SG_{redoil} \times \rho_{H_2O} \times g \times 2 \Delta h \times \sin 15^\circ}{1000}$$

Dimana:  $\Delta h = \Delta h_{akhir} - \Delta h_{awal}$   
 $\Delta h = 166 - 185$   
 $\Delta h = 19 \text{ mm}$

Sehingga,

$$P_{sf} = \frac{0,804 \times 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 2 (-19 \text{ mm}) \times \sin 15^\circ}{1000}$$

$$P_{sf} = -77,494 \text{ Pa}$$

### b. Menghitung tekanan statis kontur

Untuk menghitung tekanan statis pada kontur digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$P_{sk} = \frac{SG_{redoil} \times \rho_{H_2O} \times g \times 2 \Delta h \times \sin 15^\circ}{1000}$$

Dimana:  $\Delta h = \Delta h_{akhir} - \Delta h_{awal}$   
 $\Delta h = 180,2 - 184$   
 $\Delta h = -3,8 \text{ mm}$

Sehingga,

$$P_{sk} = \frac{0,804 \times 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 2 (-3,8 \text{ mm}) \times \sin 15^\circ}{1000}$$

$$P_{sk} = -15,5 \text{ Pa}$$

### c. Menghitung tekanan dinamik *free stream* kontur

Untuk menghitung tekanan dinamik *free stream* pada kontur digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$P_d = p_0 - P_s$$

Dimana:  $P_d = \frac{1}{2} \times \rho_{\text{udara}} \times U^2$

Sehingga,

$$P_d = \frac{1}{2} \times \rho \times U^2$$

$$P_d = \frac{1}{2} \times 1,181 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(10,448 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$P_d = 64,45 \text{ Pa}$$

d. Menghitung *Pressure Coefficient* ( $C_p$ )

Untuk menghitung koefisien tekanan pada kontur digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_{sk} - P_{sf}}{P_d}$$

Sehingga,

$$C_p = \frac{-15.5 \text{ Pa} - (-77.49 \text{ Pa})}{64,45 \text{ Pa}}$$

$$C_p = 0,962$$

### 3. Perhitungan *Coefficient Pressure Drag* ( $C_{dp}$ )

Persamaan yang digunakan untuk menghitung *Coefficient pressure drag* adalah sebagai berikut:

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

Dimana:

$C_p(\theta)$  : koefisien tekanan kontur pada posisi  $\theta$

$\theta$  : sudut posisi masing – masing *pressure tap* pada kontur

Dari persamaan tersebut diselesaikan dengan metoda numerik aturan Simpson 1/3 segmen berganda yang dirumuskan sebagai berikut :

$$I \cong \underbrace{(b - a)}_{\text{lebar}} \underbrace{\frac{f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n)}{3n}}_{\text{Tinggi rata-rata}}$$

Sehingga,

$$C_{Dp} = \frac{b - a}{2 \times 3n} \{y_0 + 4(y_1 + \dots + y_{n-1}) + 2(y_2 + \dots + y_{n-2}) + y_n\}$$

Dimana:

$a$  : Sudut awal

$b$  : Sudut akhir

$n$  : Jumlah data

$y_0$  : Data pertama

$2(y_2 + \dots + y_{n-2})$  : Jumlah data genap

$4(y_1 + \dots + y_{n-1})$  : Jumlah data ganjil

$y_n$  : Data terakhir

**Tabel A.1** Integrasi  $C_p$  silinder upstream tandem dengan bodi pengganggu untuk variasi Jarak ( $L/D$ ) 4,0 pada  $Re = 1,33 \times 10^5$

$\theta$	$C_p \cdot \cos$	4F	2F	$C_D$
0	1.000			0.210
5	0.950	3.800		
10	0.893		1.787	
15	0.816	3.265		
20	0.575		1.151	
25	-0.078	-0.312		
30	-0.612		-1.224	
35	-0.960	-3.841		
40	-0.898		-1.796	
45	-0.774	-3.096		
50	-0.554		-1.108	
55	-0.405	-1.621		
60	-0.315		-0.629	
65	-0.305	-1.221		
70	-0.278		-0.556	
75	-0.221	-0.886		
80	-0.144		-0.289	
85	-0.068	-0.271		
90	0.000		0.000	
95	0.052	0.209		
100	0.087		0.174	
105	0.111	0.446		
110	0.136		0.271	
115	0.154	0.618		

120	0.175		0.350	
125	0.192	0.767		
130	0.220		0.440	
135	0.253	1.011		
140	0.280		0.560	
145	0.306	1.222		
150	0.330		0.660	
155	0.359	1.437		
160	0.370		0.739	
165	0.377	1.507		
170	0.383		0.765	
175	0.384	1.536		
180	0.383		0.766	
185	0.379	1.518		
190	0.381		0.762	
195	0.377	1.507		
200	0.370		0.739	
205	0.354	1.414		
210	0.337		0.673	
215	0.293	1.172		
220	0.262		0.524	
225	0.236	0.946		
230	0.225		0.450	
235	0.210	0.838		
240	0.190		0.381	
245	0.167	0.667		
250	0.133		0.267	
255	0.110	0.441		
260	0.087		0.174	

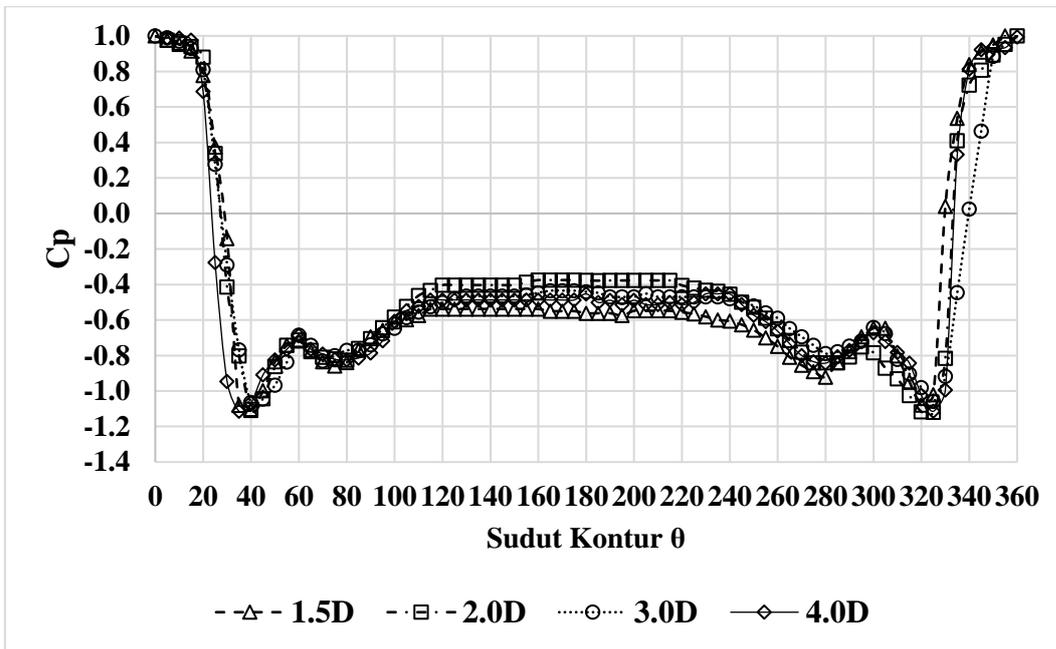
265	0.053	0.210		
270	0.000		0.000	
275	-0.068	-0.271		
280	-0.145		-0.290	
285	-0.221	-0.884		
290	-0.276		-0.552	
295	-0.305	-1.221		
300	-0.326		-0.652	
305	-0.408	-1.632		
310	-0.558		-1.116	
315	-0.774	-3.096		
320	-0.902		-1.803	
325	-0.962	-3.846		
330	-0.616		-1.232	
335	-0.072	-0.289		
340	0.581		1.162	
345	0.816	3.265		
350	0.890		1.781	
355	0.956	3.825		
360	1.000			
		9.134	3.328	

Dengan menggunakan metode numerik aturan Simpson 1/3 segmen berganda dan **tabel A.1** diatas didapatkan:

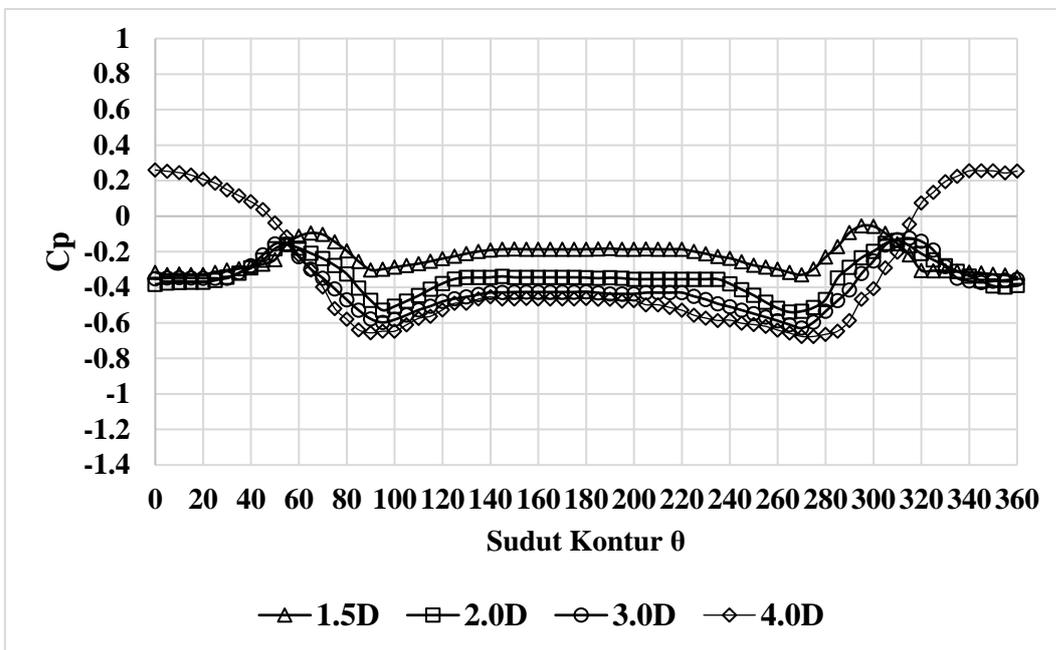
$$C_{D_p} = \frac{2\pi - 0}{2 \times 3 \times 72} \{1 + 9,134 + 3,328 + 1\}$$

$$C_{D_p} = 0,210$$

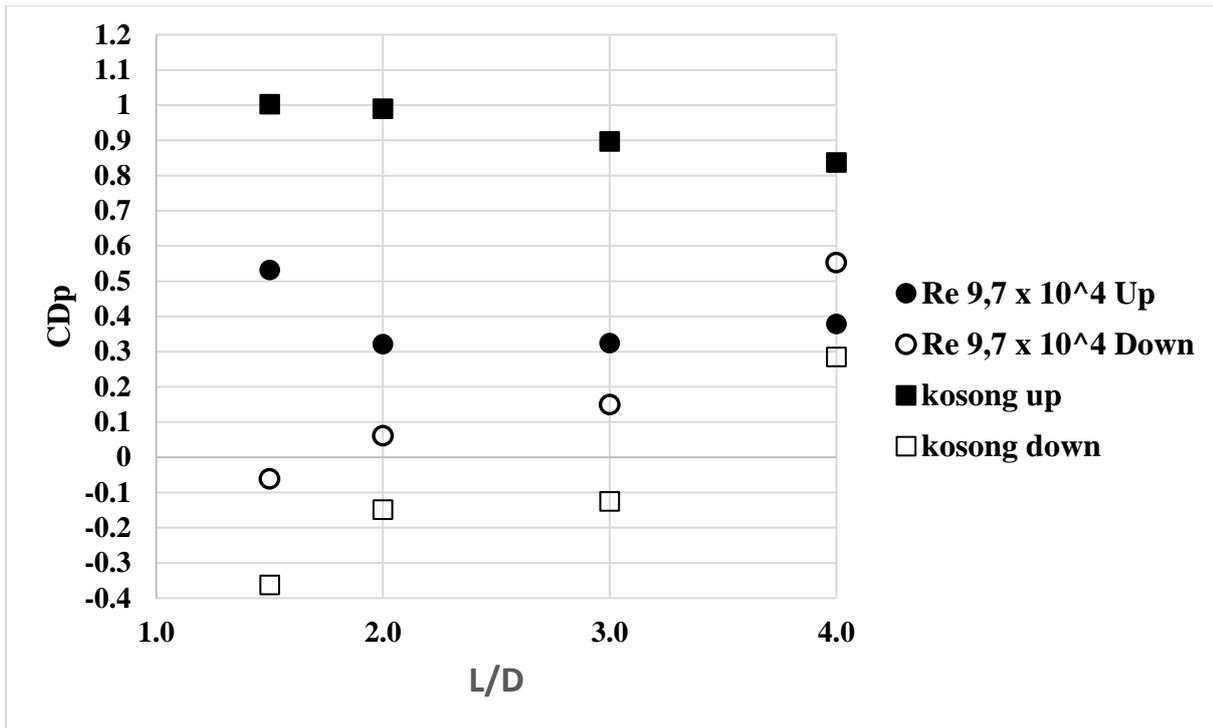
**B. Data Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada berbagai Variasi Jarak (Re =  $9,7 \times 10^4$ )**



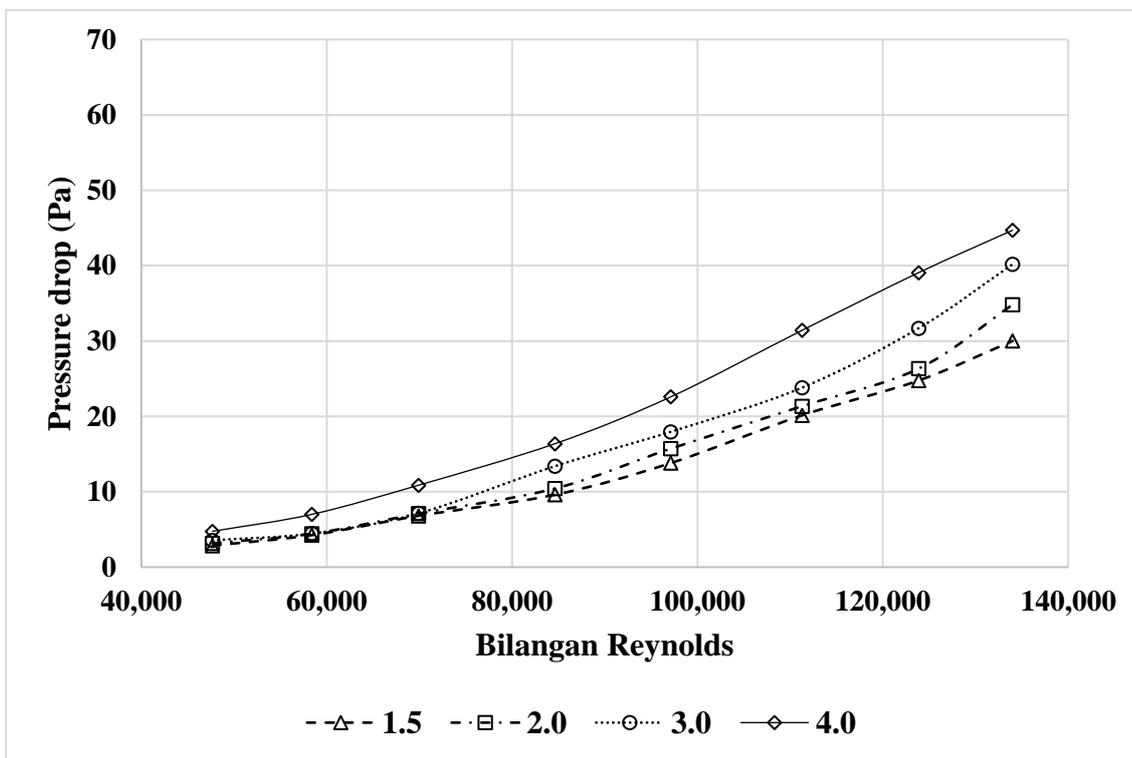
**Gambar 1** Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder pada Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu  $30^\circ$  untuk Bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .



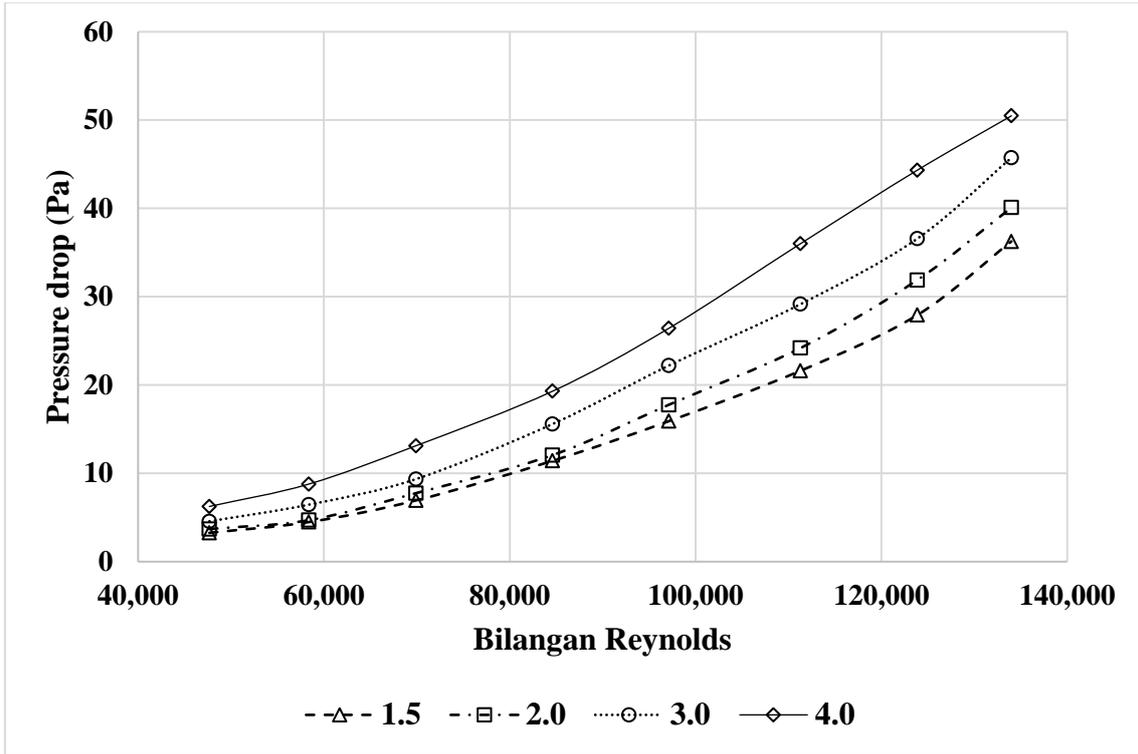
**Gambar 2** Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder pada Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu  $30^\circ$  untuk Bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .



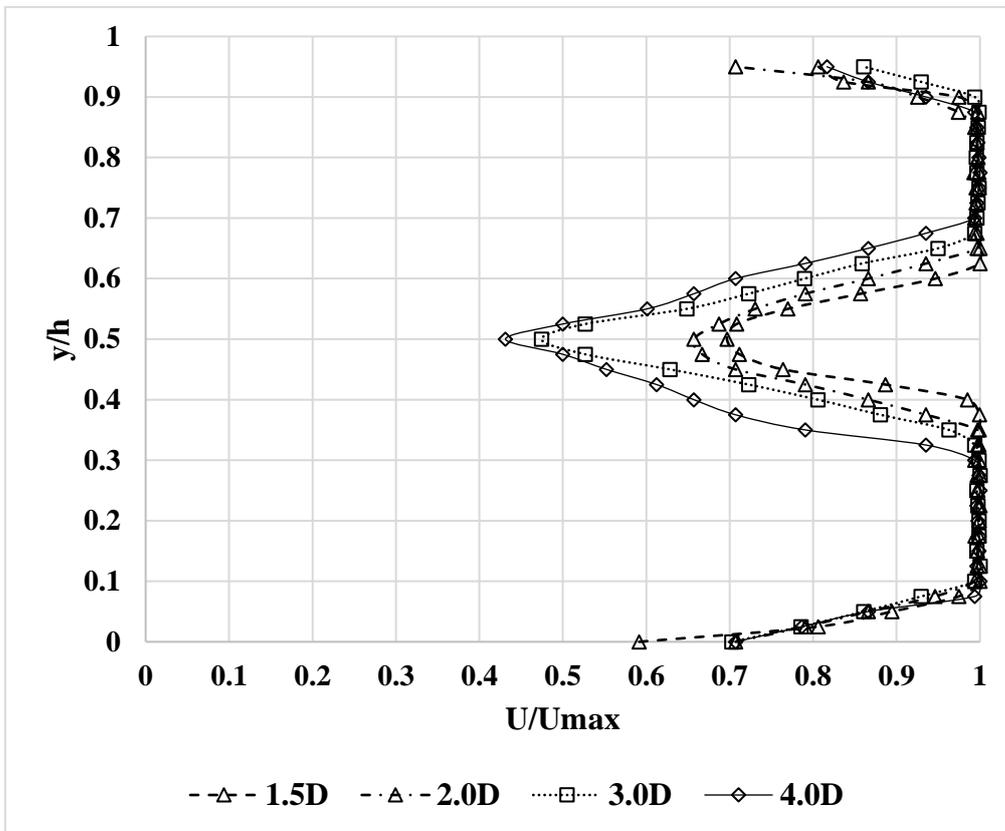
Gambar 3 Koefisien *Pressure Drag* Bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$



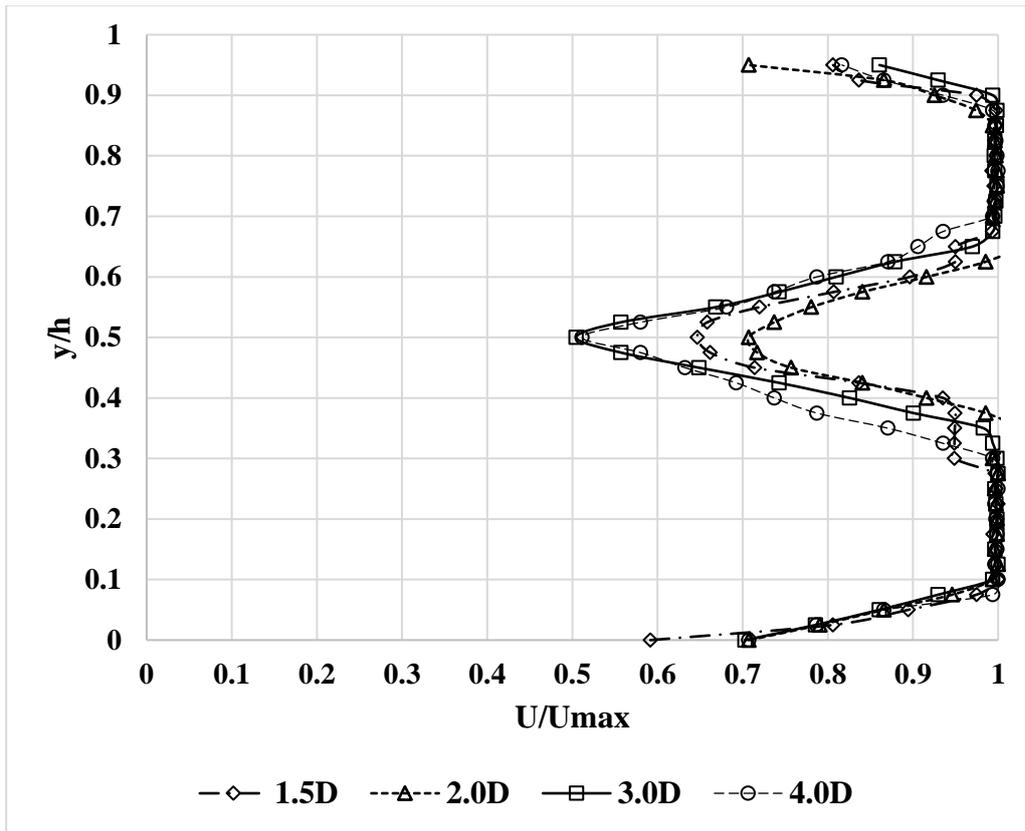
Gambar 4 *Pressure drop* terhadap  $Re_{Dh}$  pada konfigurasi dengan bodi pengganggu  $30^\circ$ .



Gambar 5 Pressure drop terhadap  $Re_{Dh}$  pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu.



Gambar 6 Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder dengan Bodi Pengganggu pada Bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .



**Gambar 7** Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder Tanpa Bodi Pengganggu pada Bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .

## BIODATA PENULIS



Drestanta Vidyasakti Wibowo lahir di Sidoarjo, 11 April 2000, merupakan anak terakhir dari dua bersaudara. Penulis memulai pendidikan formal tingkat dasarnya di SDIT Meranti, Jakarta pada tahun 2006-2009, lalu penulis kembali ke kota asal dan melanjutkan pendidikan tingkat dasarnya di SD Al-Falah Darussalam pada tahun 2009-2012. Kemudian penulis menempuh jenjang selanjutnya di SMP Al-Falah Deltasari pada tahun 2012-2015. Pendidikan formal tingkat atas penulis diselesaikan di SMA Al-Hikmah Surabaya pada tahun 2015-2018. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dari tahun 2018 hingga 2022.

Selama menjalani masa perkuliahan penulis aktif dalam mengikuti kegiatan yang memberikan pengalaman serta jaringan. Dalam organisasi mahasiswa penulis tercatat aktif sebagai sekretaris Lembaga Kajian Kerohanian Islam Ash-Shaff periode 2020-2021, staff ahli Mesin ITS Autosport divisi *Public Relation (PR)* periode 2020-2021. Penulis aktif mengikuti Pelatihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Pra-Dasar (LKMM Pra-TD) 2019, Pelatihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Dasar (LKMM TD) 2019. Pada tahun 2021, penulis mendapat kesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktik di PT. Pabrik Kertas Tjiwi Kimia, Tbk di Sidoarjo selama satu bulan. Pada tahun yang sama penulis bergabung dengan Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida, dan juga sebagai tempat dimana penulis menyelesaikan Tugas Akhir. Untuk menghubungi penulis dalam kepentingan tertentu ataupun lainnya, dapat melalui alamat email: [drestantavw@yahoo.co.id](mailto:drestantavw@yahoo.co.id)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*