



TUGAS AKHIR – TM141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH *CYLINDER DISTURBANCE BODY* TERHADAP ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SINGLE GUIDE VANE* DALAM *ELBOW 90°* DENGAN VARIASI JARAK LONGITUDINAL

ZIDQI ODDIE MATOVANI
NRP. 021116 45 000010

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

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



FINAL PROJECT – TM141585

**THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
CYLINDER DISTURBANCE BODY ON THE FLOW
THROUGH SQUARE DUCT AND SINGLE GUIDE VANE
IN 90° ELBOW WITH LONGITUDINAL DISTANCE
VARIATION**

ZIDQI ODDIE MATOVANI
NRP. 021116 45 000010

Advisory Lecturer
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH *CYLINDER*
DISTURBANCE BODY TERHADAP ALIRAN MELALUI
SQUARE DUCT DAN *SINGLE GUIDE VANE* DALAM
ELBOW 90° DENGAN VARIASI JARAK
LONGITUDINAL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ZIDQI ODDIE MATOVANI

NRP. 02111645000010

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD. (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
3. Nur Ikhwan, ST., M.Eng. (Penguji II)
NIP. 196709151995121001
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., PhD. (Penguji III)
NIP. 197512062005011002

SURABAYA

JULI, 2018

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH CYLINDER
DISTURBANCE BODY TERHADAP ALIRAN MELALUI
SQUARE DUCT DAN SINGLE GUIDE VANE DALAM
ELBOW 90° DENGAN VARIASI JARAK
LONGITUDINAL**

Nama Mahasiswa : Zidqi Oddie Matovani
NRP : 02111645000010
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

Abstrak

Saluran udara (ducting system) dalam dunia industri tidak hanya berupa pipa lurus, namun juga terdapat fitting baik dalam bentuk percabangan saluran, penggabungan saluran, ataupun pembelokan saluran. Contoh fitting yang digunakan pada saluran udara adalah elbow 90°. Penggunaan elbow 90° akan menyebabkan penurunan tekanan (pressure drop) karena adanya friction loss, separation loss, dan secondary flow yang terjadi setelah melewati elbow 90°. Untuk mengurangi separation loss dan secondary flow adalah dengan menambahkan Single Guide Vane pada elbow 90°.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan model saluran berpenampang bujursangkar (square duct) dengan $D_h = 125$ mm yang terdiri dari: upstream duct (straight duct) dengan panjang $7D_h$, Cylinder Disturbance Body (CDB) dengan $d = 6$ mm, square elbow 90° dengan curvative ratio $(R/D_h) = 1,5$ dan penambahan Single Guide Vane, downstream duct (straight duct) dengan panjang $15D_h$, serta induced draft fan. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan pitot static tube, inclined manometer, dan pressure transducer. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak longitudinal (l) $0,5D_h$; $0,6D_h$; $0,7D_h$; $0,8D_h$ dan $0,9D_h$ pada sisi inner upstream duct. Untuk mendapatkan nilai pressure drop dan coefficient loss elbow 90° digunakan $Re_{D_h} 1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s dengan

kenaikan kecepatan tiap 2 m/s), untuk mendapatkan coefficient pressure pada elbow 90° digunakan kecepatan 2 m/s, 12 m/s dan 20 m/s dengan Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$; $9,52 \times 10^4$ dan $1,59 \times 10^5$, sedangkan untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang upstream duct dan downstream duct digunakan Re_{Dh} sebesar $9,52 \times 10^4$ dengan jarak $(x/D_h)=2,4,6,10,14$ sepanjang downstream duct.

Hasil penelitian ini diperoleh bahwa penempatan CDB efektif menurunkan pressure drop. Penempatan CDB pada saluran dengan jarak $l=0,6D_h$ merupakan jarak paling efektif menurunkan pressure drop, dimana penurunan nilai ratio rata-rata perbandingan pressure drop ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) sebesar 0,955. Penambahan CDB sebagai bodi pengganggu sebagian besar menghasilkan nilai koefisien losses (K) elbow 90° yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan CDB. Dimana pada variasi CDB ($l/D_h=0,6$) memiliki nilai rata-rata koefisien losses (K) elbow 90° sebesar 0,18. Penurunan nilai selisih Pressure Coefficient pada sisi outer wall dan sisi inner wall (ΔC_p) paling efektif pada variasi jarak ($l/D_h=0,6$) sebesar sebesar 0,602, sedangkan nilai ΔC_p tanpa CDB sebesar 0,696, namun pada variasi jarak ($l/D_h=0,9$) nilai ΔC_p mengalami kenaikan dibandingkan nilai ΔC_p tanpa CDB pengganggu sebesar 0,711. Pada bidang horizontal dan vertikal menunjukkan bahwa secara keseluruhan dengan penambahan CDB, profil kecepatan pada section 2 - 6 memiliki bentuk yang berbeda dibanding tanpa CDB, sementara pada section 10 - 14 semua variasi menunjukkan bentuk profil kecepatan yang mirip. Pada sisi inner dan centerline, terjadi perlambatan aliran karena adanya backflow yang ditimbulkan oleh separasi aliran dan efek single guide vane.

Kata kunci: *Cylinder Disturbance Body, Pressure Drop, Square Duct, Elbow 90°, Guide Vane*

**THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
CYLINDER DISTURBANCE BODY ON THE FLOW
THROUGH SQUARE DUCT AND SINGLE GUIDE VANE
IN 90° ELBOW WITH LONGITUDINAL DISTANCE
VARIATION**

Name of Student : Zidqi Oddie Matovani
NRP : 02111645000010
Department : Teknik Mesin FTI – ITS
Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

Abstract

The ducting system in the industrial world is not only a straight pipe, but there are also good fittings in the form of branching, ducting combinations, or ducting alterations. An example of a fitting used on an air passage is a 90° elbow. The use of 90° elbow will cause pressure drop due to friction loss, separation loss, and secondary flow that occurs after passing 90° elbow. To reduce separation loss and secondary flow is to add Single Guide Vane to 90° elbow.

This experiment was conducted experimentally with square duct with $D_h = 125$ mm model consisting of: upstream duct (straight duct) with $7D_h$ length, Cylinder Disturbance Body (CDB) with $d = 6$ mm, square elbow 90° with curvative ratio (R/D_h) = 1,5 and the addition of Single Guide Vane, downstream duct (straight duct) with $15D_h$ length, and induced draft fan. Measurements in this study using pitot static tube, inclined manometer, and pressure transducer. The test was performed with variation of longitudinal distance (l) $0,5D_h$; $0,6D_h$; $0,7D_h$; $0,8D_h$ and $0,9D_h$ on the inner upstream duct side. To get the pressure drop and coefficient loss 90° elbow is used Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ to $1,59 \times 10^5$ (air velocity 2 m/s to 20 m/s with speed increase every 2 m/s), for obtain coefficient pressure at 90° elbow used speed 2 m/s, 12 m/s and 20 m/s with Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$; $9,52 \times 10^4$ and $1,59 \times 10^5$, while to get the velocity profile along the upstream duct and downstream duct

used Re_{D_h} of $9,52 \times 10^4$ with distance $(x/D_h) = 2,4,6,10,14$ along the downstream duct.

The results of this study found that effective CDB reduces pressure drop. The placement of CDB in the duct with distance $l = 0,6D_h$ is the most effective distance to decrease the pressure drop, where the decrease of the average ratio value of pressure drop $(\Delta p_{CDB}/\Delta p_0)$ is 0,955. Addition of CDB as a disturbance body mostly resulted in lower losses (K) elbow 90° coefficient value compared to without using CDB. Where in the variation of CDB ($l/D_h=0,6$) has an average value of losses coefficient (K) 90° elbow of 0,18. Decrease in value of Pressure Coefficient on outer wall and inner wall side (ΔC_p) is most effective at distance variation ($l/D_h=0,6$) equal to 0,602, whereas value of ΔC_p without CDB is 0,696, but at distance variation ($l/D_h=0,9$) value of ΔC_p increased compared to the value of ΔC_p without CDB interrupt of 0,711. In the horizontal and vertical plane shows that overall with the addition of CDB, the velocity profiles in section 2-6 are of different shape than without CDB, while in section 10 - 14 all variations show similar velocity profiles. On the inner and centerline side, there is a slowing of the flow due to the backflow caused by the flow separation and the single guide vane effect.

Keywords: *Cylinder Disturbance Body, Pressure Drop, Square Duct, Elbow 90° , Guide Vane*

KATA PENGANTAR

Bismillaahirrahmaanirrahiim,

Segala puji bagi Allah yang telah memberikan ridho, rizki, hidayah, dan inayah-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul:

“Studi Eksperimen Pengaruh *Cylinder Disturbance Body* terhadap Aliran melalui *Square Duct* dan *Single Guide Vane* dalam *Elbow 90°* dengan Variasi Jarak Longitudinal”

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis berusaha menerapkan ilmu yang didapat selama menjalani perkuliahan di Jurusan Teknik Mesin. Keberhasilan dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak **Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT.** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
2. Bapak **Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng.** selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Bapak **Dr. Ir. Agus Sigit, DEA** selaku dosen wali.
4. **Tim Dosen penguji** yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga, pikiran dalam rangka perbaikan tugas akhir ini.
5. **Ayah** dan **Ibu** tercinta yang telah memberikan semangat dan dorongan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. **Irma Damayanti** yang selalu memberikan motivasi dan dukungan dalam menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini.
7. **Ahmad Hisyam, Dheka Arga** dan **Aulia Azizah** sebagai rekan asistensi tugas akhir.
8. **Pak Tris** di Laboratorium Mekanika Fluida Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah membantu peminjaman peralatan laboratorium.
9. **Arif Rahman** dan **Nurul Fajri** sebagai rekan satu tim tugas akhir.

10. Rekan-rekan angkatan 2016 Lintas Jalur, Teman angkatan 2012 D3 Teknik Mesin dan rekan-rekan kos dan kontrakan yang memberi motivasi dan semangat kepada penulis.

Penulis menyadari sepenuhnya, bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis mengharapkan adanya kritik dan saran dari berbagai pihak, yang dapat mengembangkan Tugas Akhir ini menjadi lebih baik. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pembaca dan mahasiswa, khususnya mahasiswa jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Surabaya, 12 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	6
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Klasifikasi Aliran Fluida	9
2.1.1 Aliran <i>Viscous</i> dan <i>Inviscid</i>	9
2.1.2 Aliran Laminar dan Turbulen	10
2.1.3 <i>Incompressible flow</i> dan <i>Compressible flow</i>	12
2.2 Properti Fluida	12
2.2.1 Densitas	12
2.2.2 Viskositas	13
2.3 Persamaan Euler Dalam Koordinat <i>Streamline</i>	13
2.4 Tekanan Statis, Tekanan Stagnasi, dan Tekanan Dinamis	15
2.5 Bilangan <i>Reynold's</i>	16
2.6 <i>Pressure Coefficient</i> (C_p)	17
2.7 <i>Head Loss</i>	17
2.7.1 <i>Head Loss Mayor</i>	18
2.7.2 <i>Head Loss Minor</i>	19
2.8 Sistem Saluran Udara (<i>Ducting</i>)	19
2.9 Karakteristik Aliran di dalam Saluran Udara	21

2.9.1 Aliran Berkembang Penuh (<i>Fully Developed Flow</i>).....	21
2.9.2 Aliran Sekunder (<i>Secondary Flow</i>) yang Terjadi pada Elbow	22
2.9.3 Proses Terjadinya Separasi Aliran Pada <i>Elbow 90°</i>	24
2.10 Penelitian Terdahulu	24

BAB III METODOLOGI

3.1 Skema Penelitian	39
3.2 Peralatan Pendukung	40
3.2.1 <i>Square Duct</i>	40
3.2.2 <i>Honey Comb, Screen, dan Nozzle</i>	42
3.2.3 <i>Cylinder Disturbance Body</i>	42
3.2.4 <i>Elbow 90° dengan Single Guide Vane</i>	43
3.2.5 <i>Centrifugal Fan dan Inverter</i>	44
3.2.6 Alat Ukur.....	45
3.2.6.1 <i>Pitot Tube</i>	45
3.2.6.2 <i>Wall Pressure Tap</i>	45
3.2.6.3 <i>Tranducer Tekanan dan Data Aquisisi</i>	46
3.2.6.4 <i>Inclined Manometer (Manometer V) dan Mistar</i>	47
3.3 Langkah – Langkah Validasi	48
3.3.1 Validasi Tekanan Dinamis.....	48
3.3.2 Validasi Tekanan Statis	49
3.4 Analisis Dimensi Parameter – Parameter yang Dianalisa ...	51
3.4.1 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk <i>Pressure Drop</i> pada <i>Square Duct</i>	51
3.4.2 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Kecepatan pada <i>Square Duct</i>	53
3.5 Prosedur Pengambilan Data.....	54
3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif	54
3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif.....	55

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 <i>Pressure drop pada Square Duct dengan Reynolds Number</i> $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$	63
---	----

4.2	Koefisien <i>Losses Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Reynold's Number</i> $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$	69
4.3	<i>Pressure Coefficient Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Reynolds Number</i> $9,52 \times 10^4$	72
4.4	Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi <i>Upstream</i> dan <i>Downstream</i> dengan $Re_{Dh} = 9,52 \times 10^4$	75
4.4.1	Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal bagian <i>Upstream</i>	75
4.4.2	Profil Kecepatan Bidang Horizontal bagian <i>Downstream</i>	76
4.4.3	Profil Kecepatan Bidang Vertikal bagian <i>Downstream</i>	78
4.5	Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu pada <i>Square Duct</i> dan <i>Square Elbow 90°</i>	82
4.5.1	Perbandingan Velocity Profile dengan penelitian Farich Firmansyah (2016).....	83

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran.....	86

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 1998).....	9
Gambar 2.2	Ilustrasi aliran <i>inviscid</i> dan <i>viscous</i> (Fox dan Mc. Donald, 2011)	10
Gambar 2.3	Aliran Laminar (Munson et al, 2002).....	11
Gambar 2.4	Aliran Transisi (Munson et al, 2002)	11
Gambar 2.5	Aliran Turbulen (Munson et al, 2002).....	11
Gambar 2.6	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> (Fox & Mc. Donald, 2011).....	14
Gambar 2.7	Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis (Fox & Mc. Donald, 2011).....	15
Gambar 2.8	Macam – macam bentuk <i>ducting</i> (a) <i>Circular Tube</i> (b) <i>Square Duct</i> (c) <i>Rectangular Duct</i>	20
Gambar 2.9	Profil Aliran <i>Internal flow</i> pada pipa (Cengel & Cimbala,2006)	22
Gambar 2.10	Aliran yang ideal di sepanjang lengkungan saluran (D.S Miller,1990).....	22
Gambar 2.11	Aliran sekunder yang terbentuk akibat adanya lengkungan (Cengel & Cimbala,2006).....	23
Gambar 2.12	Separasi aliran pada <i>inner wall elbow 90°</i> (D.S Miller,1990)	24
Gambar 2.13	Profil kecepatan pada elbow (a) Tanpa <i>Guide Vane</i> , (b) 1 <i>Guide Vane</i> , (c) 2 <i>Guide Vane</i> , (d) 3 <i>Guide Vane</i> (Sutardi dkk, 2010).....	26
Gambar 2.14	Bentuk Geometri Silinder <i>Elips</i> dan Skema Penelitian (Choi & Lee, 2010)	28
Gambar 2.15	<i>Mean streamwise velocity profiles</i> pada X = 100, 150, dan 200 mm; AR = 1; — tanpa silinder; —◇— G/B = 0,5 ; —◆— G/B = 1,0 (Choi & Lee, 2010).....	28
Gambar 2.16	<i>Streamwise turbulence intensity</i> pada X = 100, 150, dan 200 mm; AR = 1; — tanpa silinder;	

	 $G/B = 0,5$;  $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010)..... 29
Gambar 2.17	Skema instalasi penelitian dan gambar peletakkan <i>IDB</i> (Aqfha, 2017) 30
Gambar 2.18	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow 90°</i> dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada $3,97 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$ (Aqfha, 2017)..... 31
Gambar 2.19	Koefisien <i>Losses Elbow 90°</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow 90°</i> dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada $3,97 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$ (Aqfha, 2017)..... 32
Gambar 2.20	Sketsa <i>test section</i> (pandangan atas) (Rizkia,2017) 33
Gambar 2.21	<i>Pressure drop square duct</i> dengan variasi peletakkan <i>inlet disturbance body</i> dan Re_{D_h} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$ (Rizkia,2017)..... 34
Gambar 2.22	<i>Loss coefficient elbow 90°</i> dengan variasi peletakkan <i>inlet disturbance body</i> dan Re_{D_h} $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $1,35 \times 10^5$ (Rizkia ,2017)..... 35
Gambar 2.23	Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada <i>downstream duct</i> tanpa damper dan sudut damper 0° 37
Gambar 2.24	Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada <i>downstream duct</i> tanpa damper dan sudut damper 0° 37
Gambar 3.1	Skema instalasi penelitian dan peletakan <i>Cylinder Disturbance Body</i> 40
Gambar 3.2	Model uji penelitian 41
Gambar 3.3	<i>Honey Comb, Screen, Nozzle</i> 42
Gambar 3.4	Lokasi pemasangan <i>Cylinder Disturbance Body</i> 43
Gambar 3.5	<i>Elbow 90°</i> dengan <i>Single Guide Vane</i> 44
Gambar 3.6	(a) <i>Centrifugal Fan</i> (b) <i>Inverter</i> 44
Gambar 3.7	<i>Pitot Tube</i> 45

Gambar 3.8	Skema Pemasangan <i>Wall Pressure Tap</i>	46
Gambar 3.9	(a) DAQ PRO 5300 (b) Pressure Transducer	47
Gambar 3.10	<i>Inclined Manometer</i>	47
Gambar 3.11	Skema validasi tekanan dinamis dengan pressure transduser 1” WC	49
Gambar 3.12	Contoh hasil validasi tekanan dinamis dengan pressure transduser 1” WC	49
Gambar 3.13	Skema validasi tekanan statis dengan pressure transduser 3” WC	50
Gambar 3.14	Skema validasi tekanan statis dengan pressure transduser 3” WC	50
Gambar 3.15	Langkah pengambilan data <i>velocity profile</i>	58
Gambar 3.16	Langkah pengambilan data <i>pressure drop</i>	59
Gambar 3.17	Langkah pengambilan data koefisien <i>losses elbow 90°</i>	60
Gambar 3.18	Langkah pengambilan data <i>pressure coefficient</i>	61
Gambar 4.1	Grafik <i>ratio pressure drop overall</i> pada <i>square duct</i> dengan variasi jarak peletakan <i>cylinder disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$	65
Gambar 4.2	Grafik <i>ratio pressure drop per section</i> pada <i>square duct</i> (a) <i>Upstream</i> (titik 1 – 2); (b) <i>Elbow 90°</i> (titik 2 – 3); (c) <i>Downstream</i> (titik 3 – 4); dengan variasi jarak peletakan <i>cylinder disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$	67-68
Gambar 4.3	Grafik koefisien <i>losses (K) elbow 90°</i> dengan variasi jarak peletakan <i>cylinder disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$	70
Gambar 4.4	Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> pada <i>Square Elbow 90°</i> dengan variasi jarak peletakan <i>cylinder disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $9,52 \times 10^4$	73
Gambar 4.5	Grafik profil kecepatan (a) bidang horizontal bagian <i>upstream</i> (b) bidang vertikal bagian <i>upstream</i>	76

Gambar 4.6	Profil kecepatan bidang horizontal sepanjang <i>downstream</i> pada masing-masing posisi <i>cross-section</i> tanpa CDB; CDB ($l=0,6D_h$); CDB ($l=0,9D_h$).....	80
Gambar 4.7	Profil kecepatan bidang vertikal sepanjang <i>downstream</i> pada masing-masing posisi <i>cross-section</i> tanpa CDB; CDB ($l=0,6D_h$); CDB ($l=0,9D_h$).....	80
Gambar 4.8	Profil Kecepatan pada bidang horizontal (a) section 2, (c) section 6, (e) section 14; bidang vertikal (b) section 2, (d) section 6, (f) section 14.....	81
Gambar 4.8	Perbandingan profil kecepatan horizontal dengan penelitian terdahulu.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pengaruh penambahan <i>guide vane</i> terhadap <i>pressure drop</i> 25
Tabel 4.1	Persamaan dan Perbedaan Penelitaian..... 82

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem saluran fluida atau udara memegang peranan penting untuk mendukung proses industri. Selain itu, sistem saluran udara juga banyak penerapannya dalam kehidupan diluar industri, seperti perpipaan air bersih dan penyaluran udara terkondisi di gedung-gedung. Saluran udara tidak hanya berupa pipa lurus, namun juga terdapat *fitting* atau komponen perpipaan yang berfungsi untuk merubah arah aliran, menyebarkan aliran, membesar atau mengecilkan aliran. Contoh penggunaan *fitting* adalah *fitting elbow* yang berfungsi untuk membelokkan arah aliran pada suatu saluran instalasi perpipaan agar sesuai dengan arah kebutuhannya.

Elbow merupakan komponen instalasi system saluran udara berupa saluran pipa melengkung dengan sudut kelengkungan tertentu. Jenis *elbow* berdasarkan sudut kelengkungannya dari sudut 45°, 90°, 180°. Sebagai contoh aliran yang melintasi saluran udara *elbow* 90° mengalami *pressure drop* yang lebih besar daripada aliran yang melintasi saluran udara lurus dengan kecepatan *freestream* yang sama. Dengan adanya *pressure drop* yang cukup besar pada *elbow* 90° maka akan terjadi kerugian energi (*head loss*) yang lebih besar sehingga energi yang dibutuhkan untuk mengalirkan fluida semakin besar. Dengan meningkatnya *headloss*, daya yang dibutuhkan semakin besar pada instalasi saluran seperti kompresor dan blower. Faktor-faktor yang mempengaruhi *pressure drop* dalam *elbow* 90° diantaranya adalah jari-jari kelengkungan *elbow* 90°, gesekan (*friction loss*) antara aliran fluida dengan dinding dalam saluran, separasi yang terjadi dalam *elbow* 90° baik separasi 2D (*separation loss*) maupun 3D (*secondary flow*). Kerugian energi (*head loss*) paling besar didalam *elbow* 90° disebabkan karena *friction loss* dan separasi.

Separasi aliran terjadi karena momentum aliran tidak mampu lagi melawan kenaikan gradien tekanan (*adverse pressure gradient*), sehingga aliran akan terseparasi dan berbalik arah (*back*

flow) dari aliran utama. *Secondary flow* disebabkan karena perbedaan distribusi tekanan sisi *inner* dan *outer wall elbow 90°*. Perbedaan tekanan ini dapat dilihat pada distribusi tekanan sisi *outer wall* lebih besar dibanding sisi *inner wall*, sehingga mengakibatkan partikel fluida *outer wall* bergerak menuju *inner wall*. *Inner wall* adalah sisi dari pada *elbow 90°* yang memiliki radius yang kecil dari titik pusat *elbow 90°* sedangkan *outer wall* adalah sisi dari pada *elbow 90°* yang memiliki radius yang besar dari titik pusat *elbow 90°*. *Secondary flow* pada *rectangular elbow 90°* juga terjadi pada sisi *corner* yang disebabkan oleh interaksi *boundary layer* dan *endwall* yang mengakibatkan penyumbatan aliran (*blockage effect*) dan mengurangi *effective flow area*. Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi pada *elbow 90°* adalah dengan menambahkan suatu gangguan yang mungkin dapat menambah kerugian energi, artinya diperlukan energi yang besar untuk menanggulangi setiap kerugian yang terjadi di sepanjang instalasi. *Pressure drop* yang terjadi pada suatu asesoris tambahan suatu instalasi akan berpengaruh pada aliran di dalamnya sehingga akan memberikan nilai koefisien tertentu sesuai variasi yang digunakan. Oleh sebab itu usaha untuk mengurangi besarnya *pressure drop* menjadi hal yang penting untuk dilakukan.

Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi pada *elbow 90°* adalah dengan menambahkan sudu pengarah (*guide vane*). *Guide vane* akan membantu mengarahkan aliran serta mengurangi terjadinya separasi aliran dan *secondary flow*. Dengan menambahkan *guide vane* pada kondisi tertentu juga dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi karena dapat memaksimalkan *effective flow area*. Dengan ditamhkannya body pengganggu dengan pemasangan *guide vane*, yang dimana tujuan dari pemasangan body pengganggu adalah untuk menunda *separation point* pada sisi *inner* dan *outer wall elbow* dan membuat aliran terjadi turbulen saat memasuki *elbow*. Semakin turbulen suatu aliran maka akan memiliki momentum yang lebih besar sehingga dapat menambah kemampuan untuk melawan

adverse pressure gradient, jika separasi aliran dapat tertunda dan aliran dapat kembali pada kontur aliran utamanya, maka akan terjadi penurunan *minor head losses* dan nilai *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin mengecil.

Penelitian yang dilakukan **Sutardi dkk (2010)** secara eksperimen pada sebuah *fitting elbow*. *Elbow* yang digunakan adalah *rectangular elbow* 90° dengan 4 variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane*, satu *guide vane*, dua *guide vane*, dan tiga *guide vane*. Jarak pada setiap jumlah *guide vane* yang digunakan sama atau linier terhadap sisi dekat *inner wall* sampai *outer wall*. *Re* aliran yang melalui *elbow* divariasikan menjadi $2,1 \times 10^4$, $8,4 \times 10^4$ dan 12×10^4 . Hasil yang didapat dari eksperimen adalah, pada *Re* terkecil sebesar $2,1 \times 10^4$, penambahan *guide vane* dapat mengurangi *pressure drop*. Hal tersebut berbanding terbalik dengan variasi *Re* aliran $8,4 \times 10^4$ dan 12×10^4 dimana terjadi peningkatan *pressure drop* pada setiap penambahan *guide vane*.

Penelitian yang dilakukan **Choi & Lee (2010)** secara eksperimen tentang pengaruh sebuah silinder yang diletakkan dekat dinding plat datar. Eksperimen ini meninjau karakteristik aliran pada daerah sekitar silinder yang diletakkan dekat dinding tersebut dengan memvariasikan rasio *gap* (G/B) antara silinder dengan plat. Silinder yang digunakan dalam eksperimen ini adalah silinder sirkular dan *elips*, serta berurutan mempunyai rasio *axis* $AR = 1$ dan 2 . Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa pada silinder *elips*, *vortex* yang terjadi di daerah mendekati *wake* ketika rasio *gap* lebih besar dari *critical value*, yaitu $G/B = 0,4$ dimana seiring menurunnya rasio *gap*, frekuensi *vortex* juga tiba-tiba mengalami penurunan, kemudian seiring dengan bertambahnya rasio *gap*, *drag coefficient* pada silinder *elips* juga meningkat, namun tingkat penambahannya lebih kecil daripada yang terjadi pada silinder sirkular pada rasio *gap* yang kecil, yaitu kurang dari $G/B = 0,5$. Dari eksperimen juga didapati daerah *wake* yang terbentuk di belakang silinder *elips* dan intensitas turbulensinya lebih kecil daripada pada silinder sirkular.

Penelitian yang dilakukan **Aqfha Hardhian (2017)** secara eksperimen tentang model saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*) dengan $D_h = 125$ mm dengan *upstream duct* (*straight duct*) sepanjang $7D_h$, *Inlet Disturbance Body* dengan $d = 12,5$ mm, *elbow* 90° dengan R/D_h 1,5, dan *downstream duct* (*straight duct*) sepanjang $15D_h$, serta *induced draft fan*. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak $0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dengan Re_{D_h} sebesar $8,74 \times 10^4$ untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang *downstream duct*, *pressure drop* antara *downstream duct* dan *upstream duct*, serta *coefficien pressure elbow* 90° antara *inlet elbow* 90° dan *outlet elbow* 90° , koefisien *loss minor elbow* 90° pada variasi nilai Re_{D_h} sebesar $3,94 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$. Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa penempatan *inlet disturbance body* pada saluran dengan jarak $0,1D_h$ merupakan jarak paling efektif untuk menurunkan *pressure drop*, sedangkan pada jarak *inlet disturbance body* $0,5D_h$ memiliki *pressure drop* tertinggi. Secara fungsi *Reynolds Number*, jarak *inlet disturbance body* $0,1D_h$ memiliki nilai *koefisien losses elbow* 90° paling rendah, sedangkan pada variasi tanpa menggunakan *inlet disturbance body* memiliki nilai *koefisien losses elbow* 90° paling tinggi. Perbedaan nilai *Pressure Coefficient* (ΔC_p) yang cukup signifikan pada *elbow* 90° dengan saluran tanpa *inlet disturbance body* dan menggunakan *inlet disturbance body*, dimana didapatkan bahwa ΔC_p pada jarak *inlet disturbance body* $0,1D_h$ terlihat lebih kecil dibandingkan pada jarak $0,5D_h$ maupun tanpa menggunakan *inlet disturbance body*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, baik yang dilakukan secara eksperimental maupun numerikal tentang cara untuk mereduksi *pressure drop* aliran melalui saluran udara *square duct*, yang terdiri dari *upstream duct*, *elbow* 90° dengan dan tanpa *guide vane*, serta *downstream duct*. *Pressure drop* direduksi dengan menempatkan bodi pengganggu (*disturbance body*) berbentuk silinder sirkular yang ditempatkan pada sisi *upstream duct* pada sisi dekat dengan dinding *inner*,

sebelum aliran memasuki elbow 90^0 . Interaksi aliran dengan *cylinder disturbance body* (CDB) tersebut diharapkan dapat menghasilkan intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* dan digunakan untuk meningkatkan momentum aliran yang semakin turbulen pada sisi *inner elbow* yang diharapkan dapat menunda separasi akibat *shear stress* pada dinding maupun *adverse pressure*.

Penambahan *guide vane* pada elbow 90^0 sebagaimana penelitian **Sutardi, dkk (2010)** pada *Reynold's Number* yang rendah mampu mereduksi *pressure drop*, namun pada *Reynold's Number* yang lebih tinggi gagal untuk mereduksi *pressure drop* akan tetapi semakin menambah nilai *pressure drop*. Sedangkan penambahan *disturbance body* berbentuk silinder sirkular pada sisi *inner upstream duct* sebagaimana penelitian **Aqfha (2016)** pada penempatan CDB ($l/D_h=0,1$) pada sisi *inner upstream duct* mampu untuk mereduksi *pressure drop* pada setiap nilai *Reynold's Number*-nya. Selanjutnya dapat dirumuskan sebuah masalah baru yaitu dengan kombinasi penempatan *disturbance body* pada sisi *inner upstream duct* sebelum *inlet elbow* 90^0 dan penambahan *single guide vane* pada elbow 90^0 , yang dialiri fluida pada berbagai variasi *Reynold's Number* dengan basis diameter hidrolis (D_h), diharapkan dapat memberikan informasi berkenaan dengan reduksi *pressure drop* pada saluran udara berpenampang *square duct* tersebut.

Penempatan CDB pada sisi *inner upstream duct* searah *inner elbow* 90^0 ($l/D_h = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ dan $0,9$), jarak gap sebesar $2,5$ cm (konstan), serta elbow 90^0 dengan *ratio* kelengkungan (R/D_h) = $1,5$ dengan tambahan *single guide vane*. Kombinasi penempatan CDB dan penambahan *single guide vane* pada elbow tersebut selanjutnya divariasikan dengan kecepatan aliran dari 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan setiap 2 m/s atau pada *Reynold's Number* ($1,59 \times 10^4 < Re_{D_h} < 1,59 \times 10^5$). Fenomena interaksi aliran fluida berpenampang *square duct* berkaitan dengan variasi tersebut, maka dapat ditampilkan dalam bentuk data tentang *pressure drop* pada saluran udara seluruhnya maupun *pressure drop* tiap *section*-nya

(*upstream duct, elbow 90°, downstream duct*), koefisien *losses (K elbow 90°*, distribusi *pressure coefficient (Cp)* pada sisi *inner* dan *outer elbow 90°*, serta profil kecepatan horizontal dan vertikal pada *upstream duct* dan *downstream duct* pada beberapa section di *downstream duct (x/D_h)*).

1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sehingga pembahasan dalam penelitian ini lebih bisa terfokus. Batasan masalah tersebut adalah sebagai berikut :

1. Fluida kerja adalah udara dengan profil kecepatan udara uniform pada sisi inlet, sifat *incompressible, viscous* dan *steady*.
2. Perpindahan panas akibat gesekan antara udara dengan dinding saluran dapat diabaikan.
3. Kekasaran dinding diabaikan.
4. Aliran fluida yang melintasi saluran udara termasuk dalam *region* aliran turbulen ($Re > 4000$).
5. Temperatur fluida didalam saluran udara (*duct*) diasumsikan konstan.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan umum dalam penelitian ini yaitu guna mengetahui pengaruh interaksi aliran fluida antara kelengkungan *elbow 90°* dengan adanya *Single Guide Vane* dan *Cylinder Disturbance Body (CDB)* berbentuk silinder sirkular terhadap dinding saluran pada sisi *inner upstream duct* berpenampang bujur sangkar (*square duct*) yang divariasikan terhadap jarak peletakkan CDB yaitu $0,5D_h$; $0,6D_h$; $0,7D_h$; $0,8D_h$ dan $0,9D_h$ pada sisi *inner upstream duct*. Untuk mengetahui karakter aliran tersebut dilakukan studi eksperimen, dengan tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui *pressure drop* antara *upstream duct, elbow 90°* dan *downstream duct*.
2. Mengetahui koefisien *loss minor* pada *elbow 90°*.

3. Mengetahui nilai *pressure coefficient* (C_p) pada *elbow* 90° .
4. Mengetahui profil kecepatan pada *downstream duct* (posisi bidang horizontal dan vertikal).

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut:

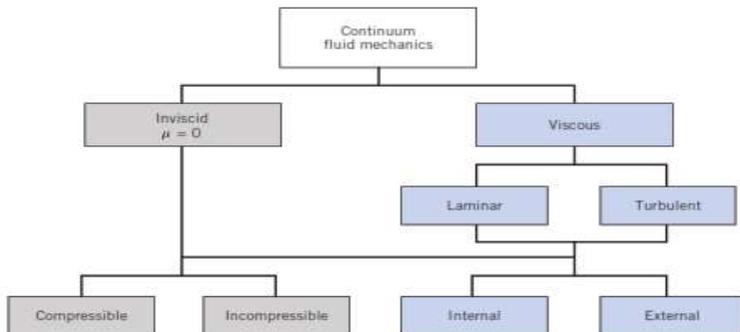
1. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* instalasi saluran udara antara *upstream duct*, *elbow* 90° dan *downstream duct* yang dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada *elbow* 90° dengan adanya *Single Guide Vane*.
2. Memberikan penjelasan tentang koefisien *loss minor elbow* 90° yang dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada *elbow* 90° dengan adanya *Single Guide Vane*.
3. Memberikan gambaran tentang perbedaan nilai *Pressure Coefficient* (C_p) pada *elbow* 90° yang dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada *elbow* 90° dengan adanya *Single Guide Vane*.
4. Memberikan gambaran tentang perbedaan profil kecepatan aliran pada *downstream duct* yang melewati suatu saluran berpenampang *square* dan *elbow* 90° yang dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada *elbow* 90° dengan adanya *Single Guide Vane*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan serta dilengkapi pula dengan referensi mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang mendukung.

2.1 Klasifikasi Aliran Fluida

Karena sulitnya menganalisa partikel cairan secara mikroskopis, maka dilakukan pendekatan secara makroskopis dengan anggapan sudah cukup memadai, ini berarti kita harus mengansumsikan fluida yang “*continuum*” sebagai konsekuensinya bahwa seluruh *properties* fluida merupakan suatu fungsi dari kedudukan dan waktu.

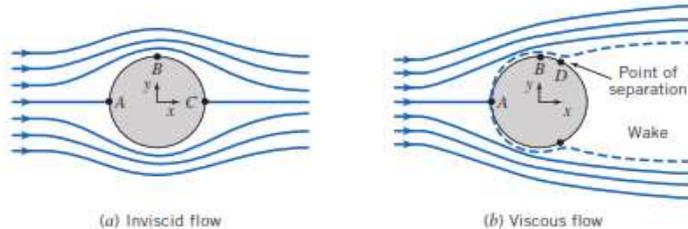


Gambar 2.1 Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 1998)

2.1.1 Aliran *Viscous* dan *Inviscid*

Aliran *viscous* merupakan aliran yang dipengaruhi oleh viskositas fluidanya. Viskositas fluida mempengaruhi aliran udara karena fluida mengalir akan bergesekan dengan dinding. **Gambar 2.2** menunjukkan ilustrasi suatu aliran fluida yang mengalir melewati permukaan bola. Poin A dan C menunjukkan titik stagnasi. Pada poin A dan C, kecepatan aliran fluida sebesar nol sehingga tekanan terbesar terdapat

pada titik tersebut. Sedangkan pada poin B merupakan titik dengan kecepatan paling besar sehingga tekanan terkecil berada pada titik tersebut. Pada titik B dan C terjadi perbedaan tekanan yang menimbulkan terjadinya gerakan aliran melawan arah aliran utama atau biasanya disebut dengan *advers pressure*.



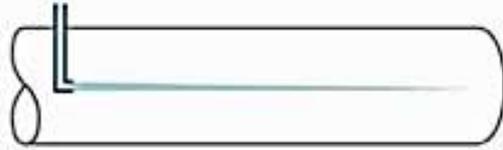
Gambar 2.2 Ilustrasi aliran *inviscid* dan *viscous* (Fox dan Mc. Donald, 2011)

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 pada aliran *viscous* terdapat titik separasi pada titik D, ketika aliran utama dilawan oleh *advers pressure*, maka kecenderungan aliran akan terseparasi karena momentum aliran utama tidak mampu melawannya sehingga memicu terjadinya *vortex*. *Vortex* merupakan suatu kerugian karena berkurangnya aliran yang mengalir karena adanya *pressure drop*.

2.1.2 Aliran Laminar dan Turbulen

▪ Aliran Laminar

Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran dengan fluida bergerak dalam lapisan-lapisan atau lamina-lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Aliran laminar ini mempunyai nilai bilangan *Reynold's* kurang dari 2300 ($Re < 2300$).



Gambar 2.3 Aliran Laminar (*Munson et al, 2002*)

- **Aliran Transisi**

Aliran transisi merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Keadaan peralihan ini tergantung pada viskositas fluida, kecepatan dan lain-lain yang menyangkut geometri aliran dimana nilai bilangan *Reynold's*-nya antara 2300 sampai dengan 4000 ($2300 < Re < 4000$).



Gambar 2.4 Aliran Transisi (*Munson et al, 2002*)

- **Aliran Turbulen**

Aliran turbulen didefinisikan sebagai aliran yang dimana pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dimana nilai bilangan *Reynold's*-nya lebih besar dari 4000 ($Re > 4000$).



Gambar 2.5 Aliran Turbulen (*Munson et al, 2002*)

2.1.3 *Incompressible flow* dan *Compressible flow*

Incompressible flow merupakan aliran yang variasi densitasnya diabaikan. Untuk menentukan jenis aliran ini dapat menggunakan *Mach number*. *Mach number* merupakan bilangan tak berdimensi yang dapat menentukan *incompressible flow* atau *compressible flow* berdasarkan kecepatan aliran dibandingkan dengan kecepatan suara. Kecepatan suara pada suhu 21°C bernilai 344 m/s. Jika nilai dari *Mach number* kurang dari 0,3; maka aliran tersebut termasuk *incompressible flow*. Apabila lebih dari 0,3; maka aliran tersebut termasuk *compressible flow*. Namun terdapat suatu kondisi udara termasuk batas *incompressible flow* yakni pada kecepatan 100 m/s nilai *Mach number* sebesar 0,3.

2.2 Properti Fluida

2.2.1 Densitas

Udara adalah fluida yang memiliki *densitas* dan *viskositas*. *Densitas* (ρ) didefinisikan sebagai massa persatuan *volume*. Properti ini tergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Densitas dapat dinyatakan dalam tiga bentuk, yaitu:

1) Densitas Massa

Merupakan perbandingan jumlah massa dengan jumlah volume. Densitas massa dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Dimana : m = massa (kg)

V = volume (m^3)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

2) Berat Spesifik

Didefinisikan sebagai densitas massa dikalikan dengan gravitasi dan dapat dirumuskan dengan :

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.2)$$

Dimana : γ = berat spesifik (N/m^3)
 ρ = massa jenis (kg/m^3)
 g = percepatan gravitasi ($9.81 m/s^2$)

3) Densitas Relatif (Specific Gravity)

Specific Gravity (SG) yaitu perbandingan antara berat spesifik suatu zat dengan berat spesifik air pada temperatur 4°C. Densitas relatif tidak memiliki satuan.

$$SG = \frac{\gamma_{fluid}}{\gamma_{H_2O}} \quad (2.3)$$

2.2.2 Viskositas

Viskositas disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk *incompressible fluid*, properti ini bergantung pada temperatur. Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk yaitu:

1) Viskositas Dinamis (μ)

Merupakan perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besarnya viskositas air bervariasi dan dipengaruhi oleh temperatur.

2) Viskositas Kinematik (ν)

Merupakan perbandingan viskositas dinamik (μ) terhadap kerapatan densitas (ρ):

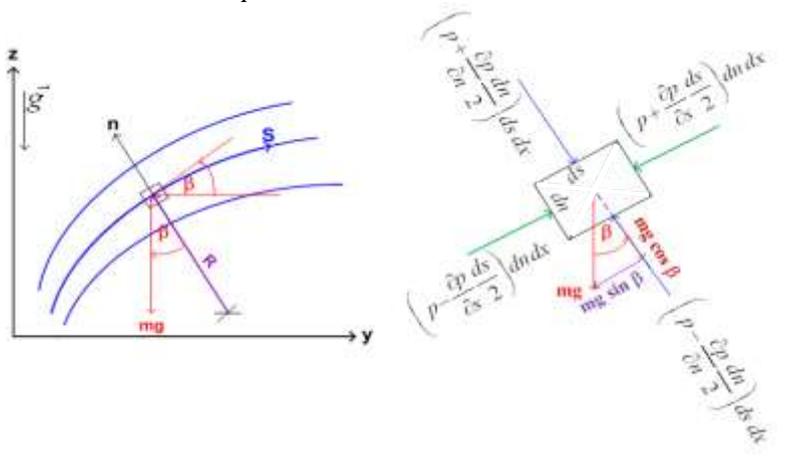
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.4)$$

2.3 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*

Pada sebuah aliran tunak, aliran fluida di sepanjang *streamline* setiap partikel fluida yang berurutan melewati titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. Dalam aliran tunak sebuah partikel fluida akan bergerak di sepanjang *streamline* dikarenakan untuk *steady flow*, *pathlines* dan *streamline* berlangsung dengan bersamaan. Dari persamaan Euler dibangun persamaan gerak yang dinyatakan dalam koordinat *streamline* untuk *inviscid flow*.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.5)$$

Untuk memperjelas, dapat dilihat aliran pada bidang yz seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.6**. Persamaan gerak dituliskan dalam koordinat s (jarak disepanjang *streamline*) dan juga koordinat n (jarak normal terhadap *streamline*). Tekanan di pusat dari element adalah p .



Gambar 2.6 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox dan Mc. Donald, 2011)

Untuk *steady flow* dan mengabaikan *body forces*, persamaan Euler di sepanjang *streamline* ke arah s dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.6)$$

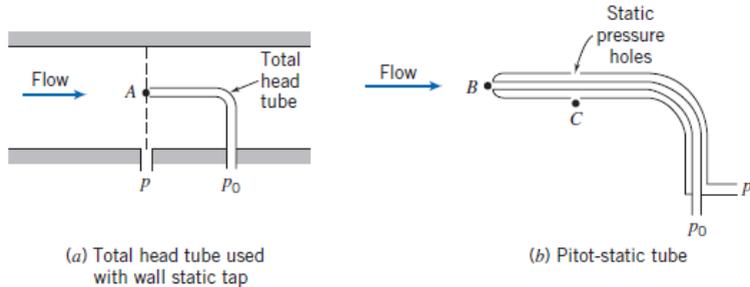
persamaan (2.6) tersebut menunjukkan hubungan antara kecepatan dengan tekanan, yang mana apabila terjadi penurunan kecepatan maka terjadi peningkatan tekanan, begitu pula sebaliknya. Hal ini sangat sesuai dengan hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa apabila suatu aliran ideal tanpa gesekan dijumlahkan antara komponen tekanan dan kecepatannya pada setiap titik, maka hasilnya adalah sama. Untuk persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.7)$$

persamaan (2.7) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan ke arah luar dari lengkungan *streamline*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan gaya yang bekerja pada partikel hanyalah gaya dari tekanan, medan tekanan menyebabkan percepatan sentripetal. Pada daerah *streamline* yang lurus atau radius kelengkungannya (R) tak terhingga maka tidak ada perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline* lurus.

2.4 Tekanan Statis, Tekanan Stagnasi dan Tekanan Dinamis

Tekanan yang diukur melalui suatu alat yang bergerak bersama aliran dengan kecepatan relatif alat ukur terhadap aliran dinamakan tekanan statis. Pengukuran tekanan statis biasanya menggunakan *wall pressure tap*, kecepatan aliran fluida pada permukaan dinding akan bernilai nol karena tidak ada fluida yang ideal (*non viscous*).



Gambar 2.7 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis (Fox dan Mc. Donald, 2011)

Tekanan stagnasi dapat didefinisikan sebagai tekanan yang dapat diukur pada daerah dimana aliran fluida diperlambat hingga nol dengan proses perlambatan tanpa gesekan. Persamaan Bernoulli dapat diterapkan pada aliran kompresibel untuk sepanjang suatu *streamline*, yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{constant} \quad (2.8)$$

Pengukuran tekanan stagnasi (P_o) dimana kecepatannya (U_o) adalah nol dan $z_o = z$ maka persamaan Bernoulli di atas menjadi :

$$P_o = P + \frac{v^2}{2} \rho \quad (2.9)$$

Tekanan dinamis merupakan selisih antara tekanan stagnasi dengan tekanan statis.

$$P_o - P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.10)$$

Dimana :

- P : Tekanan statis
- P_o : Tekanan stagnasi
- ρ : Densitas fluida
- U : Kecepatan aliran fluida
- g : Percepatan gravitasi bumi
- z : Ketinggian

2.5 Bilangan Reynold's

Bilangan *Reynold's* adalah bilangan tidak berdimensi yang dapat mengklasifikasikan 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 saja (laminar dan turbulen). Secara perumusan, bilangan *Reynold's* dapat ditulis sebagai berikut:

$$Re = \frac{\bar{V}.D}{\nu} \quad (2.11)$$

- Dimana : V = Kecepatan fluida yang mengalir $\left(\frac{m}{s}\right)$
- D = Diameter dalam pipa (m)
- ν = Kekentalan kinematik fluida $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Untuk fluida yang melewati pipa yang tidak berbentuk *circular*, maka diameternya menggunakan diameter hidrolis (D_h), dimana D_h dihitung menggunakan rumus:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.12)$$

Dimana :
 D_h = Diameter hidrolis (m)
 A = Luas penampang (m^2)
 P = Keliling penampang (m)

2.6 Pressure Coefficient (C_p)

Dalam sistem *ducting*, sistem perpipaan, atau model pengujian lainnya, sering kali dilakukan modifikasi parameter, $\Delta p/\rho V^2$, dengan memasukkan faktor $\frac{1}{2}$ untuk membuat *denominator* menyediakan tekanan dinamik. Maka terbentuklah rasio berikut,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.13)$$

dimana Δp adalah tekanan lokal dikurangi dengan tekanan *freestream*, ρ dan V adalah properti dari aliran *freestream*. Rasio ini merupakan rasio antara gaya tekanan terhadap gaya inersia, dan rasio ini disebut dengan *Euler number*. *Euler number* sering disebut dengan *pressure coefficient*, C_p . Dalam pengujian suatu model, *pressure coefficient* secara tidak langsung digunakan untuk menyatakan besarnya *pressure drop*. *Pressure coefficient* pada *elbow* didefinisikan sebagai selisih antara tekanan statis pada dinding dengan tekanan statis referensi dibagi dengan dinamis yang diukur pada *inlet*.

2.7 Head Loss

Head loss merupakan suatu fenomena rugi-rugi aliran di dalam sistem pemipaan. Rugi-rugi aliran selalu terjadi pada sistem pemipaan dengan menggunakan berbagai macam fluida, seperti fluida cair dan gas. Pada umumnya, rugi aliran yang terbesar terjadi pada fluida cair, hal ini dikarenakan sifat molekulnya yang padat dibandingkan gas dan memiliki gesekan lebih besar terhadap media yang dilaluinya, terutama jika koefisien gesek media yang dilalui itu lebih besar, maka gesekan yang terjadi pun akan semakin besar. *Head losses* sangat merugikan dalam aliran fluida di dalam

sistem pemipaan, karena *head losses* dapat menurunkan tingkat efisiensi aliran fluida.

Salah satu penyebab *head losses* adalah konstruksi desain dari sistem pemipaan tersebut. Jika konstruksi memiliki percabangan yang lebih banyak maka akan memperbesar rugi alirannya, selain itu aliran yang semula dalam keadaan laminar pada saat melalui pipa lurus yang koefisien geseknya besar akan berubah menjadi aliran turbulen. Kondisi aliran turbulen inilah yang dapat merugikan dalam sistem pemipaan tersebut, seperti akan menimbulkan getaran dan juga pengelupasan dinding pipa. Selain itu akibat yang paling mendasar dengan adanya rugi-rugi aliran (*head losses*) ialah dapat menyebabkan besarnya energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan aliran fluida yang berdampak meningkatnya penggunaan listrik pada mesin penggerak fluida seperti pompa. *Head losses* (rugi aliran) sering terjadi pada sistem pemipaan untuk seluruh perusahaan, industri rumah tangga, dan tempat lainnya yang menggunakan pipa sebagai distribusi aliran fluida.

2.7.1 Head Loss Mayor

Head losses mayor (rugi mayor) adalah besar nilai kehilangan energi yang diakibatkan oleh gesekan antara fluida dengan dinding pipa lurus yang mempunyai luas penampang yang tetap. Untuk menghitung *head loss mayor* dibedakan menurut jenis aliran fluidanya. *Head loss* yang terjadi pada aliran *fully developed* yang melewati pipa lurus horizontal dinyatakan sebagai kerugian tekanan aliran fluida *fully developed* melalui pipa penampang konstan.

a. Laminar

Untuk aliran laminar, berkembang penuh pada pipa horisontal, maka penurunan tekanan dapat dihitung secara analitis, yaitu:

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{D} \quad (2.14)$$

Substitusi dari persamaan (2.14), didapatkan:

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{\rho D} = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2.15)$$

Dimana: h_{lm} = head losses minor (m)

Dan koefisien gesekan (f) untuk aliran laminar adalah:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.16)$$

b. Turbulen

Head losses mayor untuk aliran turbulen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.17)$$

Dimana f (koefisien gesek) didapat dari hasil eksperimen dan dipengaruhi oleh *Reynold's Number* (Re) dan kekasaran permukaan relatif ($\frac{l}{D}$).

2.7.2 Head Loss Minor

Head losses minor (rugi minor) adalah besar nilai kehilangan energi aliran fluida di dalam pipa yang disebabkan oleh perubahan luas penampang jalan aliran, *entrance*, *fitting*, dan lain sebagainya. Rugi minor adalah rugi yang disebabkan gangguan lokal seperti pada perubahan penampang, adanya katub, belokan *elbow* dan sebagainya. Kerugian ini dapat diketahui dari persamaan:

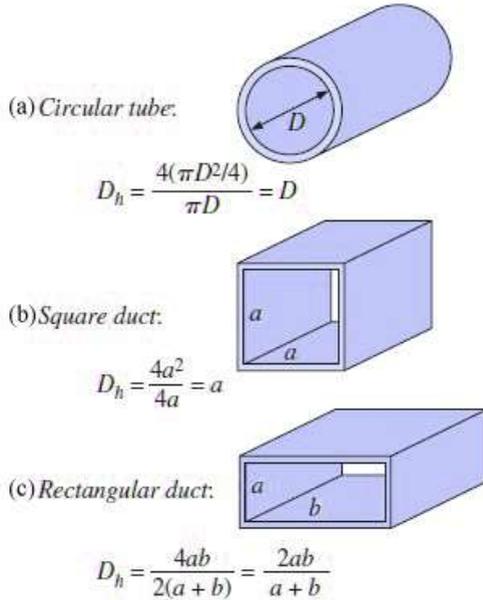
$$h_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.18)$$

Dimana : h_{lm} = head losses minor (m)

2.8 Sistem Saluran Udara (*Ducting*)

Secara umum *ducting* merupakan suatu benda yang berbentuk *square* kotak dan spiral atau *round* yang berfungsi sebagai media untuk mendistribusikan fluida yang bersifat udara dari suatu tempat ke tempat lain. *Ducting* juga bisa diartikan suatu benda kotak atau spiral yang berfungsi untuk mensirkulasikan sejumlah

udara dari suatu ruangan dengan bantuan *fan unit/blower*, serta *AC central* dengan menggunakan sistem resirkulasi (*return air*).



Gambar 2.8 Macam – macam bentuk *ducting* (a) *Circular Tube*
 (b) *Square Duct* (c) *Rectangular Duct*
 (Fox dan Mc. Donald, 2011)

Selain itu, terdapat berbagai macam fungsi *ducting* dalam penggunaannya dalam kehidupan sehari – hari, antara lain sebagai *supply* udara dingin ke ruang yang dikondisikan (*supply air*), *ducting* yang berfungsi sebagai *supply* dari udara luar (*fresh air*) dan ada pula *ducting* yang berfungsi untuk membuang udara dari dalam ke luar (*exhaust air*) secara fisik bentuk *ducting supply air* ini berinsulasi karena untuk mempertahankan udara dingin yang didistribusikan tidak terbuang, sedangkan untuk *ducting fresh air* dan *exhaust air* ini tidak menggunakan insulasi, lapisan dari insulasi ini antara lain : *Glasswool*, *Aluminium Foil*, *Spindle pin*/

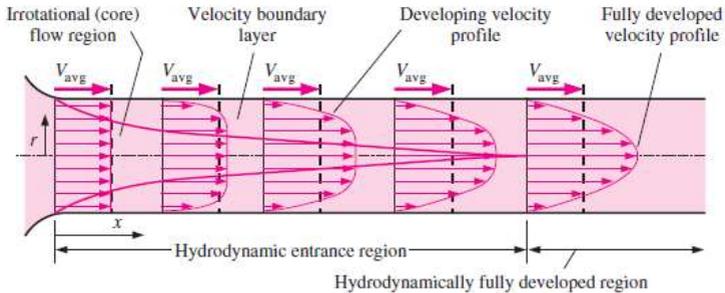
pengikat/ tali/ *flinkote*. Sedangkan untuk lapisan *ducting* didekat unit *AC Indoor* (untuk sistem *AC Split*) atau Unit *Air Handling Unit* (sistem *central*) biasanya bagian dalamnya menggunakan *Glasswool* dan *glasscloth*, untuk meredam bunyi bising dari unit. Bahan yang digunakan untuk *ducting* itu sendiri bermacam-macam, ada yang terbuat dari bahan *PVC*, *mild steel*, BJLS (baja lapis seng), *PU (Polyurethane)*, untuk *ducting* yang terbuat dari bahan *PU* tidak perlu menggunakan lapisan luar karena lapisannya sudah tersedia dari pabrikan hanya untuk lapisan dalamnya saja yang terdapat didekat unit menggunakan *glasscloth*.

2.9 Karakteristik Aliran di dalam Saluran Udara

Karakteristik struktur aliran internal (dalam pipa) sangat tergantung dari kecepatan rata-rata aliran dalam pipa, densitas, viskositas dan diameter pipa. Pada instalasi sistem *ducting* ataupun perpipaan, *elbow* merupakan bagian yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya separasi dan *secondary flow*.

2.9.1 Aliran Berkembang Penuh (*Fully Developed Flow*)

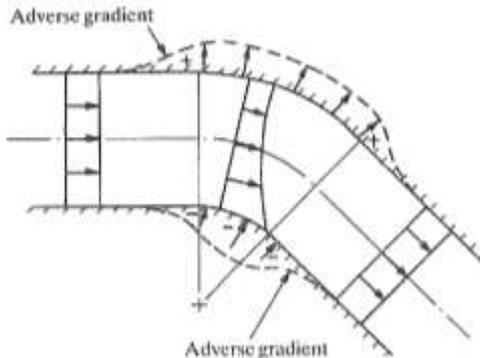
Fully Developed Flow merupakan suatu fenomena aliran dimana terjadinya *boundary layer* maksimum atau profil kecepatan yang tetap, tidak mengalami perubahan. Profil ini dipengaruhi oleh viskositas yang berakibat pada terjadinya gaya geser antara profil kecepatan. Fenomena aliran seperti ini akan terjadi ketika aliran yang mengalir tidak mengalami gangguan, seperti *fitting*, instalasi, dan sebagainya. Setiap aliran baik aliran laminar maupun aliran turbulen mempunyai besaran yang berbeda dimana untuk aliran laminar bernilai konstan dari titik awal, hal tersebut terjadi karena pengaruh kecepatan fluida sehingga *fully developed flow* lebih cepat, berbeda dengan aliran turbulen dimana *fully developed flow* disebabkan oleh adanya aliran acak sehingga *fully developed flow* terjadi lebih panjang.



Gambar 2.9 Profil Aliran *Internal flow* pada pipa
(Yunus A.Cengel & John M.Cimbala : *Fluid Mechanics Fundamental and Application*, 2006)

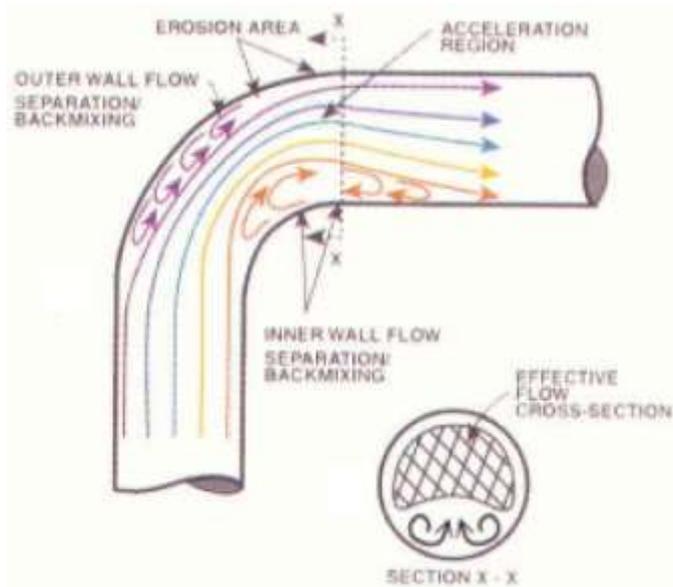
2.9.2 Aliran Sekunder (*Secondary Flow*) yang Terjadi pada *Elbow*

Aliran yang melintasi suatu *fitting* seperti *elbow* akan terjadi perubahan arah aliran dimana akan mempengaruhi perubahan tekanan statis dan distribusi kecepatan aliran, sehingga menimbulkan dua tekanan balik (*adverse pressure*) seperti pada **Gambar 2.10**



Gambar 2.10 Aliran di sepanjang lengkungan saluran
(D.S.Miller : *Internal Flows System*, 2nd edition 1990)

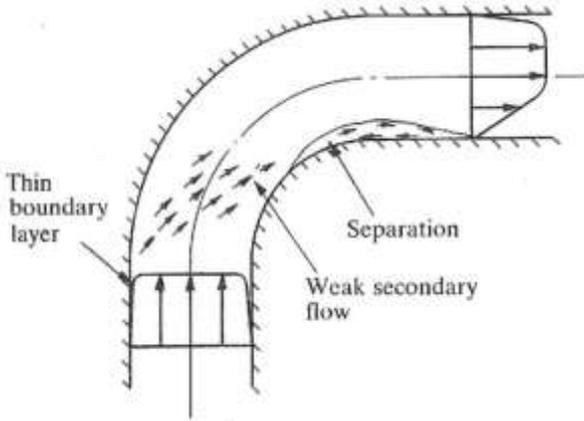
Apabila aliran tidak mampu mengatasi tekanan balik tersebut, maka akan terjadi aliran sekunder dan turbulensi pada struktur aliran yang disebabkan oleh bentuk saluran yang melengkung atau pada *elbow*. Pada sisi *inner* dan *outer wall* terjadi perbedaan distribusi kecepatan, ini terjadi karena aliran yang bergerak dari sisi *outer wall* menuju *inner wall* yang memiliki tekanan statis semakin besar. Adanya perbedaan tekanan pada kedua sisi menyebabkan aliran di dalam *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama. Hal ini hanya terjadi pada *elbow* berpenampang lingkaran, sedangkan untuk *elbow* berpenampang persegi fenomena *boundary layer* hanya dijumpai pada sisi bawah. Aliran sekunder dapat digambarkan pada **Gambar 2.11** berikut :



Gambar 2.11 Aliran sekunder yang terbentuk akibat adanya lengkung
(Yunus A.Cengel & John M.Cimbala : Fluid Mechanics Fundamental and Application, 2006)

2.9.3 Proses Terjadinya Separasi Aliran Pada *Elbow 90°*

Pada **Gambar 2.12** dapat ditunjukkan profil kecepatan aliran ketika melewati suatu *inner wall elbow 90°*. Proses separasi berawal dari aliran yang bergesekan dengan dinding, kemudian setelah melewati elokan pada sisi *inner wall* terjadi perbedaan distribusi tekanan (*advers pressure gradient*). Adanya *advers pressure gradient* menyebabkan terjadinya separasi aliran. Setelah aliran terseparasi pada sisi *inner wall* terjadi penurunan momentum aliran, hal tersebut menunjukkan timbulnya *vortex* atau *backflow*. Separasi aliran yang terjadi dapat berpengaruh sampai aliran meninggalkan *elbow 90°*. Efek dari *backflow* akan semakin membesar menyebabkan terjadinya penyempitan bidang alir aliran udara. Hal tersebut menimbulkan peningkatan *pressure drop*.



Gambar 2.12 Separasi aliran pada *inner wall elbow 90°*
(D.S.Miller : *Internal Flows System*, 2nd edition 1990)

2.10 Penelitian Terdahulu

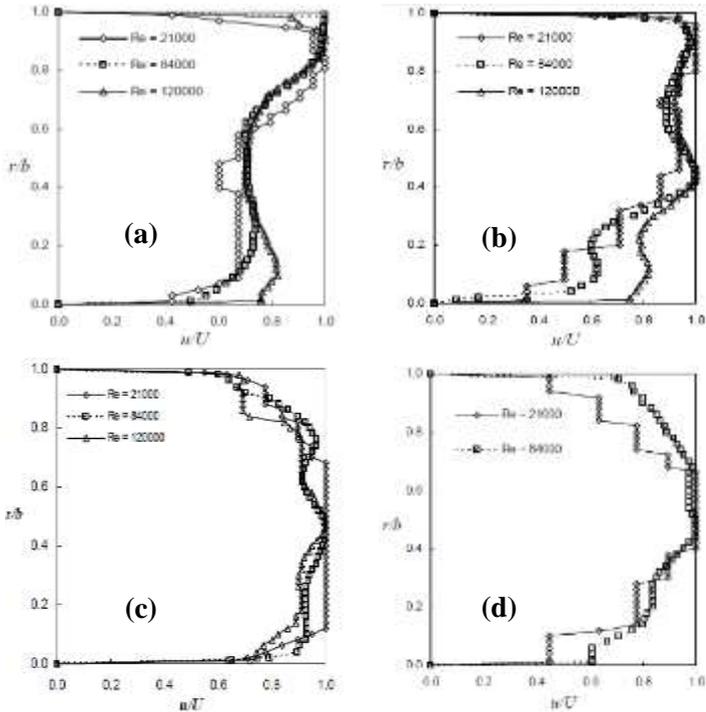
Sutardi dkk. (2010) melakukan penelitian secara eksperimen pada sebuah *elbow*. *Elbow* yang digunakan berbentuk *rounded* dan *rectangular* dengan 4 variasi pemasangan guide vane yaitu tanpa guide vane, satu guide vane, dua guide vane, dan tiga guide vane. Re_E aliran yang melalui *elbow* divariasikan menjadi 2.1×10^4 , 8.4

$\times 10^4$ dan 12×10^5 . Hasil yang didapat dari eksperimen adalah, pada Re_{Dh} e terkecil sebesar 2.1×10^4 , penambahan guide vane mengurangi pressure drop. Hal tersebut berbanding terbalik dengan variasi Re_{Dh} aliran 8.4×10^4 dan 12×10^5 dimana terjadi peningkatan pressure drop pada setiap penambahan guide vane. Selain itu, penambahan guide vane pada setiap variasi Re_{Dh} juga berhasil mengurangi turbulansi aliran. Perbandingan data kuantitatif pengaruh penambahan guide vane terhadap pressure drop dapat dijelaskan pada **Tabel 2.1** sebagai berikut:

Tabel 2.1 Pengaruh penambahan guide vane terhadap pressure drop (Sutardi dkk., 2010)

Re_{Dh}	Number of Guide Vanes	Δp (N/m ²)	Δp (%)
21000	0	4.01	-
	1	2.67	-33.42%
	2	2.73	-31.92%
	3	2.71	-32.42%
84000	0	36.07	-
	1	37.40	3.69%
	2	51.12	41.72%
	3	74.59	106.79%
120000	0	79.11	-
	1	88.66	12.07%
	2	118.22	49.44%
	3	-	-

Sedangkan untuk profil kecepatan lokasi *downstream* pada elbow dengan 4 variasi pemasangan guide vane yaitu tanpa guide vane, satu guide vane, dua guide vane, dan tiga guide vane ditunjukkan pada **Gambar 2.13**. Lokasi *downstream* adalah $3D_h$ dari ujung guide vanes. Untuk semua konfigurasi elbow, tanpa guide vane, dengan satu, dua, atau tiga guide vanes, profil kecepatannya dipengaruhi oleh nilai Re_{Dh} . Profil kecepatan berkembang pada nilai Re_{Dh} yang tinggi, hal ini disebabkan karena alirannya lebih turbulen.



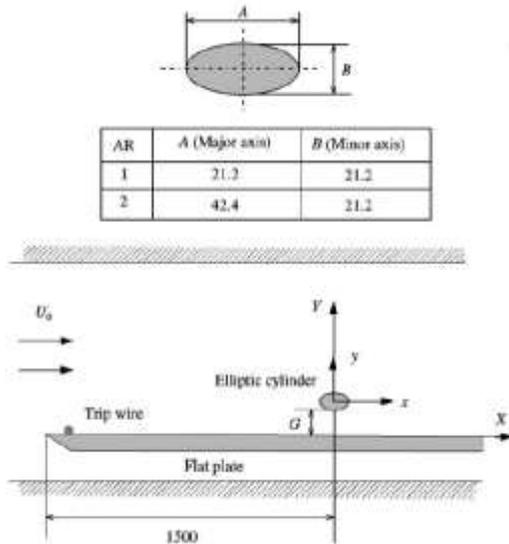
Gambar 2.13 Profil kecepatan pada elbow (a) Tanpa *Guide Vane*, (b) 1 *Guide Vane*, (c) 2 *Guide Vane*, (d) 3 *Guide Vane* (Sutardi dkk., 2010)

Profil kecepatan elbow tanpa *guide vane* pada **Gambar 2.13 (a)** saat Re_{Dh} 12×10^5 lebih berkembang dibandingkan saat Re_{Dh} $2,1 \times 10^4$ dan $8,4 \times 10^4$. Untuk elbow dengan satu *guide vane* pada **Gambar 2.13 (b)** profil kecepatannya lebih berkembang daripada elbow tanpa *guide vane* dan profil kecepatannya juga berkembang seiring bertambahnya nilai Re_{Dh} . Begitu juga pada elbow dengan tiga *guide vane* profil kecepatannya berkembang saat Re_{Dh} tertinggi ($Re_{Dh} = 8,4 \times 10^4$) seperti pada **Gambar 2.13 (d)**. Namun pada **Gambar 2.13 (c)** untuk elbow dengan dua *guide vane* profil kecepatannya tidak berkembang pada Re_{Dh} yang tertinggi

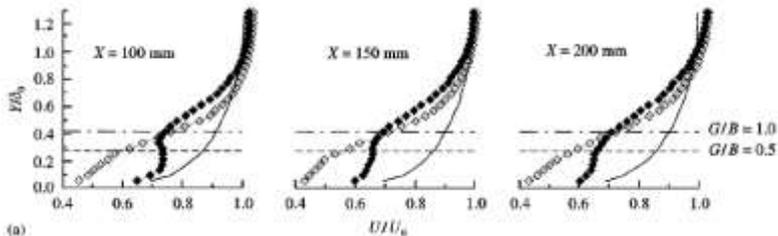
($Re_{Dh}=12 \times 10^5$). Hal ini dikarenakan lokasi downstream pada $3D_h$ setelah guide vane profilnya jauh dari relaksasi.

Choi & Lee (2010) melakukan penelitian secara eksperimen tentang pengaruh sebuah silinder yang diletakkan dekat dinding plat datar. Eksperimen ini meninjau karakteristik aliran pada daerah sekitar silinder yang diletakkan dekat dinding tersebut dengan memvariasikan rasio *gap* (G/B) antara silinder dengan plat. Silinder yang digunakan dalam eksperimen ini adalah silinder sirkular dan *elips*, serta berurutan mempunyai rasio *axis* $AR = 1$ dan 2 .

Eksperimen dilakukan pada sebuah *wind tunnel* dengan tinggi $0,6 \text{ m}$, lebar $0,72 \text{ m}$, dan panjang 6 m . Intensitas turbulensi *freestream* pada bagian uji kurang dari $0,08\%$ pada 10 m/s . **Gambar 2.14** menunjukkan bentuk geometri silinder *elips* dan skema peralatan yang digunakan pada eksperimen ini. Sebuah plat datar dengan ketebalan 15 mm dan panjang $4,8 \text{ mm}$ dipasang 100 mm di atas bagian permukaan dari bagian uji, dimana pada bagian depan plat datar tersebut berbentuk runcing membentuk sudut 30° . Silinder *elips* diletakkan pada $1,5 \text{ m}$ dari bagian depan plat datar tersebut. Selain itu, juga ditambahkan sebuah kawat pengganggu pada plat datar tersebut dengan diameter $3,5 \text{ mm}$ yang diletakkan sejauh 100 mm dari bagian ujung plat. *Boundary layer* terbentuk di atas bidang datar memiliki ketebalan 75 mm pada lokasi silinder. Selama eksperimen, kecepatan *freestream* (U_o) telah ditetapkan pada 10 m/s dan menggunakan *Reynold's Number* sesuai dengan tinggi dari penampang silinder yang digunakan, yaitu $1,4 \times 10^4$.



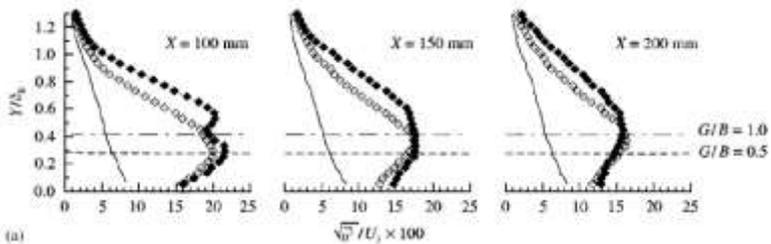
Gambar 2.14 Bentuk Geometri Silinder *Elips* dan Skema Penelitian (Choi & Lee, 2010)



Gambar 2.15 Mean streamwise velocity profiles pada $X = 100$, 150 , dan 200 mm; $AR = 1$; — tanpa silinder; \diamond $G/B = 0,5$; \blacklozenge $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010)

Gambar 2.15 menunjukkan *streamwise velocity profile* yang diukur pada $X = 100$, 150 , dan 200 mm, serta *velocity profile* tanpa silinder. Dari situ, didapatkan bahwa pada silinder *elips* vortex terjadi

di daerah mendekati *wake* ketika rasio *gap* lebih besar dari *critical value*, yaitu $G/B = 0,4$ dimana seiring menurunnya rasio *gap*, frekuensi *vortex* juga tiba-tiba mengalami penurunan.

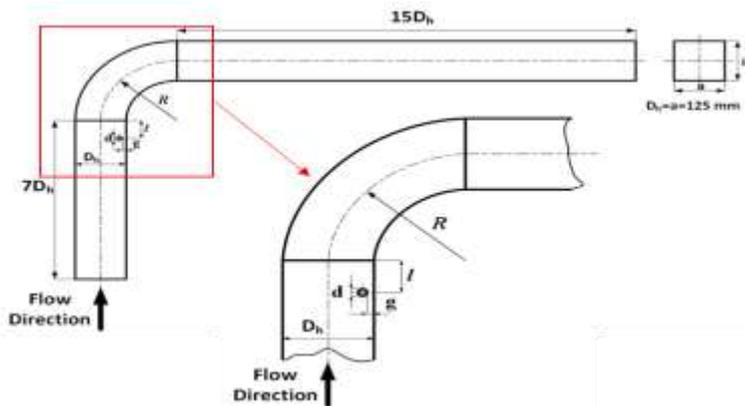


Gambar 2.16 Streamwise turbulence intensity pada $X = 100, 150,$ dan 200 mm ; $AR = 1$; — tanpa silinder; —◇— $G/B = 0,5$; —◆— $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010)

Gambar 2.16 menunjukkan intensitas turbulensi pada daerah *wake* silinder sirkular semakin meningkat jika dibandingkan dengan plat datar tanpa silinder sirkular. Semakin menjauhi daerah *wake* silinder sirkular, intensitas turbulensi semakin berkurang. Intensitas turbulensi yang ditimbulkan oleh silinder sirkular dengan $G/B = 1,0$ lebih kuat jika dibandingkan dengan $G/B = 0,5$.

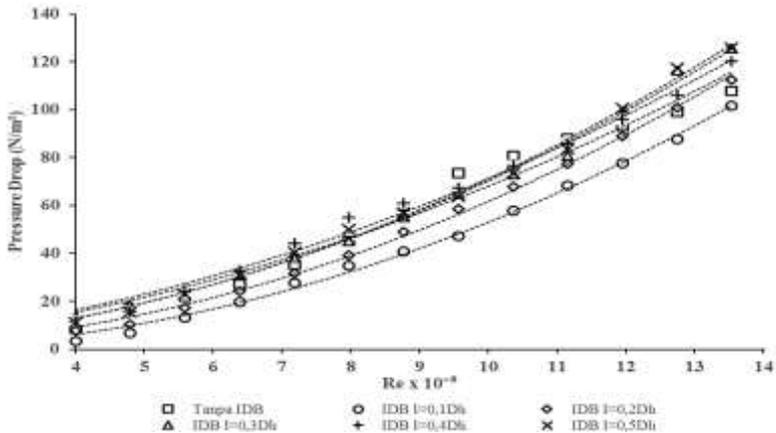
Aqfha Hardian (2017) melakukan penelitian secara eksperimen aliran fluida pada *square duct* dan *square elbow* 90° yang melalui suatu bodi pengganggu berupa *Inlet Disturbance Body (IDB)*. Eksperimen ini dilakukan pada $Rc/D_h = 1.5$ dengan variasi peletakan $IDB \ l/D_h = 0.1$ sampai 0.5 , l merupakan jarak longitudinal *IDB* dari *inlet elbow*. D_h merupakan diameter hydraulic square duct. *Inlet Disturbance Body* yang digunakan berbentuk silinder dengan tinggi 125 mm dan berdiameter $12,5 \text{ mm}$. *Reynold's Number* yang digunakan untuk mendapatkan nilai *pressure drop* dan koefisien *loss minor elbow* 90° adalah $3,97 \times 10^4$ sampai $13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s), untuk mendapatkan nilai *Pressure Coefficient* pada *elbow* 90° adalah $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $13,5 \times 10^4$, sedangkan untuk mendapatkan profil kecepatan dan

intensitas turbulensi digunakan kecepatan 11 m/s dengan *Reynold's Number* $8,74 \times 10^4$.



Gambar 2.17 Skema instalasi penelitian dan gambar peletakkan IDB (Aqfha, 2017)

Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* pada saluran, akan mengurangi *losses* pada *elbow 90°* dengan memanfaatkan adanya *shear layer* (aliran yang terseparasi) dari *inlet disturbance body* yang memiliki intensitas turbulensi cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner* maupun *outer* dan mengurangi *blockage area* sehingga momentum aliran utama tidak berkurang terlalu banyak akibat adanya *losses* pada *elbow 90°* tersebut. Penempatan *inlet disturbance body* yang terbaik adalah pada jarak $l/D_h = 0.1$ untuk meningkatkan intensitas turbulensi terbaik sehingga dapat menurunkan *pressure drop* dan proses *recovery* aliran lebih cepat. Secara fungsi *Reynold's Number*, jarak $l/D_h = 0.1$ memiliki nilai *coefficient losses elbow* paling rendah.

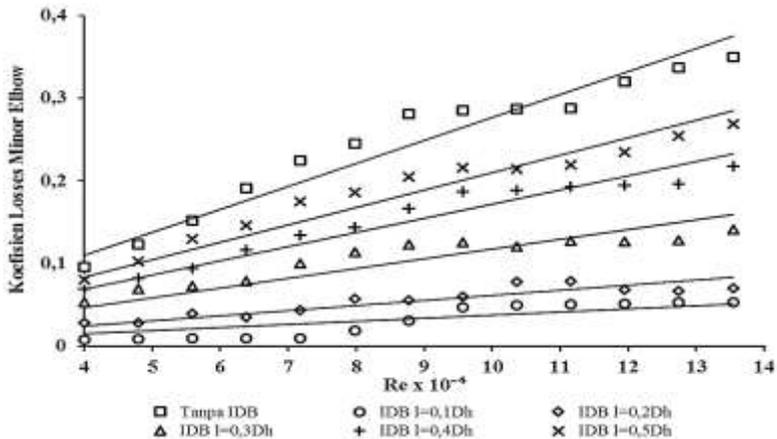


Gambar 2.18 Pressure drop pada square duct dengan square elbow 90° dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (Aqfha, 2017)

Pada **Gambar 2.18** menunjukkan bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dimana nilai *pressure drop* akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya *Reynold's Number* pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*. Pada jarak *inlet disturbance body* $0,1 D_h$ mempunyai *Trendline* grafik meningkat mulai dari *Reynold's Number* $3,97 \times 10^4$ sampai dengan *Reynold's Number* $13,5 \times 10^4$. *Trendline* grafik meningkat ini juga terjadi pada jarak $0,2 D_h$, $0,3 D_h$, $0,4 D_h$, dan $0,5 D_h$ mulai dari *Reynold's Number* $3,97 \times 10^4$ sampai dengan *Reynold's Number* $13,5 \times 10^4$. Dari seluruh variasi jarak *inlet disturbance body*, dapat dilihat bahwa pada jarak *inlet disturbance body* $0,1 D_h$ memiliki *pressure drop* paling rendah dengan persentase kenaikan *pressure drop* sebesar 23,57% pada setiap variasi *Reynold's Number*, sedangkan pada jarak *inlet disturbance body* $0,5 D_h$ memiliki *pressure drop* paling tinggi

dengan persentase kenaikan *pressure drop* sebesar 17,09% pada setiap variasi *Reynold's Number*.

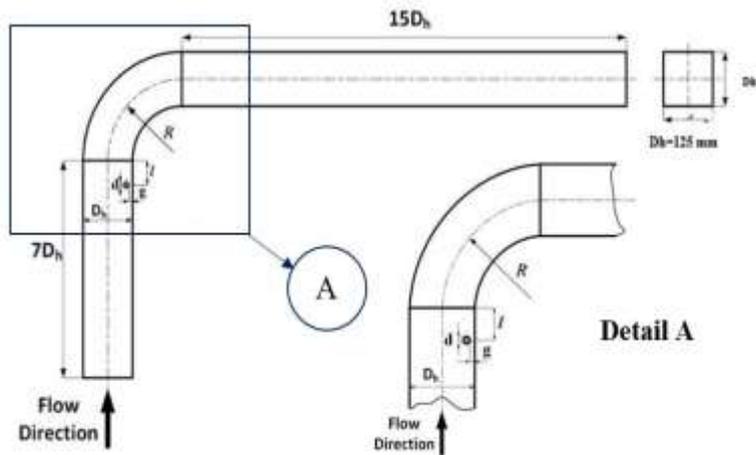
Pada **Gambar 2.19** ditunjukkan meningkatnya koefisien *losses elbow* 90° seiring dengan meningkatnya *Reynold's number* terjadi pada masing-masing jarak peletakan *inlet disturbance body*. Karena *pressure drop* yang terjadi juga semakin besar maka sesuai dengan rumusan $k_{elbow\ 90^\circ} = \frac{2\Delta P}{\rho V^2}$.



Gambar 2.19 Koefisien *Losses Elbow* 90° pada *square duct* dengan *square elbow* 90° dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (Aqfha,2017)

Adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai koefisien *losses elbow* 90° yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dimana nilai koefisien *losses elbow* 90° akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya *Reynold's Number* pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*. Pada jarak *inlet disturbance body* 0,1 D_h mempunyai *Trendline* grafik meningkat mulai dari *Reynold's Number* $3,97 \times 10^4$ sampai dengan *Reynold's Number* $13,5 \times 10^4$.

Rizkia Putra P. (2017), melakukan penelitian dengan cara eksperimen dengan model saluran yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *square duct* dengan diameter (D_h) sebesar 125 mm. Saluran udara terdiri dari *upstream duct* sepanjang $7D_h$, IDB dengan diameter sebesar 12,5 mm, *elbow 90°* dengan rasio kelengkungan (R/D_h) sebesar 1,5, *downstream duct* sepanjang $15D_h$, dan *centrifugal fan*. Pengukuran parameter menggunakan *pitot static tube*, manometer, dan *pressure transducer*. IDB diletakkan pada jarak (l/D_h) sebesar 0,1 dari *inlet elbow 90°* dengan variasi gap (g/d) sebesar 0,1 sampai 0,5. Untuk mendapatkan profil kecepatan dan intensitas turbulensi *downstream duct* pada posisi vertikal dan horizontal, pengujian dilakukan pada bilangan *Reynold's* (Re_{Dh}) $8,74 \times 10^4$. Untuk mendapatkan *pressure coefficient elbow 90°*, pengujian dilakukan pada bilangan *Reynold's* (Re_{Dh}) $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $1,35 \times 10^5$. Untuk mendapatkan *pressure drop square duct* dan *loss coefficient elbow 90°*, pengujian dilakukan pada Re_{Dh} sebesar $4,09 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,39 \times 10^5$ atau kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s.

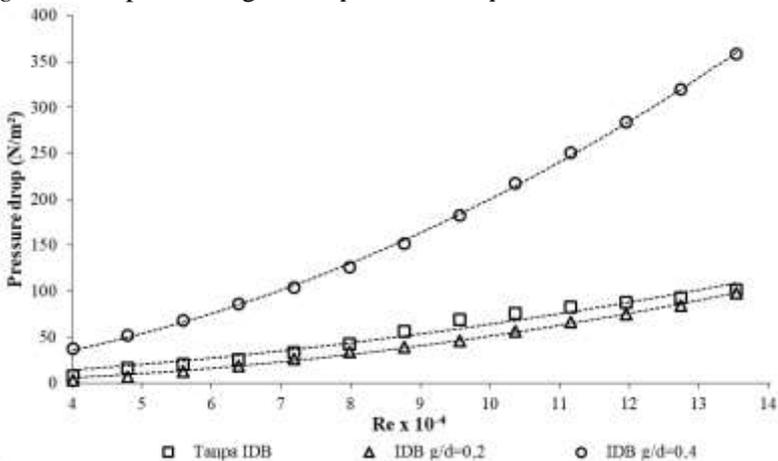


Gambar 2.20 Sketsa *test section* (pandangan atas)
(Rizkia,2017)

Spesifikasi dari *square duct* sebagai berikut:

- Bentuk penampang : Persegi
- Bahan : Akrilik
- Tebal : 8 mm
- L_m (panjang total *streamline*) : 2973,12 mm
- L_i (*upstream duct*) : 750 mm
- L_o (*downstream duct*) : 2125 mm
- R (*centerline elbow 90° radius*) : 187,5 mm
- D_h (diameter hidrolis) : 125 mm
- l (jarak *inlet disturbance body* dari *inlet elbow 90°*): 37,5 mm

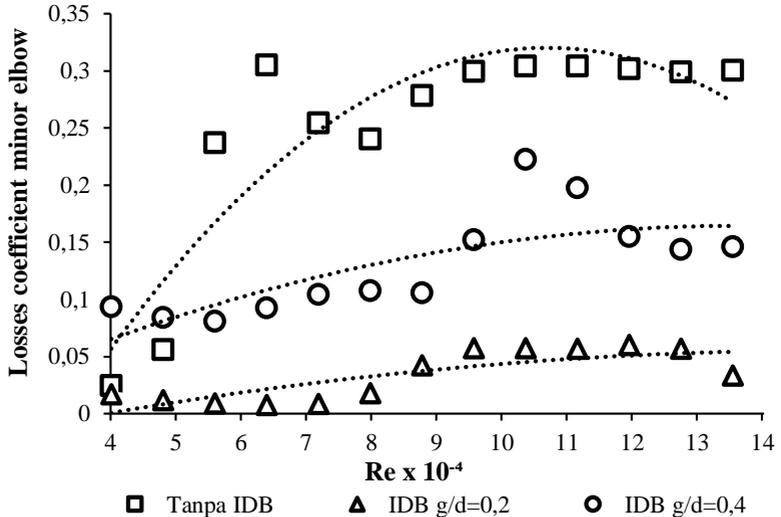
Hasil penelitian diperoleh bahwa penambahan IDB $g/d=0,2$ dapat menurunkan *pressure drop* sebesar 20,52%, sedangkan $g/d=0,4$ dapat meningkatkan *pressure drop*.



Gambar 2.21 *Pressure drop square duct* dengan variasi peletakkan *inlet disturbance body* dan Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$ (Rizkia,2017)

Pada **Gambar 2.21** dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan Δp seiring dengan meningkatnya Re_{Dh} . Peningkatan optimum Δp

pada $g/d=0,2$ dan peningkatan signifikan pada $g/d=0,4$ terhadap instalasi tanpa IDB. Pada $g/d=0,2$ terjadi peningkatan gap Δp paling besar terhadap instalasi tanpa IDB pada Re_{Dh} $8,74 \times 10^4$. Sedangkan pada $g/d=0,4$ terjadi kenaikan Δp signifikan mulai Re_{Dh} $7,95 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$. Dengan adanya *elbow 90°* pada instalasi menyebabkan terjadinya gesekan, separasi aliran, dan aliran sekunder menyebabkan bidang alir fluida akan berkurang. Separasi aliran terjadi aliran yang tidak mampu melawan *advers pressure* pada sisi *inner wall*, sedangkan aliran sekunder terjadi karena adanya perbedaan besar kelengkungan radius *inner* dan *outer elbow 90°*. Sedangkan untuk *Loss coefficient* terkecil pada variasi IDB $g/d=0,2$ dan terbesar pada variasi IDB $g/d=0,4$.



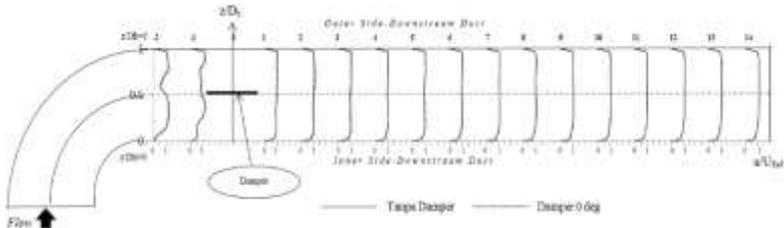
Gambar 2.22 *Loss coefficient elbow 90°* dengan variasi peletakkan *inlet disturbance body* dan Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $1,35 \times 10^5$ (Rizkia, 2017)

Pada **Gambar 2.22** dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan K seiring dengan meningkatnya Re_{Dh} . Penambahan IDB terbukti dapat menurunkan nilai K . Pada variasi tanpa IDB terjadi penurunan K mulai dari Re_{Dh} $6,36 \times 10^4$ sampai $7,95 \times 10^4$ dan

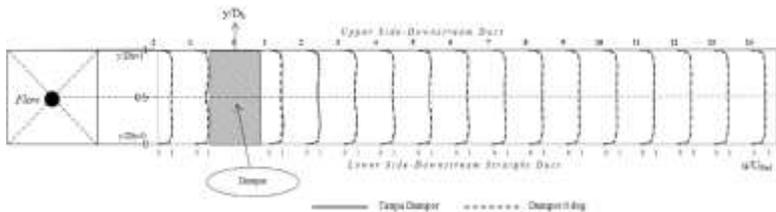
peningkatan signifikan mulai dari Re_{Dh} $4,77 \times 10^4$ sampai $6,36 \times 10^4$. Pada variasi $g/d=0,2$ terjadi penurunan K mulai dari Re_{Dh} $3,96 \times 10^4$ sampai $6,36 \times 10^4$ dan dari $1,27 \times 10^5$ sampai $1,35 \times 10^5$. Pada variasi $g/d=0,4$ terjadi penurunan K pada Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $5,56 \times 10^4$ dan $1,03 \times 10^5$ sampai $1,19 \times 10^5$. *Headloss minor elbow 90°* dipengaruhi oleh nilai Δp dan kecepatan aliran fluida. Peningkatan K disebabkan oleh nilai Δp yang besar dibandingkan kenaikan kecepatan aliran fluida. Sedangkan penurunan K disebabkan oleh nilai Δp yang konstan dibandingkan kenaikan kecepatan aliran fluida.

Farich Firmansyah (2016) melakukan penelitian berjudul *studi eksperimen aliran melalui square duct dan square elbow 90° dengan single guide vane pada variasi sudut bukaan damper*. Model saluran udara masuk melalui *honey comb* menuju *upstream duct* berpenampang bujursangkar (*square*) dengan $D_h=125\text{mm}$. Aliran udara dibelokkan oleh *elbow 90°* dengan $r/D_h=1,5$ dan dilengkapi *single guide vane* menuju *downstream duct*. Di dalam *downstream duct* terdapat *damper* dipasang pada $2D_h$ setelah *elbow*. Penelitian ini dilakukan dengan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , dan 30° . Variasi *Reynold's number* $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$ (kecepatan inlet 5 m/s sampai 12 m/s dengan interval 1 m/s) pada variasi sudut bukaan *damper* $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ dan 30° dengan tanpa *damper*. Hasil studi eksperimen yang diperoleh bahwa dengan penambah satu buah *guide vane* pada *square elbow 90°* mampu menghilangkan aliran balik (*backflow*) pada *inner outlet elbow 90°*. Pada saluran dengan sudut bukaan *damper 30°* memiliki nilai *pressure coefficient* (C_p) paling besar, kemudian diikuti saluran dengan bukaan $20^\circ, 10^\circ, 0^\circ$ secara berurutan dan saluran tanpa *damper* memiliki nilai *pressure coefficient* (C_p) paling kecil, sedangkan nilai *Koefisien losses elbow 90°* paling besar adalah saat sudut bukaan *damper 10°* pada *Reynold's number* $3,94 \times 10^4$ dan nilai *Koefisien losses elbow 90°* terendah adalah saat sudut bukaan *damper 0°* pada *Reynold's number* $9,46 \times 10^4$. Untuk mendapatkan profil kecepatan *upstream* dan *downstream duct* pada

posisi vertikal dan horizontal, pengujian dilakukan pada bilangan *Reynold's* (Re_{Dh}) $7,88 \times 10^4$.



Gambar 2.23 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream duct* tanpa damper dan sudut damper 0° (Farich,2016)



Gambar 2.24 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream duct* tanpa damper dan sudut damper 0° (Farich,2016)

Gambar 2.23 merupakan grafik profil kecepatan bidang horizontal sepanjang *downstream duct* dengan *damper* pada bukaan bukan 0° dan tanpa damper. Absis pada grafik profil kecepatan adalah z/D_h , dimana $z/D_h=0$ merupakan sisi *inner* dari *downstream duct* dan $z/D_h=1$ merupakan sisi *outer* dari *downstream duct*, sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{u}{U_{ref}}$ pada ordinat. Pada gambar terlihat, grafik profil kecepatan pada bidang horizontal tanpa *damper* dengan sudut bukaan *damper* 0° berhimpitan atau terlihat sama, hal ini menunjukkan tidak ada perubahan yang signifikan dengan adanya *damper* saat sudut bukaan 0° . Pada *section* -2 terlihat profil

kecepatan setelah melalui *elbow* 90° tidak ada aliran balik (*backflow*), hal ini menunjukkan dengan penambahan *single guide vane* dapat mengurangi separasi aliran pada daerah *inner wall*. Profil kecepatan tanpa *damper* dan dengan sudut *damper* 0° berangsur-angsur mengalami perkembangan dari section 1 hingga akhir dan pada section 9 hampir hampir mengalami *recovery* aliran hingga akhir.

Gambar 2.24 merupakan grafik profil kecepatan bidang vertikal sepanjang *downstream duct* dengan *damper* pada bukaan 0° dan tanpa *damper*. Absis pada grafik profil kecepatan adalah y/D_h , dimana $y/D_h=0$ merupakan sisi *lower* dari *downstream duct* dan $y/D_h=1$ merupakan sisi *upper* dari *downstream duct*, sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{u}{U_{ref}}$ pada ordinat. Secara keseluruhan grafik profil kecepatan pada bidang vertical dari section -2 hingga section 14 tanpa *damper* dengan sudut bukaan *damper* 0° terlihat sama dan berhimpitan. Perbedaan hanya pada section 1, dimana profil kecepatan dengan sudut bukaan *damper* 0° terlihat lebih rendah dibandingkan tanpa *damper*, hal ini dikarenakan tidak mempunya aliran untuk mengikuti kontur bodi *damper* sehingga terjadi separasi aliran setelah meninggalkan *damper* dan pada *section* tersebut terjadi sedikit keterlambatan aliran. Profil kecepatan pada bidang vertical tanpa *damper* maupun dengan sudut bukaan *damper* 0° juga hampir mengalami *recovery* aliran pada section 9 hingga akhir.

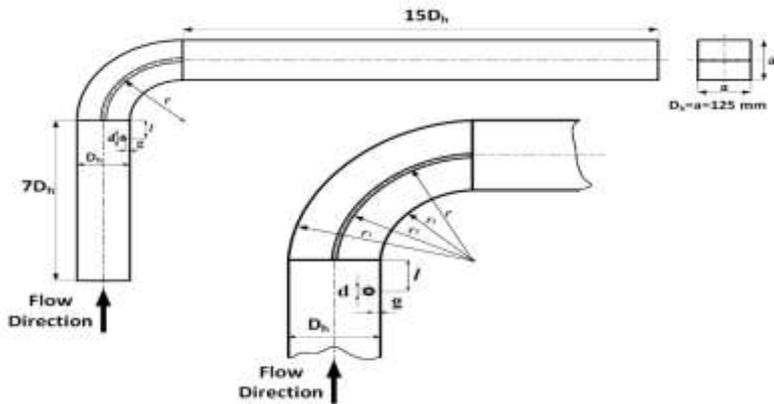
BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini dibahas metode penelitian yang digunakan, yaitu metode penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square ducting* dan *square elbow 90°* dengan menggunakan *Single Guide Vane* serta variasi peletakan *Cylinder Disturbance Body* pada jarak $0,5D_h$; $0,6D_h$; $0,7D_h$; $0,8D_h$ dan $0,9D_h$ pada sisi *inner upstream duct*.

Studi eksperimen ini menggunakan sebuah *Cylinder Disturbance Body* (CDB) dengan diameter hidrolis (D_h) 125 mm dengan rasio kelengkungan (R/D_h) pada *elbow 90°* sebesar 1,5. *Reynold's Number* yang digunakan untuk mendapatkan nilai *pressure drop* dan koefisien *loss minor elbow 90°* adalah $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan kecepatan tiap 2 m/s), untuk mendapatkan nilai *coefficient pressure* pada *elbow 90°* digunakan kecepatan 2 m/s, 12 m/s dan 20 m/s dengan *Reynold's Number* $1,59 \times 10^4$; $9,52 \times 10^4$ dan $1,59 \times 10^5$, sedangkan untuk mendapatkan profil kecepatan digunakan kecepatan 12 m/s dengan *Reynold's Number* $9,52 \times 10^4$.

3.1 Skema Penelitian

Penelitian ini menggunakan saluran yang berpenampang bujur sangkar (*square duct*). **Gambar 3.1** menunjukkan instalasi benda uji (*test section*) dan peralatan pendukung *square duct*, *square elbow 90°* dengan *Single Guide Vane* dengan gambar tampak pandangan dari atas. *Cylinder Disturbance Body* (CDB) diletakkan pada sisi *inner upstream duct* dengan variasi jarak peletakan CDB $0,5D_h$; $0,6D_h$; $0,7D_h$; $0,8D_h$ dan $0,9D_h$.



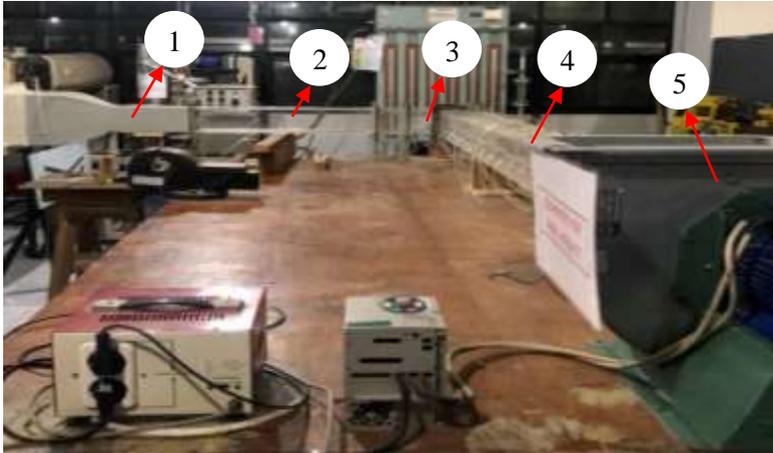
Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian dan peletakan *Cylinder Disturbance Body*

3.2 Peralatan Pendukung

Peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian, yaitu *square duct*, *honey comb*, *nozzle*, *inlet dicturbance body*, *centrifugal fan*, dan alat ukur.

3.2.1 *Square Duct*

Pada penelitian ini menggunakan *square duct* dengan jenis *open circuit*, udara yang masuk melalui *honey comb* akan dialirkan ke dalam instalasi *square duct* dan dikeluarkan melalui *centrifugal fan*. *Square duct* terdiri dari *upstream duct*, *elbow 90°*, dan *downstream duct*. Pada penelitian ini digunakan instalasi dengan skala model karena membuat instalasi dengan skala sebenarnya cukup sulit dan membutuhkan biaya yang lebih besar. Pembuatan *square duct* dan *elbow 90°* dengan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan agar mendapatkan hasil yang cukup memadai dan akurat. **Gambar 3.2** menunjukkan penampakan asli dari instalasi saluran udara beserta peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3.2 Model uji penelitian

- Keterangan :
1. *Nozzle*
 2. *Upstream Straight Duct*
 3. *Elbow 90° dengan Single Guide Vane*
 4. *Downstream Straight Duct*
 5. *Centrifugal Fan*

Spesifikasi *Square Ducting*:

- Bentuk Penampang : *Square duct & elbow 90°*
- Bahan : *Acrylic*
- Tebal Bahan : *8 mm*
- L_i (*upstream straight duct*) : *875 mm*
- L_o (*downstream straight duct*) : *1875 mm*
- L_m (*panjang total garis tengah*) : *2937,5 mm*
- l_i (*panjang total inner*) : *2875 mm*
- l_o (*panjang total outer 90°*) : *3000 mm*
- r (*centerline elbow 90° radius*) : *187,5 mm*
- r_i (*inner elbow 90° radius*) : *125 mm*
- r_o (*outer elbow 90° radius*) : *250 mm*
- D_h (*diameter hidrolis*) : *125 mm*

- l (jarak CDB dari inlet elbow 90°) : 62,5 mm; 75 mm; 87,5 mm; 100 mm; 112,5 mm
- g (gap CDB dari dinding inner upstream) : 2,5 mm

3.2.2 Honey Comb, Screen, dan Nozzle

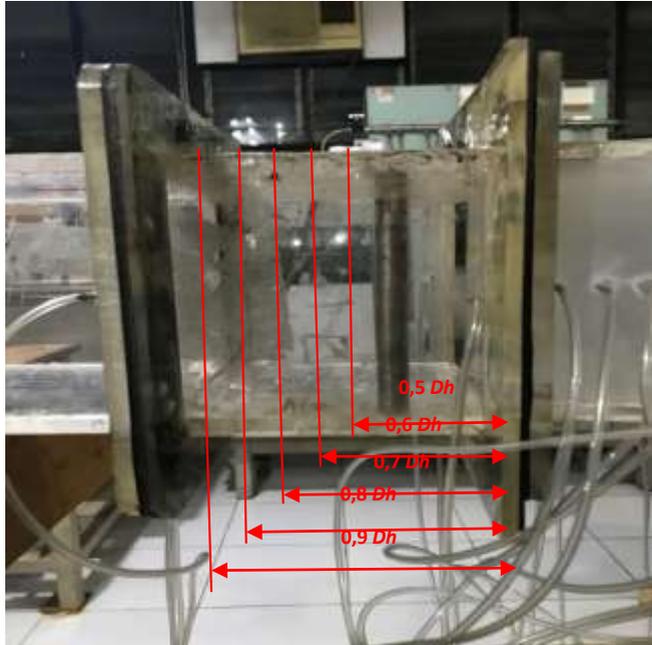
Pada rangkaian *nozzle* terdapat *screen* dan *honey comb*. Peletakkan rangkaian sebelum *inlet upstream duct*. *Nozzle* berfungsi sebagai penambah kecepatan aliran sebelum memasuki *upstream duct*. *Screen* dan *honey comb* berfungsi sebagai pembentuk profil aliran *uniform* dan pengurang turbulensi aliran ketika memasuki *upstream duct*. **Gambar 3.3** merupakan penampakan asli dari *Honey Comb*, *Screen* dan *Nozzle*.



Gambar 3.3 *Honey Comb*, *Screen*, *Nozzle*

3.2.3 Cylinder Disturbance Body (CDB)

Cylinder disturbance body merupakan bodi pengganggu yang diletakkan didalam *inner upstream duct* dengan jarak (l) $0,5D_h$, $0,6D_h$, $0,7D_h$, $0,8D_h$ dan $0,9D_h$ dan gap 2,5 mm. **Gambar 3.4** menunjukkan pemasangan *cylinder disturbance body* pada variasi jarak (l) $0,5D_h$, $0,6D_h$, $0,7D_h$, $0,8D_h$ dan $0,9D_h$ dan gap 2,5 mm didalam *inner upstream duct*. *Cylinder disturbance body* memiliki diameter sebesar 6 mm dan tinggi sebesar 125 mm.



Gambar 3.4 Lokasi pemasangan *Cylinder Disturbance Body*

3.2.4 *Elbow 90° dengan Single Guide Vane*

Pada eksperimen ini terdapat *Elbow 90°* berpenampang bujursangkar yang di dalamnya terdapat *Single Guide Vane*. *Elbow 90°* untuk membelokkan aliran setelah melewati *upstream duct*. *Elbow 90°* memiliki *inner radius* 125 mm dan *outer radius* 250 mm, sedangkan *single guide vane* memiliki radius 187,5 mm.



Gambar 3.5 Elbow 90° dengan Single Guide Vane

3.2.5 Centrifugal Fan dan Inverter

Centrifugal fan digunakan untuk mengalirkan udara pada saluran udara. Alat ini dipilih karena bisa mengalirkan udara dengan kecepatan yang rendah. **Gambar 3.5** merupakan penampakan asli *Centrifugal fan* dan *Inverter*. *Inverter* berfungsi untuk mengubah kecepatan yang disesuaikan dari kapasitas frekuensi *inverter* itu sendiri. Spesifikasi dari *centrifugal fan* sebagai berikut:



(a)



(b)

Gambar 3.6 (a) *Centrifugal Fan* (b) *Inverter*

- Merk : *Vanco Direct Centrifugal Fan Single Phase*
- *Type* : VCD/4-225
- Voltage : 220 / 380 Volt
- Frekuensi : 50 Hz
- Daya : 0,75 kW
- Putaran : 1440 rpm
- *Max.Air Volume* : 2550 m³/h
- Sound Power : 86 dB

3.2.6 Alat Ukur

Pada penelitian ini dibutuhkan alat ukur untuk mendapatkan tekanan statis dan tekanan stagnasi, diantaranya adalah *pitot static tube*, *wall-pressure tap*, *transducer* dan *manometer inclined*.

3.2.6.1 Pitot Tube

Alat ini berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis sekaligus tekanan stagnasi aliran fluida yang terdapat pada saluran maupun yang terletak dibelakang benda uji. Pergeseran titik pengukuran secara *horizontal* pada setiap *cross section* yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran tertentu.

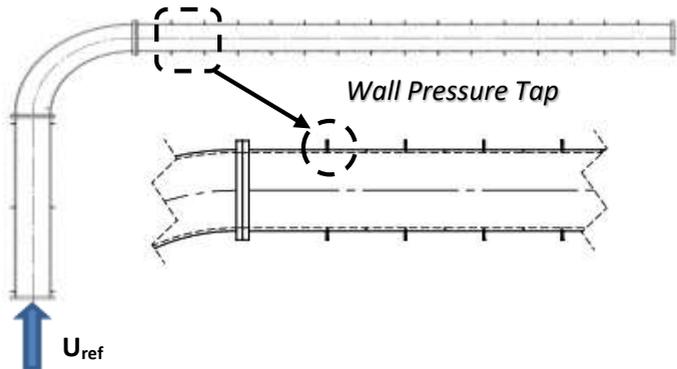


Gambar 3.7 *Pitot Tube*

3.2.6.2 Wall Pressure Tap

Wall-pressure tap yaitu lubang–lubang kecil berdiameter 1 mm yang terhubung pada manometer atau *transducer* tekanan serta dipasang sepanjang kontur

permukaan benda uji maupun saluran yang searah aliran dan tegak lurus terhadap permukaan.



Gambar 3.8 Skema Pemasangan *Wall Pressure Tap*

3.2.6.3 Transducer Tekanan dan Data Aquisisi

Berikut spesifikasi *Transducer* yang akan digunakan dalam percobaan ini :

1. Untuk mengukur profil kecepatan, *coeffisien of pressure*, validasi tekanan dinamis :
Model : PX653 - 01D5V
Range : $\pm 1''$ WC
Akurasi : 0,25 % FS (*Fullscale*)
Output : 1 – 5 VDC
Excitation : 12 – 36 VDC
Ser.no. : X14500102
2. Untuk mengukur *pressure drop*, *coeffisien losses elbow*, validasi tekanan statis :
Model : PX653 - 03D5V
Range : $\pm 3''$ WC
Akurasi : 0.25 % FS (*Fullscale*)
Output : 1 – 5 VDC
Excitation : 12 – 36 VDC
Ser.no. : X11450113



(a)

(b)

Gambar 3.9 (a) DAQ PRO 5300 (b) *Pressure Transducer*

3.2.6.4 *Inclined Manometer (Manometer V) dan Mistar*

Manometer digunakan sebagai pembaca tekanan yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube*. *Manometer* yang digunakan mempunyai kemiringan sebesar 15° yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan Δh . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.10 *Inclined Manometer*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

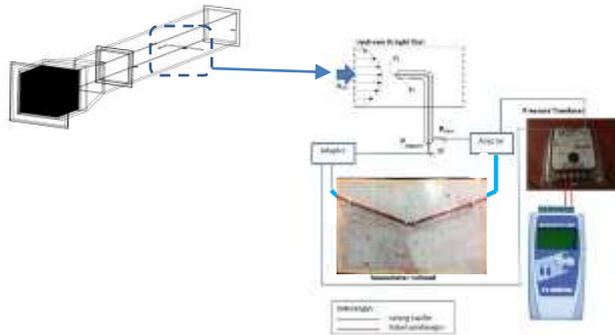
- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Red Oil* ($SG_{\text{redoil}} = 0,827$)
- Kemiringan : 15°

3.3 Langkah-Langkah Validasi

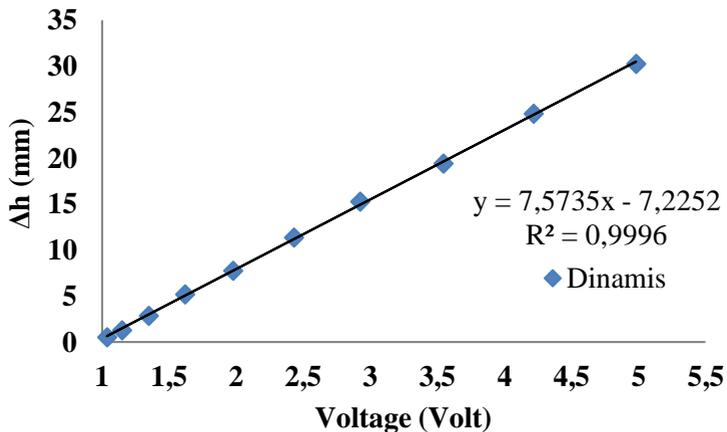
Validasi dilakukan pada pengambilan data tekanan statis dan dinamis. Peralatan yang digunakan, yaitu *inclined manometer*, *pressure transducer* 1" WC (untuk mengukur *velocity profile*), *pressure transducer* 3" WC (untuk mengukur *pressure drop*), data akuisisi DAQ PRO 5300, dan *pitot static tube*. Langkah-langkah validasi yang dilakukan sebelum pengambilan data pada penelitian sebagai berikut:

3.3.1 Validasi Tekanan Dinamis

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *cylinder disturbance body*.
2. *Pitot static tube* dipasang pada dinding saluran udara yang tersambung pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan *interval* 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer* 1" WC untuk tekanan dinamik.
5. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data akuisisi didapatkan *Voltage* (Volt).
6. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage* (Volt) sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



Gambar 3.11 Skema validasi tekanan dinamis dengan *pressure transducer 1" WC*

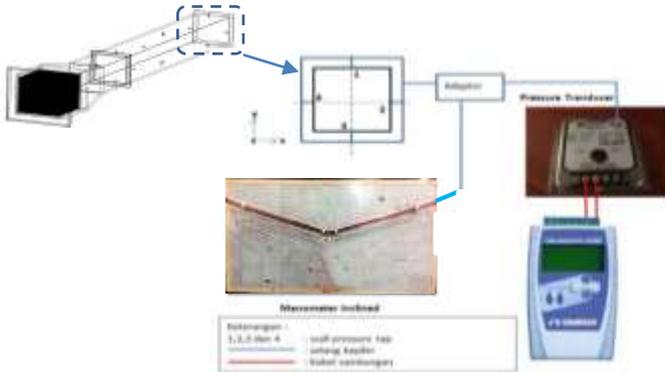


Gambar 3.12 Contoh hasil validasi tekanan dinamis dengan *pressure transducer 1" WC*

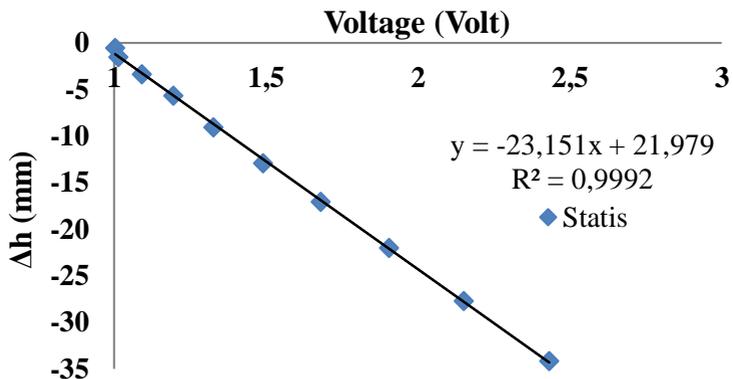
3.3.2 Validasi Tekanan Statis

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *cylinder disturbance body*.
2. *Wall pressure tap* pada *inlet upstream* dihubungkan pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.

4. Diambil data *manometer* dan *pressure transduser 3" WC* untuk tekanan statis dinding.
5. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data akuisisi didapatkan *Voltage (Volt)*.
6. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



Gambar 3.13 Skema validasi tekanan statis dengan *pressure transduser 3" WC*



Gambar 3.14 Contoh hasil validasi tekanan statis dengan *pressure transduser 3" WC*

3.4 Analisa Dimensi Parameter - Parameter yang Dianalisa

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu eksperimen. Hubungan antara parameter yang saling mempengaruhi ditunjukkan dalam bentuk parameter-parameter tanpa dimensi. Metode analisa ini dikenal dengan *Buckingham Pi Theorem*. Konfigurasi dari parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran sepanjang *downstream straight duct*.

Δp : Perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m^2)

ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)

μ : Viskositas absolut fluida ($kg/m.s$)

U_{ref} : Kecepatan *freestream* di *inlet upstream straight duct* (m/s)

u : Kecepatan local (m/s)

D_h : Diameter hidrolik saluran (m)

l : Jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow* 90°

d : Diameter *circular disturbance body* (m)

R : *Centerline elbow* 90° *single guide vane radius* (m)

g : *Gap cylinder disturbance* dari dinding *inner* (m)

x : Aliran searah sumbu koordinat x

y : Aliran searah sumbu koordinat y

z : Aliran searah sumbu koordinat z

3.4.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk *Pressure Drop* pada *Square Ducting*

Pressure drop pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga perbedaan tekanan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z) \quad (3.1)$$

dimana Δp adalah perbedaan tekanan (N/m^2)

Menggunakan *Buckingham Pi-theorema* dengan parameter ρ , U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak berdimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2}$: koefisien tekanan
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynold's*
3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90° single guide vane* dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap cylinder disturbance* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut:

$$\bullet \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.2)$$

$$\bullet \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah

$\frac{d}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}$ sehingga,

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{l}{D_h}\right) \quad (3.4)$$

dan untuk *pressure drop* tak berdimensi ($\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2}$) pada *square ducting* adalah sebagai berikut:

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{l}{D_h} \right) = f_2 \left(Re_{D_h}, \frac{l}{D_h} \right) \quad (3.5)$$

3.4.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada *Square Ducting*

Velocity profile pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga kecepatan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z) \quad (3.6)$$

dimana u adalah kecepatan lokal (m/s)

Menggunakan *Buckingham Pi-theorema* dengan parameter ρ, U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak berdimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{u}{U_{ref}}$: kecepatan tak berdimensi
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynold's*
3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap cylinder disturbance* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik

7. $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut:

$$\bullet \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.7)$$

$$\bullet \frac{u}{U_{ref}} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.8)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah $\frac{d}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}$ sehingga,

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.9)$$

dan untuk kecepatan tak berdimensi $\left(\frac{u}{U_{ref}}\right)$ pada *square ducting* adalah sebagai berikut:

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_3\left(Re_{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.10)$$

Untuk menghitung profil kecepatan dengan menggunakan *Reynold's Number* konstan yaitu $9,52 \times 10^4$.

3.5 Prosedur Pengambilan Data

3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif

Parameter yang diukur pada penelitian ini meliputi tekanan stagnasi dan tekanan statis. Sebelum melakukan pengambilan data maka perlu dilakukan pengukuran suhu ruangan terlebih dahulu. Masing-masing pengukuran memiliki prosedur pengambilan data yang berbeda dan akan dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Prosedur pengukuran tekanan dinamis

Prosedur pengukuran tekanan dinamis adalah sebagai berikut:

- a) *Test section* dipersiapkan.
 - b) *Pitot tube* dipasang pada posisi yang ingin diukur.
 - c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan menggunakan selang kapiler. *pressure transducer* 1" WC
 - d) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - e) *Voltage* dari *pressure transducer* pada tekanan stagnasi pada dicatat.
 - f) *Blower* dimatikan
 - g) Langkah d sampai f diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.
- 2) Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:
- a) *Test section* dipersiapkan.
 - b) *Wall pressure tap* dihubungkan ke *pressure transducer* 3" WC dengan selang kapiler.
 - c) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - d) Data *voltage* dari *pressure transducer* dicatat.
 - e) Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* pada titik *section* selanjutnya.
 - f) Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi $15D_h$ dari *inlet downstream straight duct*.

3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif

Pengolahan data dilakukan dengan membuat sebuah contoh perhitungan. Beberapa data awal yang diperlukan untuk melakukan proses perhitungan adalah:

- Diameter hidrolik (D_h) : 125 mm
- Panjang *downstream straight duct* : 1875 mm
- Panjang *inlet upstream* sampai *downstream*:
 - *Inner wall* (l_i) : 2875 mm
 - *Outer wall* (l_o) : 3000 mm
- Sudut *inclined manometer* (θ) : 15°
- *Specific Gravity red oil* (SG_{redoil}) : 0,827
- Percepatan Gravitasi (g) : 9,81 m/s²
- Temperatur ruangan konstan (T): 26,6 °C
- Massa jenis udara pada $T = 26,6$ °C (ρ_{ud}): 1,1698 kg/m³
- Viskositas dinamis udara (μ) : 1,84 x 10⁻⁵ m²/s
- Massa jenis air pada $T = 28$ °C (ρ_{H_2O}) : 996 kg/m³

1) Perhitungan untuk *Reynold's Number*

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynold's* yang didapat melalui persamaan 3.11 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada *Reynold's Number* 1,59 x 10⁴

$$Re_{Dh} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.11)$$

dimana: ρ_{ud} : massa jenis udara pada 26,6°C (kg/m³)

ν : viskositas kinematis udara pada (m²/s)

μ : viskositas absolut udara pada

U_{ref} : kecepatan freestream pada *inlet upstream straight duct* (m/s)

D_h : diameter hidrolik *ducting* (m)

Re_{Dh} : *Reynold's number*

Fan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *centrifugal fan*. Untuk mendapatkan kecepatan awal (U_{ref}) sebesar 2 m/s dilakukan pengaturan frekuensi pada inverter secara manual. Dengan kalibrasi validasi tekanan dinamik pada saluran *upstream straight duct* melalui *inclined manometer* untuk pengukuran nilai Δh . Nilai Δh diukur dari frekuensi 0 Hz sampai 50 Hz. Pengukuran kecepatan aliran masuk menggunakan persamaan 3.13 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 &= SG_{redoil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta y \cdot \sin 15^\circ \\ U_{ref}^2 &= \frac{4 \cdot SG_{redoil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta y \cdot \sin 15^\circ}{\rho_{udara}} \\ U_{ref} &= \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{redoil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta y \cdot \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

- dimana :
- $P_{dinamis}$: ($P_{stagnasi} - P_{statis}$) tekanan dinamis diukur dengan *pitot tube* (N/m^2)
 - P_{redoil} : massa jenis *red oil* (kg/m^3)
 - ρ_{udara} : massa jenis udara pada $26,6^\circ C$ (kg/m^3)
 - g : percepatan gravitasi (m/s^2)
 - Δh : perbedaan fluida pada manometer (m)
 - U_{ref} : kecepatan freestream pada *inlet upstream* (m/s)
 - SG_{redoil} : *Specific Gravity red oil*
 - ρ_{H_2O} : massa jenis air (kg/m^3)

2) Perhitungan kecepatan lokal

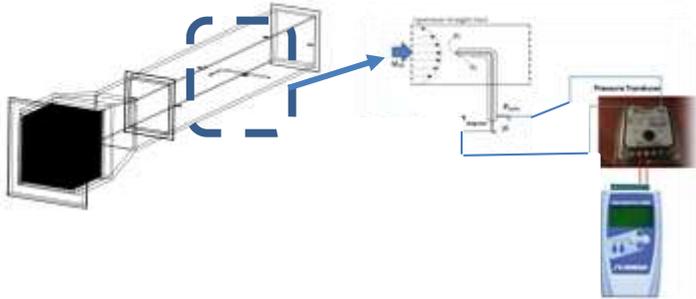
Profil kecepatan diukur pada 15 test section sepanjang *downstream straight duct* dengan variasi jarak *Cylinder Disturbance Body* pada $l = 0,5Dh; 0,6Dh; 0,7Dh; 0,8Dh$ dan $0,9Dh$ di sisi *inner upstream duct*. Perhitungan profil kecepatan pada lokasi *section x/Dh* setelah outlet *elbow* 90° : 2; 4; 6; 10 dan 14 sepanjang *downstream straight duct* ditulis sesuai persamaan 3.14 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{udara}}}$$

dimana:

- p_o : tekanan stagnasi yang diukur dengan *stagnation pressure tube* (Pa)

- p_s : tekanan statis sejajar dengan *stagnation pressure tube* (Pa)
 ρ_{udara} : massa jenis udara pada $T = 26,6^\circ C$
 $p_o - p_s$: tekanan dinamis (Pa)



Gambar 3.15 Langkah pengambilan *air velocity profile*

3) Perhitungan *Pressure Drop* (Δp)

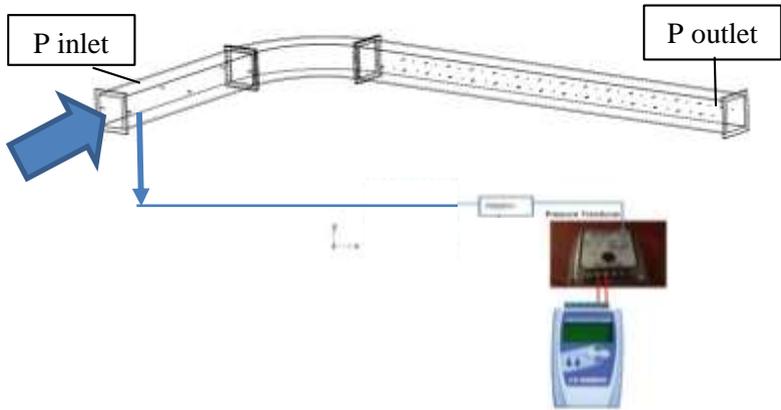
Pressure drop adalah selisih tekanan *inlet* pada *upstream straight duct* dan tekanan *outlet* pada *downstream straight duct*. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir sama. Perhitungan $P_{upstream}$ dan $P_{downstream}$ adalah sebagai berikut :

$$\Delta p = P_{upstream} - P_{downstream}$$

$$\Delta p = (\rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h_{upstream}) - (\rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h_{downstream})$$

$$\Delta p = (SG_{redoil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{upstream}) - (SG_{redoil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{downstream})$$

- dimana:
- Δp : *Pressure Drop* (N/m^2)
 - $P_{upstream}$: Tekanan *inlet* pada *upstream straight duct* (N/m^2)
 - $P_{downstream}$: Tekanan *outlet* pada *downstream straight duct* (N/m^2)



Gambar 3.16 Langkah pengambilan data *pressure drop*

4) Perhitungan *Koefisien Losses elbow 90°* ($K_{elbow\ 90^\circ}$)

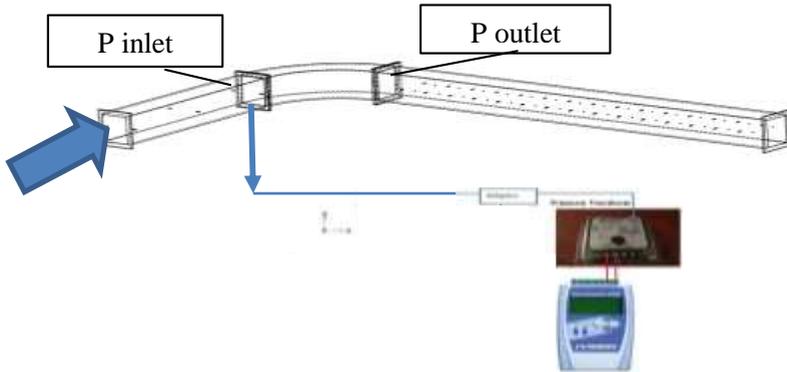
Eksperimen ini menggunakan *square duct & square elbow 90°* dengan dipasang sebuah *cylinder disturbance body* pada variasi jarak pada sisi *inner upstream duct*. Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan *koefisien losses* pada saluran. *Koefisien losses elbow 90°* adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah *elbow 90°* pada sebuah saluran udara. Pada eksperimen ini, *koefisien losses elbow 90°* dengan *single guide vane* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°*.

$$P_{inlet\ elbow} - P_{outlet\ elbow} = K_{elbow} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.16)$$

$$K_{elbow\ 90^\circ} = \frac{(P_{inlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{outlet\ elbow\ 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.17)$$

Koefisien losses elbow 90° dengan *single guide vane* pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynold's Number* $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan kecepatan 2 m/s) dengan

variasi jarak *Cylinder Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct*.



Gambar 3.17 Langkah pengambilan data koefisien *losses elbow* 90°

5) Perhitungan *Pressure Coefficient* (C_p)

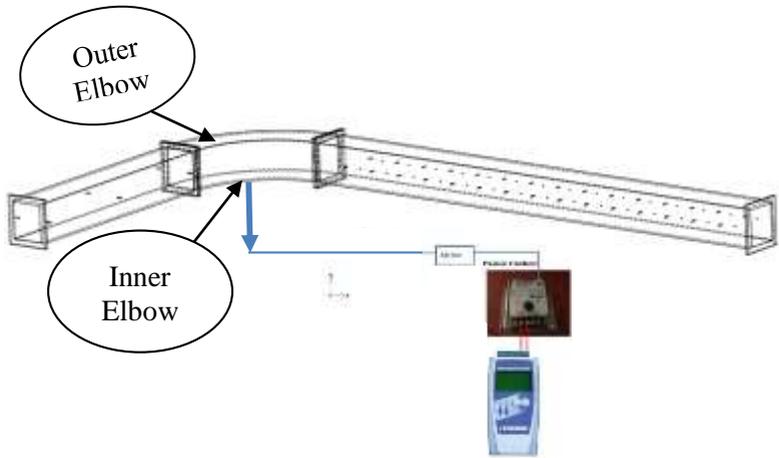
Pada eksperimen ini, perhitungan *pressure coefficient* dilakukan pada *elbow* 90° untuk mengetahui *pressure drop* pada *elbow* 90°, perhitungan C_p dilakukan pada sisi *inner* dan *outer* pada *elbow* 90° tersebut.

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3.18)$$

$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3.19)$$

dimana :

C_p	:	<i>Pressure Coefficient</i>
P_c	:	Tekanan lokal (N/m^2)
P_∞	:	Tekanan <i>freestream</i> (N/m^2)
ρ	:	Massa jenis udara (kg/m^3)
v	:	Kecepatan udara (m/s)



Gambar 3.18 Langkah pengambilan data *pressure coefficient* 90°

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Hasil studi ditampilkan dan dibahas dalam beberapa sub-bab. Secara garis besar pembahasan hasil analisa *pressure drop* dan koefisien *losses elbow 90°* pada *square duct* dengan *elbow 90°* dengan *single guide vane* menggunakan variasi *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4 < Re_{Dh} < 1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s, kenaikan kecepatan tiap 2 m/s) dengan variasi tanpa dan dengan *cylinder disturbance body* berbentuk silinder. Kemudian *pressure coefficient* sisi *inner* dan *outer elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4, 9,52 \times 10^4, 1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s, 12 m/s, 20 m/s) dengan variasi tanpa dan dengan *cylinder disturbance body*. Kemudian profil kecepatan pada penampang horizontal dan vertikal dengan variasi tanpa dan dengan *cylinder disturbance body* pada kecepatan 12 m/s dengan perhitungan profil kecepatan pada lokasi *section x/D_h* setelah outlet *elbow 90°*: 2; 4; 6; 10 dan 14 sepanjang *downstream straight duct*. Jarak peletakkan *cylinder disturbance body* sebelum *inlet elbow 90°* pada sisi *inner upstream duct* mulai dari $l = 0,5D_h; 0,6D_h; 0,7D_h; 0,8D_h$ dan $0,9D_h$ untuk semua pengambilan data.

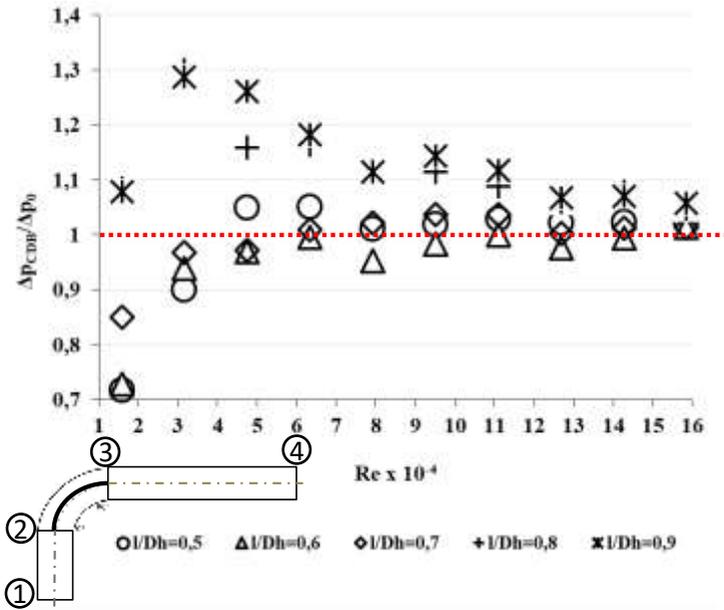
4.1 Pressure drop pada Square Duct dengan Reynolds Number $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$

Hasil eksperimen berupa grafik pengaruh *Cylinder Disturbance Body* (CDB) dan *Reynolds Number* (Re_{Dh}) terhadap *pressure drop* (Δp) sepanjang *square duct* dengan *elbow 90°*. *Square duct* divariasikan tanpa dan dengan CDB, *gap* CDB sebesar 2,5 mm dan variasi jarak $l = 0,5D_h; 0,6D_h; 0,7D_h; 0,8D_h$ dan $0,9D_h$ pada sisi *inner upstream duct* dengan rasio kelengkungan (R/D_h) tetap sebesar 1,5. Sedangkan variasi Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ atau pada kecepatan udara sebesar 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan kecepatan setiap

2 m/s. Perhitungan Δp menggunakan tekanan pada *inlet upstream duct* (1) dan *outlet downstream duct* (4). Hasil yang ditampilkan yaitu *ratio pressure drop* perbandingan antara variasi peletakan *disturbance body* (Δp_{CDB}) dan tanpa *disturbance body* (Δp_0) sebagai acuan data Δp , variasi yang ditampilkan adalah $l = 0,6D_h$ sebagai data paling efektif menurunkan *pressure drop* dari pemasangan CDB dan $l = 0,9D_h$ sebagai data peningkatan Δp terbesar. Untuk mendapatkan nilai *pressure drop* dapat dirumuskan dari persamaan energi sebagai berikut:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_4}{\rho} + \frac{\bar{V}_4^2}{2} + gz_4 + h_{ITotal} \quad (4.1)$$

Pada **gambar 4.1** menjelaskan nilai *ratio* perbandingan *pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) dengan acuan nilai *ratio* 1 sebagai pembatas nilai suatu *pressure drop* tersebut berkurang ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0 < 1$) atau meningkat ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0 > 1$). Nilai $\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$ dapat kita lihat bahwa dipengaruhi oleh nilai *Reynold's Number* dimana nilai $\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$ akan naik pada suatu nilai *Reynold's Number* tertentu, akan tetapi kenaikannya tidak menentu hal ini disebabkan pengaruh dari *ratio* perbandingan *pressure drop* yang merupakan hasil perbandingan nilai *pressure drop* dengan variasi *circular disturbance body* (Δp_{CDB}) dibagi dengan nilai *pressure drop* tanpa *disturbance body* (Δp_0). Secara garis besar nilai *pressure drop* akan naik seiring bertambahnya nilai *Reynold's Number*. Peningkatan *pressure drop* ini disebabkan oleh peningkatan kecepatan udara yang berbanding lurus dengan peningkatan *Reynold's Number*.



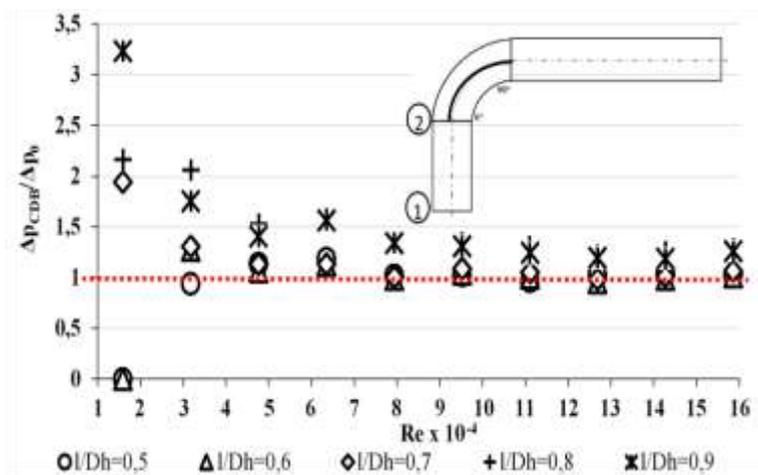
Gambar 4.1 Grafik *ratio pressure drop overall* pada *square duct* dengan variasi jarak peletakan *cylinder disturbance body* terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$

Dari **gambar 4.1** menampilkan grafik *ratio perbandingan pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) terhadap Re_{Dh} sepanjang *square duct* (titik 1 – 4), dapat dilihat bahwa dari grafik diatas *ratio perbandingan pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) dengan variasi $l/D_h=0,6$ memiliki nilai *ratio* $\Delta p_{CDB}/\Delta p_0 < 1$ pada rentan nilai Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,43 \times 10^5$ dan pada Re_{Dh} $1,59 \times 10^5$ mengalami kenaikan nilai *ratio* $\Delta p_{CDB}/\Delta p_0 > 1$. Sementara untuk grafik *ratio perbandingan pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) dengan variasi $l/D_h=0,9$ memiliki nilai *ratio* $\Delta p_{CDB}/\Delta p_0 > 1$ pada setiap nilai Re_{Dh} dari $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$. Dapat dikatakan bahwa variasi yang efektif menurunkan *pressure drop* adalah variasi $l/D_h=0,6$ karena mampu menurunkan *pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0 < 1$) hampir pada setiap nilai Re_{Dh} , sedangkan untuk variasi $l/D_h=0,9$ cenderung meningkatkan nilai *pressure drop*

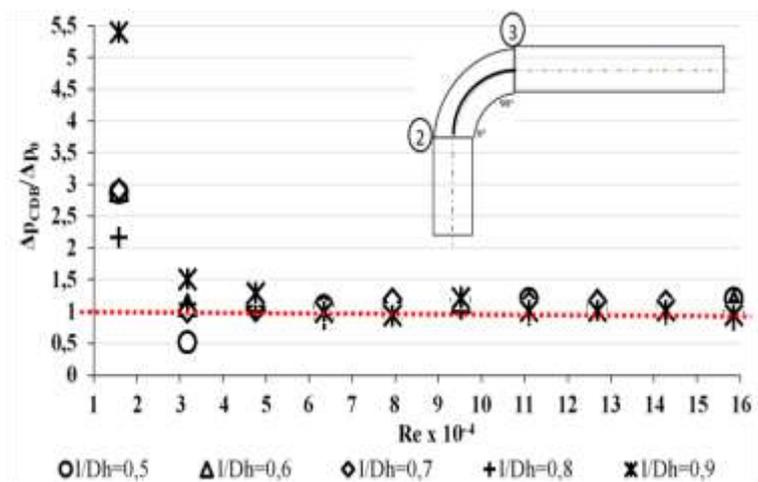
($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0 > 1$) pada setiap nilai Re_{Dh} . Dari kedua variasi yang ditampilkan, yang memiliki nilai rata-rata *ratio* perbandingan *pressure drop* (DB/D0) terhadap Re_{Dh} terendah adalah CDB ($l=0,6D_h$) sebesar 0,955, kemudian nilai rata-rata *ratio* perbandingan *pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) terhadap Re_{Dh} tertinggi adalah CDB ($l=0,9D_h$) sebesar 1,138.

Penambahan *elbow* 90° dengan *single guide vane* pada *square duct* menyebabkan terjadinya gesekan, separasi aliran, dan aliran sekunder yang mengakibatkan *effective flow area* berkurang. Separasi aliran terjadi karena aliran tidak mampu melawan *advers pressure* pada sisi *inner wall*, sedangkan aliran sekunder terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner* dan *outer elbow* 90°.

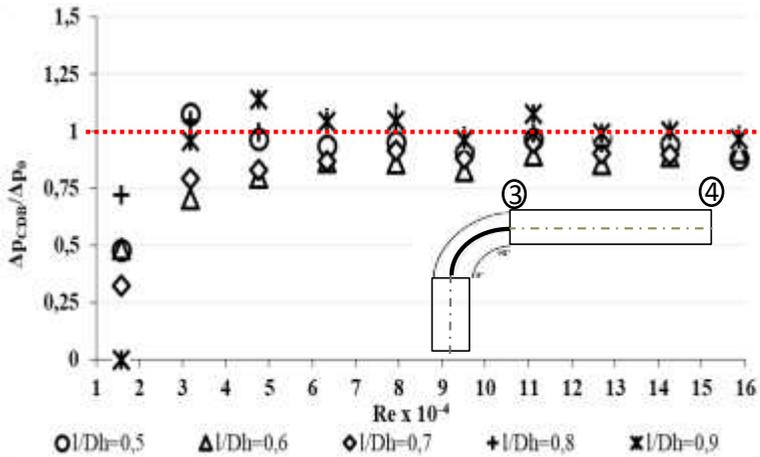
Dengan penambahan *cylinder disturbance body* sebelum memasuki *elbow* 90° maka akan terbentuk *shear layer* (aliran yang terseparasi) dari CDB yang memiliki intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow* 90°. Sedangkan untuk penambahan *single guide vane* sendiri dalam *elbow* 90° adalah untuk menambah *effective flow area* di dalam *elbow* 90°. Dari **gambar 4.1** menunjukkan bahwa *ratio* perbedaan *pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) saluran mengalami penurunan paling efektif pada penambahan CDB ($l=0,6D_h$) secara rata-rata mampu menurunkan *pressure drop* sebesar 0,9%, hal ini menunjukkan bahwa momentum aliran lebih besar sehingga mampu melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow* 90° dan separasi aliran pada sisi *inner elbow* 90° juga mengalami penundaan. Sementara pada penambahan CDB ($l=0,9D_h$) *pressure drop* saluran justru mengalami penambahan rata-rata sebesar 9,5% dari saluran tanpa CDB. Dapat disimpulkan bahwa peletakan *disturbance body* yang paling efektif menurunkan *pressure drop* adalah yang mendekati dengan *inlet elbow* 90°.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.2 Grafik *ratio pressure drop per section* pada *square duct* (a) *Upstream* (titik 1 – 2); (b) *Elbow 90°* (titik 2 – 3); (c) *Downstream* (titik 3 – 4); dengan variasi jarak peletakan *cylinder disturbance body* terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$

Dari **gambar 4.2** dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds Number* maka akan semakin meningkat pula *pressure drop* yang terjadi pada masing-masing *section* dan jarak peletakan *circular disturbance body*. Sehingga dapat dikatakan jika kecepatan dari suatu fluida meningkat, maka *pressure drop* akan meningkat pula. Hal ini dapat disebabkan oleh *headloss* yang semakin besar, sesuai dengan perumusan sebagai berikut :

$$\frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{inlet}^2}{2} + gz_{inlet} = \frac{P_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{outlet}^2}{2} + gz_{outlet} + h_{lTotal} \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{lT} = h_l + h_{lm} \quad (4.3)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\bar{v}^2}{2} \times \left(f \frac{L_{upstream}}{D_h} + f \frac{L_{downstream}}{D_h} + k_{elbow 90^\circ} \right) \quad (4.4)$$

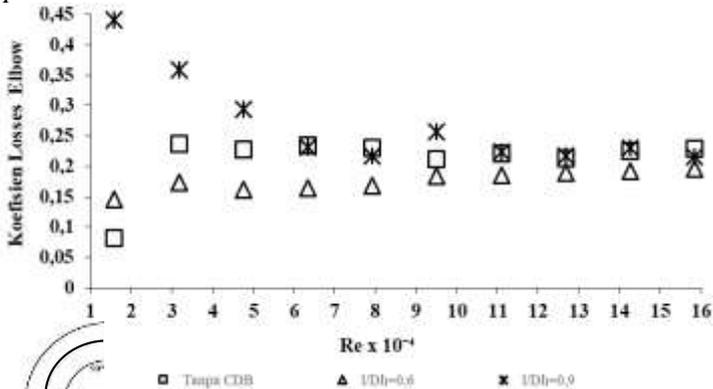
Pada **gambar 4.2** (a) ditampilkan grafik *pressure drop* pada *upstream* (titik 1 – 2), (b) *elbow 90°* (titik 2 – 3), dan (c)

downstream (titik 3 – 4) terhadap Re_{Dh} . Dapat diperhatikan bahwa pada *upstream* (titik 1 – 2) grafik *pressure drop* dengan penambahan CDB ($l=0,9D_h$) lebih besar dibanding tanpa CDB dan penambahan CDB ($l=0,6D_h$) dapat dilihat dari grafik terlihat berhimpit dengan tanpa CDB akan tetapi terdapat kenaikan *pressure drop* pada rentan Re_{Dh} tertentu, hal ini menunjukkan secara garis besar bahwa dengan penambahan CDB maka *pressure drop* pada *upstream* akan meningkat. Kemudian pada *elbow* 90° (titik 2 – 3) grafik *pressure drop* menunjukkan nilai *pressure drop* dengan penambahan CDB ($l=0,6D_h$) memiliki nilai *pressure drop* yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa CDB hal ini disebabkan karena nilai *pressure drop* di *upstream* untuk $l/D_h=0,6$ hampir berhimpit, berbeda dengan penambahan CDB ($l/D_h=0,9$) dapat dilihat nilai *pressure drop*nya turun dan grafiknya berhimpit dengan tanpa CDB, dapat dianalisa karena pengaruh *single guide vane*. Pada *downstream* (titik 3 – 4) grafik *pressure drop* dengan penambahan CDB ($l=0,9D_h$) hampir berhimpitan dengan grafik tanpa CDB, setelah itu menurun dan lebih rendah dari tanpa CDB. Sedangkan penambahan CDB ($l/D_h=0,6$) terbukti mampu menurunkan *pressure drop* pada *downstream* dibanding tanpa CDB, hal ini akan memperkuat hipotesa bahwa *pressure drop* akan turun pada *downstream* secara keseluruhan yang disebabkan oleh penambahan CDB di sisi *upstream* dan adanya *single guide vane* di *elbow* 90° .

4.2 Koefisien Losses Elbow 90° pada Square Duct dengan Reynold's Number $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$

Hasil eksperimen berupa grafik pengaruh *cylinder disturbance body* (CDB) dan *Reynold's Number* (Re_{Dh}) terhadap Koefisien Losses (K) *elbow* 90° . *Elbow* 90° divariasikan tanpa dan dengan CDB sebelum memasuki *elbow* 90° , *gap* CDB sebesar 2,5 mm dan variasi jarak $l = 0,5D_h$ sampai $0,9D_h$ dari *inlet elbow* 90° di sisi *inner upstream duct* dengan rasio kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) sebesar 1,5. Sedangkan variasi Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ atau pada kecepatan

udara sebesar 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan kecepatan tiap 2 m/s. Perhitungan didapatkan dari data perbedaan tekanan pada *pressure tap inlet elbow 90°* di *upstream duct* dan *pressure tap outlet elbow 90°* di *downstream duct*.



Gambar 4.3 Grafik koefisien *losses* (K) *elbow 90°* dengan variasi jarak peletakan *cylinder disturbance body* terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,5 \times 10^5$

Pada **gambar 4.3** ditampilkan grafik koefisien *losses* (K) *elbow 90°* terhadap Re_{Dh} . Dapat diperhatikan bahwa dengan penambahan CDB maka akan menurunkan nilai koefisien *losses* (K) pada *elbow 90°*. Pertama adalah *elbow 90°* tanpa CDB, pada Re_{Dh} terendah nilai koefisien *losses* (K) *elbow 90°* adalah 0,08 dan pada Re_{Dh} tertinggi nilai koefisien *losses* (K) *elbow 90°* sebesar 0,24 dengan rata-rata nilai koefisien *losses* (K) *elbow 90°* mulai dari Re_{Dh} terendah sampai tertinggi adalah 0,21. Kedua adalah *elbow 90°* dengan penambahan CDB ($l = 0,6D_h$), pada Re_{Dh} terendah nilai koefisien *losses* (K) *elbow 90°* adalah 0,14 dan pada Re_{Dh} tertinggi nilai koefisien *losses* (K) *elbow 90°* adalah 0,2 dengan rata-rata nilai koefisien *losses* (K) total adalah 0,18. Ketiga adalah *elbow 90°* dengan penambahan CDB ($l = 0,9D_h$), pada Re_{Dh} terendah nilai koefisien *losses* (K) *elbow 90°* adalah 0,22 dan pada Re_{Dh} tertinggi nilai koefisien *losses* (K) *elbow 90°* adalah 0,4 dengan nilai rata-rata koefisien *losses* (K) *elbow 90°* total adalah 0,27.

Headloss minor elbow 90° dipengaruhi oleh nilai koefisien *losses (K) elbow 90°*, *pressure drop*, dan kecepatan aliran fluida. Sementara peningkatan koefisien *losses (K) elbow 90°* disebabkan oleh nilai *pressure drop* yang besar dibandingkan kenaikan kecepatan aliran fluida. Sedangkan penurunan koefisien *losses (K) elbow 90°* disebabkan oleh nilai *pressure drop* yang konstan dibandingkan kenaikan kecepatan aliran fluida. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai koefisien *losses (K) elbow 90°* menentukan menurun atau meningkatnya nilai *headloss minor elbow 90°* yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{P_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{outlet}^2}{2} + gz_{outlet} = \frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{inlet}^2}{2} + gz_{inlet} + h_{lm} \quad (4.5)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{elbow\ 90^\circ} \quad (4.6)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = k_{elbow\ 90^\circ} \left(\frac{\bar{v}^2}{2} \right) \quad (4.7)$$

$$k_{elbow\ 90^\circ} = \frac{2 \Delta P}{\rho \bar{v}^2} \quad (4.8)$$

Pada **gambar 4.3** dapat dilihat bahwa grafik koefisien *losses (K)* pada *elbow 90°* tanpa CDB cenderung naik setiap naiknya nilai *Reynold's Number*. Begitu juga dengan grafik koefisien *losses (K) elbow 90°* dengan penambahan CDB ($l=0,6D_h$), secara keseluruhan grafik cenderung naik setiap naiknya nilai *Reynold's Number*. Sementara pada grafik koefisien *losses (K) elbow 90°* dengan penambahan CDB ($l=0,9D_h$) cenderung menurun setiap naiknya nilai *Reynold's Number*, menurunnya nilai koefisien *losses (K) elbow 90°* tersebut menunjukkan bahwa pada Re_{D_h} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ kenaikan nilai Re_{D_h} tidak sebanding dengan peningkatan *pressure drop* seperti pada **gambar 4.2 (b)**. Sedangkan untuk kenaikan nilai koefisien *losses (K) elbow 90°* menunjukkan bahwa peningkatan *pressure drop* seperti pada **gambar 4.2 (b)** sebanding dengan peningkatan kecepatan aliran fluida. Dari ketiga grafik yang ditampilkan dapat dilihat bahwa nilai rata-rata koefisien *losses (K) elbow 90°* terendah adalah dengan penambahan CDB ($l=0,6D_h$) sebesar 0,18, hal ini semakin memperkuat hipotesa awal bahwa penambahan CDB

pada *inlet elbow 90°* di sisi *inner upstream duct* dapat menurunkan nilai *pressure drop* pada *square duct* dengan *elbow 90°* dengan *single guide vane*.

4.3 Pressure Coefficient Elbow 90° pada Square Duct dengan Reynolds Number 9,52x10⁴

Hasil eksperimen berupa grafik pengaruh *cylinder disturbance body* (CDB) dan *Reynold's Number* terhadap *Pressure Coefficient* (C_p) pada *elbow 90°*. Penelitian ini menggunakan *elbow 90°* berpenampang *square* dan terdapat *single guide vane*, dengan begitu terdapat kesempatan untuk mengamati berbagai macam karakter aliran fluida dan salah satunya adalah *Pressure Coefficient*. *Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan CDB sebelum memasuki *elbow 90°*, *gap* CDB sebesar 2,5 mm dan variasi jarak $l = 0,5D_h$ sampai $0,9D_h$ dari *inlet elbow 90°* di sisi *inner upstream duct* dengan rasio kelengkungan *elbow 90°* (R/D_h) sebesar 1,5 dan variasi Re_{D_h} 9,52x10⁴. *Pressure Coefficient* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap freestream* dan *pressure tap outer wall* maupun *inner wall* yang terdapat pada sepanjang dinding melengkung dari *elbow 90°* yang dipasang masing – masing sebanyak 17 *pressure tap* dari 0° sampai 90° dengan selisih pemasangan antar *pressure tap* setiap kenaikan 5°. Dilihat pada **gambar 4.3** menunjukkan adanya perubahan nilai *Pressure Coefficient* (C_p) di sepanjang penampang melintang baik pada *outer wall* maupun *inner wall* dari dinding kelengkungan *elbow 90*. Nilai *Pressure Coefficient* (C_p) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (4.9)$$

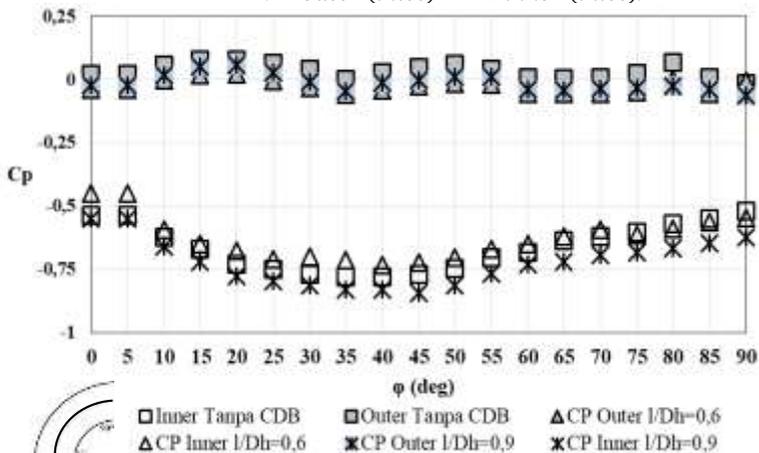
$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (4.10)$$

Fluida yang melewati *elbow 90°* akan mengalami separasi (*separation loss*) dan aliran sekunder (*secondary flow*), dengan penambahan *single guide vane* pada *elbow 90°* diharapkan mampu menunda terjadinya separasi aliran dan mencegah terjadinya aliran sekunder. Pada **gambar 4.4** ditampilkan

distribusi *Pressure Coefficient* (C_p) sepanjang sisi *inner* (grafik bagian bawah) dan *outer* (grafik bagian atas) *elbow* 90° terhadap titik sepanjang sisi tersebut tiap 5° dan Re_{Dh} $9,52 \times 10^4$. Pada **gambar 4.4** ditampilkan distribusi *Pressure Coefficient* (C_p) sepanjang sisi *inner* (grafik bagian bawah) dan *outer* (grafik bagian atas) *elbow* 90° terhadap titik sepanjang sisi tersebut tiap 5° dan Re_{Dh} $9,52 \times 10^4$. Penambahan *cylinder disturbance body* dapat meningkatkan kecepatan di sisi *outer wall* dan mengurangi kecepatan di sisi *inner wall*. Perbandingan nilai *pressure drop* (Δp) dapat ditunjukkan dengan selisih *Pressure Coefficient* (C_p) pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall* (ΔC_p). Apabila didapatkan nilai ΔC_p yang rendah, maka *pressure drop* (Δp) yang didapatkan juga semakin rendah. Nilai ΔC_p dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta C_p = \Delta C_{p_{outlet}} - \Delta C_{p_{inlet}} \quad (4.11)$$

$$\Delta C_p = (C_{p_{outer}}(outlet) - C_{p_{inner}}(outlet)) - (C_{p_{outer}}(inlet) - C_{p_{inner}}(inlet)) \quad (4.12)$$



Gambar 4.4 Distribusi *Pressure Coefficient* pada *Square Elbow* 90° dengan variasi jarak peletakan *cylinder disturbance body* terhadap Re_{Dh} $9,52 \times 10^4$

Pada **gambar 4.4** penambahan CDB dapat menurunkan dan menaikan nilai ΔC_p pada *single guide vane elbow* 90°

dibanding saluran tanpa CDB. Penurunan nilai selisih rata-rata *Pressure Coefficient* pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall* (ΔC_p) paling efektif pada variasi jarak ($l/D_h=0.6$) sebesar 0.602, sedangkan nilai ΔC_p tanpa CDB sebesar 0.696, namun pada variasi jarak ($l/D_h=0.9$) nilai rata-rata ΔC_p mengalami kenaikan dibandingkan nilai ΔC_p tanpa CDB sebesar 0.711. Dari perbandingan ketiga variasi diketahui bahwa nilai penurunan ΔC_p paling efektif terjadi pada jarak ($l/D_h=0.6$), hal ini semakin memperkuat hipotesa awal bahwa penambahan *cylinder disturbance body* dapat menurunkan *pressure drop* pada *square duct*.

Fenomena aliran yang terjadi pada *elbow* 90° dapat dilihat berdasarkan **gambar 4.4**. Ketika aliran melewati sebuah *single guide vane elbow* 90° maka aliran tersebut akan mengalami fenomena seperti ketika aliran melewati sebuah *diffuser* dan *nozzle*. Pada **gambar 4.4** menunjukkan bahwa ketika aliran yang melewati sisi *inner* mengalami fenomena seperti melalui *nozzle* pada sudut 0° sampai 40° , dimana pada sudut tersebut terjadi penurunan tekanan dan kenaikan kecepatan aliran. Sebaliknya, ketika aliran melewati sudut 45° sampai 90° seolah-olah aliran melewati sebuah *diffuser* yang ditandai dengan kenaikan nilai C_p , menandakan terjadi kenaikan tekanan dan penurunan kecepatan. Pada sisi *outer* mulai sudut 0° - 20° , 40° - 50° , dan dan 70° - 80° terjadi kenaikan nilai C_p , menandakan terjadi kenaikan tekanan dan penurunan kecepatan aliran menurun seolah-olah memasuki sebuah *diffuser*, sebaliknya mulai sudut 25° - 35° , 55° - 65° dan 85° - 90° terjadi penurunan nilai C_p , menandakan terjadi penurunan tekanan dan kenaikan kecepatan seperti pada sebuah *nozzle*. Fenomena aliran seperti dijelaskan diatas terjadi pada semua variasi baik tanpa maupun dengan penambahan *cylinder disturbance body*. Selain itu distribusi C_p pada bagian *outer wall* memiliki bentuk yang mirip untuk semua variasi, sehingga dapat dikatakan bahwa penambahan *cylinder disturbance body* sebagian besar hanya berpengaruh pada bagian *inner wall*. Fenomena lain yang terjadi pada sisi *inner* adalah adanya *reatachment*, yaitu terjadinya tumbukan dari

shear layer yang diakibatkan oleh penambahan *cylinder disturbance body* dimana *shear layer* tersebut dapat meningkatkan momentum untuk melawan *advers pressure* pada sisi *inner wall*. Dari pembahasan grafik diatas dapat disimpulkan penambahan *cylinder disturbance body* pada jarak ($l/D_h=0.6$) dan *single guide vane* pada *elbow* 90° efektif untuk menurunkan *Pressure Coefficient* (ΔC_p).

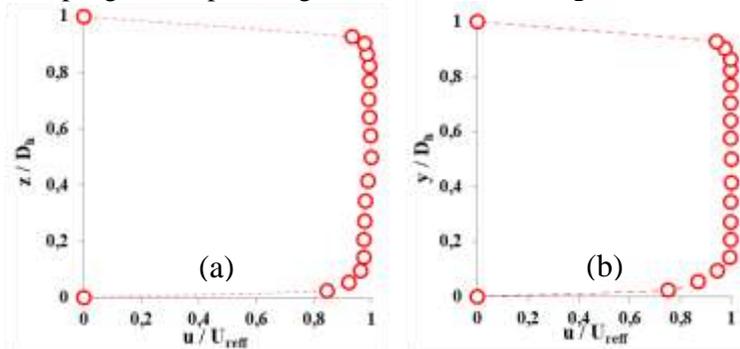
4.4 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada bagian *Upstream* dan *Downstream* dengan $Re_{Dh}=9,52 \times 10^4$

Hasil eksperimen berupa profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal pada bagian *upstream* dan *downstream square duct elbow* 90° divariasikan tanpa dan dengan CDB sebelum memasuki *elbow* 90° , *gap* CDB sebesar 2,5 mm dan variasi jarak $l=0,5D_h$ sampai $0,9D_h$ dari *inlet elbow* 90° di sisi *inner upstream duct* dengan rasio kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) sebesar 1,5 dan variasi Re_{Dh} $9,52 \times 10^4$. Profil kecepatan merupakan bilangan tak berdimensi yang terdiri dari perbandingan z/D_h pada *ordinat* horizontal atau y/D_h pada *ordinat* vertikal dan u/U_{ref} pada *absis*. Besar z/D_h atau y/D_h bernilai nol pada posisi tepat di *inner square duct* dan bernilai 1 pada posisi tepat di *outer square duct*. Sedangkan besar u/U_{ref} bergantung pada besar profil kecepatan pada suatu titik.

4.4.1 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal bagian *Upstream*

Profil kecepatan pada sisi *upstream straight duct* dapat dilihat pada **gambar 4.5** digunakan sebagai acuan untuk menentukan gambaran proses *recovery* profil kecepatan daerah *downstream straight duct* pada *section* yang telah ditentukan. Dari **gambar 4.5 (a)** dapat dilihat bahwa pada sisi *inner upstream* dengan z/D_h 0 dan 1 memiliki nilai u/U_{ref} sebesar nol. Hal ini menandakan bahwa aliran yang berada tepat pada dinding baik sisi *inner* maupun sisi *outer* memiliki kecepatan nol. Kemudian

terlihat profil kecepatan bergerak seragam dan telah berkembang dengan sempurna (*fully developed flow*) pada posisi z/D_h 0,02 sampai 0,9. Profil kecepatan *upstream* ini dijadikan acuan pengukuran pada bagian *downstream* bidang horizontal. Serupa dengan sebelumnya, pada **gambar 4.5 (b)** juga dapat dilihat bahwa sisi *lower upstream* dengan $y/D_h=0$ dan sisi *upper* dengan $y/D_h=1$ memiliki nilai u/U_{reff} sebesar nol. Kemudian profil kecepatan bergerak seragam telah berkembang dengan sempurna (*fully developed flow*) pada posisi y/D_h 0,02 sampai 0,9. Profil kecepatan ini dijadikan acuan pengukuran pada bagian *downstream* bidang vertikal.



Gambar 4.5 Grafik profil kecepatan (a) bidang horizontal bagian *upstream*
(b) bidang vertikal bagian *upstream*

4.4.2 Profil Kecepatan Bidang Horizontal bagian *Downstream*

Profil kecepatan bidang horizontal pada bagian *downstream* diambil dari data pada *section 2* ($x/D_h=2$), 4 ($x/D_h=4$), 6 ($x/D_h=6$), 10 ($x/D_h=10$) dan 14 ($x/D_h=14$). Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari sisi *inner* sampai sisi *outer square duct*. *Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan CDB sebelum memasuki *elbow 90°*, *gap* CDB sebesar 2,5 mm dan variasi jarak $l = 0,5D_h$ sampai $0,9D_h$ dari *inlet elbow 90°* di sisi *inner*

upstream duct dengan rasio kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) sebesar 1,5 dan Re_{D_h} $9,52 \times 10^4$. Analisa profil kecepatan bidang horizontal secara dua dimensi sepanjang *downstream*. Profil kecepatan adalah bilangan tak berdimensi yang bernilai 0 sampai 1 pada *absis* sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan u/U_{ref} pada *ordinat*. Pada setiap section, aliran *freestream* digunakan sebagai acuan aliran sudah melalui proses *recovery*.

Pada **gambar 4.6** ditampilkan profil kecepatan bidang horizontal sepanjang *downstream* pada masing-masing *cross-section* untuk variasi tanpa CDB; CDB ($l = 0,6D_h$); dan CDB ($l = 0,9D_h$). Secara umum profil kecepatan mengalami perubahan setelah *outlet elbow* 90° dibanding pada *upstream*. Perbedaan signifikan antara kecepatan sisi *inner* dan *outer* terlihat saat aliran telah melewati *elbow* 90° dimana terdapat *single guide vane*, sisi *inner* mulai mengalami separasi aliran yang menyebabkan terjadinya pengurangan kecepatan, sedangkan pada sisi *outer* aliran mengarah tangensial ke arah sisi *inner* akibat dari perbedaan tekanan yang diakibatkan radius kelengkungan *elbow* 90° . Hal tersebut dapat menyebabkan *blockage effect* dan aliran terbesar pada *centreline* seperti terlihat pada **gambar 4.6**. Pada *section 2* ($x/D_h=2$), terlihat bahwa efek dari *guide vane* kecepatan tertinggi di z/D_h sekitar 0,4 sampai 0,5 setelah *inner* secara berturut-turut, hal ini dipengaruhi oleh adanya *guide vane* pada *elbow* 90° . Pada *section 2* ($x/D_h=2$) dapat dilihat terjadi *backflow backflow* terjadi pada sisi *inner*. Hal tersebut menandakan dengan penambahan *cylinder disturbance body* cukup memberikan agitasi pada aliran yang melaluinya, dimana kecenderungan aliran akan melewati sisi yang tidak dipasang *cylinder disturbance body*, akan tetapi dengan adanya *single guide vane* mengakibatkan sebagian aliran yang mengalir pada sisi *inner* berpindah menuju sisi *outer* dan z/D_h sekitar 0,4 sampai 0,5 dengan kecepatan yang

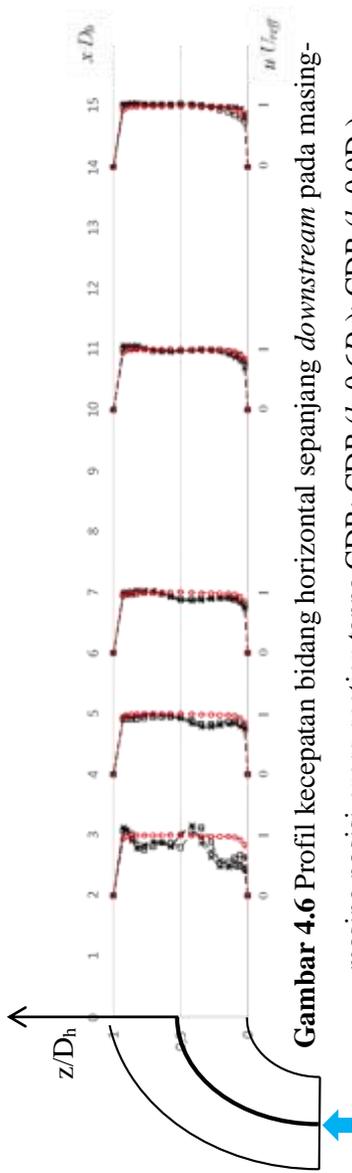
tinggi. Selain itu, fenomena tersebut juga dipengaruhi oleh adanya *shear layer* (aliran yang terseparasi) dari *cylinder disturbance body* yang mempunyai intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk menambah momentum aliran melawan *adverse pressure* di sisi *inner*. Kemudian pada *section 4* ($x/D_h=4$), 6 ($x/D_h=6$) dan 10 ($x/D_h=10$) *secondary flow* yang sebelumnya kuat di sisi *inner* secara berangsur-angsur telah merambat ke sisi *outer* seiring dengan berkurangnya kecepatan pada sisi *outer*, dengan demikian *backflow* pada bagian tengah penampang (*centerline*) semakin berkurang seperti terlihat pada ketiga gambar. Pada *section 14* ($x/D_h=14$) atau setelah melewati *elbow 90°* sejauh $14D_h$, mulai terjadi *recovery* di sisi *outer*, *centerline*, dan sisi *inner*, selanjutnya semua aliran pada ketiga gambar sudah mendekati profil kecepatan yang berkembang secara penuh (*fully developed flow*) seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*.

4.4.3 Profil Kecepatan Bidang Vertikal bagian *Downstream*

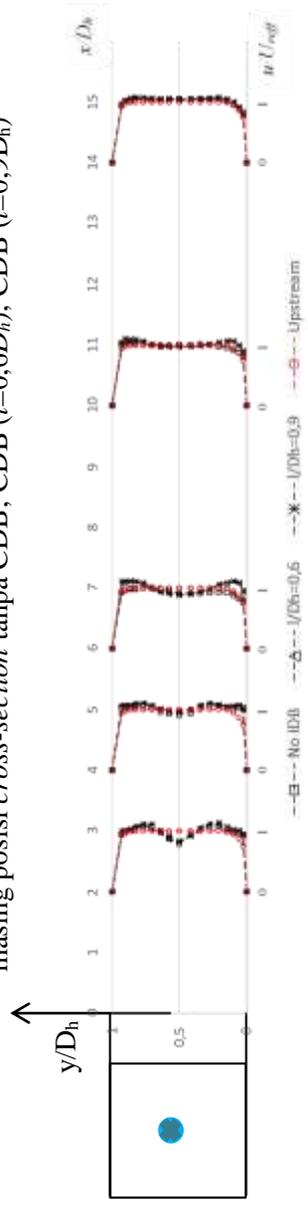
Sama seperti sebelumnya, profil kecepatan bidang vertikal pada bagian *downstream* diambil dari data pada *section 2* ($x/D_h=2$), 4 ($x/D_h=4$), 6 ($x/D_h=6$), 10 ($x/D_h=10$) dan 14 ($x/D_h=14$). Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari sisi *lower* sampai sisi *upper square duct*. *Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan CDB sebelum memasuki *elbow 90°*, *gap* CDB sebesar 2,5 mm dan variasi jarak $l = 0,5D_h$ sampai $0,9D_h$ dari *inlet elbow 90°* dengan R/D_h sebesar 1,5 dan $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$.

Pada **gambar 4.7** ditampilkan profil kecepatan bidang vertikal sepanjang *downstream* pada masing-masing *cross-section* untuk variasi tanpa CDB; CDB ($l = 0,6D_h$); dan CDB ($l = 0,9D_h$). Secara umum profil kecepatan mengalami perubahan setelah *outlet elbow 90°* dibanding pada *upstream*. Pada *section 2* ($x/D_h=2$) atau saat aliran meninggalkan *outlet elbow 90°*, posisi ini

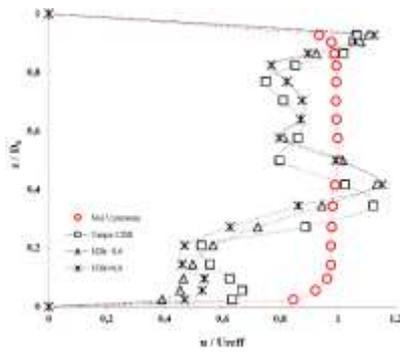
kecepatan pada sisi *lower* maupun sisi *upper* lebih besar dibandingkan kecepatan pada *upstream*. Pada *section 2* ($x/D_h=2$) dapat dilihat terjadi *backflow* yang kuat di sekitar *centerline*. Hal tersebut terjadi karena adanya *secondary flow* sebagai akibat aliran melalui *fitting elbow 90°* dengan *single guide vane*. Kemudian pada *section 4* ($x/D_h=4$) dan *6* ($x/D_h=6$), masih terlihat *backflow* pada ketiga gambar di daerah *centreline*. Pada *section 10* ($x/D_h=10$), terlihat ketiga gambar menunjukkan profil aliran yang berangsur-angsur mulai mengalami *recovery*, namun masih terlihat sedikit *backflow* pada *centerline*. Baru pada *section 14* ($x/D_h=14$) atau setelah melewati *elbow 90°* sejauh $14D_h$, *recovery* aliran pada ketiga gambar semakin baik dan telah membentuk aliran yang berkembang penuh (*fully developed flow*) seperti pada *upstream*.



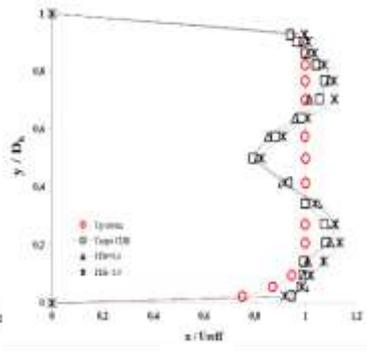
Gambar 4.6 Profil kecepatan bidang horizontal sepanjang *downstream* pada masing-masing posisi *cross-section* tanpa CDB; CDB ($l=0,6D_h$); CDB ($l=0,9D_h$)



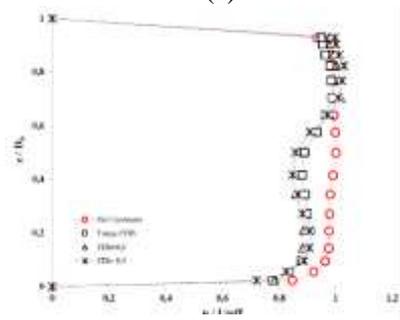
Gambar 4.7 Profil kecepatan bidang vertikal sepanjang *downstream* pada masing-masing posisi *cross-section* tanpa CDB; CDB ($l=0,6D_h$); CDB ($l=0,9D_h$)



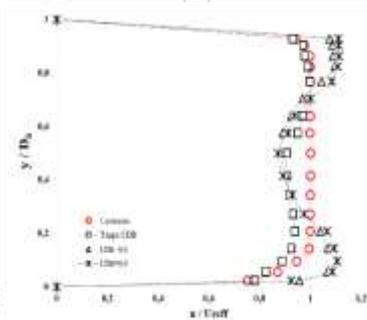
(a)



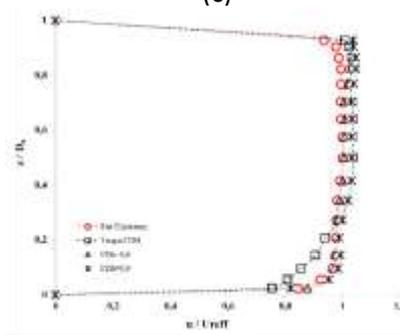
(b)



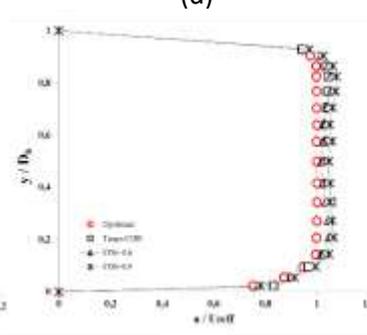
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 4.8 Profil Kecepatan pada bidang horizontal (a) section 2, (c) section 6, (e) section 14; bidang vertikal (b) section 2, (d) section 6, (f) section 14

4.5 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°*

Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang perbedaan hasil eksperimen dengan hasil pada penelitian terdahulu yang mempunyai topik dan tujuan yang sama dalam pelaksanaan penelitiannya. Penelitian yang akan dibandingkan adalah hasil penelitian dari **Farich Firmansyah (2016)**. Seperti sebelumnya, pada sub bab ini akan diberikan distribusi profil kecepatan horizontal hasil penelitian yang dibandingkan dengan distribusi profil kecepatan horizontal dari penelitian terdahulu pada posisi yang sama yaitu $x/D_h=2$.

Dalam penelitian ini terdapat beberapa persamaan seperti dimensi saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*), rasio kelengkungan *elbow 90°*, panjang *upstream* dan *downstream*). Namun terdapat beberapa perbedaan dalam penelitaian ini seperti *Reynolds Number*, dan variasi yang digunakan. Perbedaan tersebut dapat dikesampingkan karena hasil eksperimen yang dibandingkan menggunakan bilangan yang tak berdimensi sehingga perbedaan tersebut dapat dikesampingkan. Adapun persamaan dan perbedaan dalam penelitian ini dijelaskan dalam **tabel 4.1**.

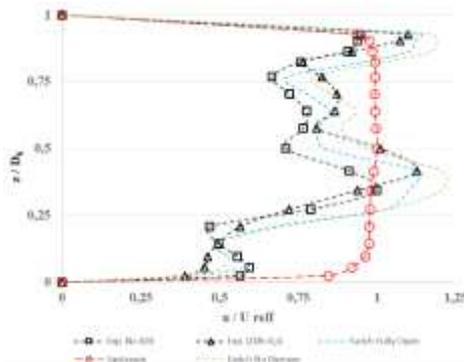
Tabel 4.1 Persamaan dan Perbedaan Penelitaian

Parameter	Farich Firmansyah (2010)	Zidqi Oddie (2018)
Geometri	<i>Square Duct</i> ($D_h=125mm$)	<i>Square Duct</i> ($D_h=125mm$)
Panjang Upstream	$7 D_h$	$7 D_h$
Rasio kelengkungan <i>elbow 90°</i>	($r/D_h=1.5$)	($r/D_h=1.5$)
Panjang Downstream	$15 D_h$	$15 D_h$
Type <i>elbow 90°</i>	<i>Single Guide Vane</i>	<i>Single Guide Vane</i>

<i>Reynolds Number</i> untuk profil kecepatan	<i>Re</i> 7,88x10 ⁴ (kecepatan 10 m/s)	<i>Re</i> 9.5x10 ⁴ (kecepatan 12 m/s)
Variasi	Sudut bukaan <i>damper</i> 0°,10°, 20° dan 30°	Jarak longitudinal sebelum inlet <i>elbow</i> 90° ($l/D_h=0.5$ sampai 0.9)

4.5.1 Perbandingan Velocity Profile dengan penelitian Farich Firmansyah (2016)

Hasil penelitian yang akan dibandingkan yaitu profil kecepatan horisontal. Perbandingan ini bertujuan untuk mendapatkan validasi hasil eksperimen yang telah dilakukan, sehingga hasil yang didapatkan dapat digunakan sebagai referensi penelitian selanjutnya. Perbandingan distribusi profil kecepatan antara hasil eksperimen dengan penelitian yang dilakukan **Farich Firmansyah (2016)** dibandingkan pada posisi yang sama yaitu pada section 2 ($x/D_h = 2$). Perbedaannya penelitian kali ini terdapat pada pemilihan nilai *Reynold's Number* yaitu Re 9,52x10⁴ pada variasi jarak longitudinal ($l/D_h=0,6$), sedangkan Farich menggunakan *Reynol's Number* 7,88x10⁴ pada variasi bukaan damper sudut 0° dan tanpa damper.



Gambar 4.9 Perbandingan profil kecepatan horizontal dengan penelitian terdahulu

Berdasarkan **gambar 4.9** dapat dilihat bahwa perbandingan antara hasil eksperimen yang telah dilakukan dengan penelitian yang dilakukan **Farich Firmansyah (2016)** memiliki kesamaan secara pola distribusi meskipun secara nilai pasti tidak sama. Pada distribusi profil kecepatan (**gambar 4.9**) menunjukkan pola yang identik sama dengan adanya percepatan pada sisi *outer* dan kemudian diikuti dengan terjadinya difisit momentum pada sisi *inner*. Kesamaan pola distribusi profil kecepatan sangat terlihat jelas pada variasi tanpa *cylinder disturbance body* (CDB). Hal ini menunjukkan bahwa percobaan yang telah dilakukan memiliki hasil yang bisa dibilang baik karena tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti lain seperti **Farich Firmansyah (2016)**.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan dibahas pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan *cylinder disturbance body* sebagai bodi pengganggu dan penambahan *single guide vane* pada *elbow 90°* dapat menurunkan nilai *pressure drop* dibandingkan dengan tanpa menggunakan *cylinder disturbance body*, namun untuk beberapa variasi nilai *pressure drop* justru lebih besar pada nilai *Reynold's Number* tertentu. Penurunan nilai *pressure drop* paling efektif pada variasi CDB ($l=0,6D_h$), yang mampu menurunkan nilai rata-rata *pressure drop* sebesar 0,8% dengan rata-rata *ratio* perbandingan *pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) sebesar 0,955. Sedangkan pada variasi CDB ($l = 0,9D_h$) justru mengalami peningkatan *pressure drop* sebesar 9,5% dengan rata-rata *ratio* perbandingan *pressure drop* ($\Delta p_{CDB}/\Delta p_0$) sebesar 1,138.
2. Penambahan *cylinder disturbance body* sebagai bodi pengganggu dan penambahan *single guide vane* pada *elbow 90°* menghasilkan nilai koefisien *losses (K) elbow 90°* yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan *cylinder disturbance body*. Pada variasi CDB ($l=0,6D_h$) memiliki nilai rata-rata koefisien *losses (K) elbow 90°* sebesar 0,18. Sementara variasi CDB ($l=0,9D_h$) memiliki rata-rata nilai koefisien *losses (K) elbow 90°* sebesar 0,27.
3. Perbedaan nilai *Pressure Coefficient (Cp)* cukup signifikan terjadi pada *single guide vane elbow 90°* dengan saluran tanpa *cylinder disturbance body* dan dengan *cylinder disturbance body*. Perbedaan tersebut terjadi pada sisi *inner* maupun sisi *outer elbow 90°* pada beberapa variasi penambahan *cylinder disturbance body*. Didapatkan bahwa ΔCp variasi CDB ($l=0,6D_h$) terbesar didapatkan pada sudut kelengkungan 25°

sebesar 0,7034. Sementara pada variasi CDB ($l=0,9D_h$) nilai ΔC_p terbesar berada pada sudut kelengkungan 45° sebesar 0,8408. Hal tersebut mengindikasikan bahwa *pressure drop* yang ada pada *single guide vane elbow* 90° dengan penambahan CDB ($l=0,6D_h$) lebih kecil dibandingkan dengan CDB ($l=0,9D_h$) maupun tanpa penambahan *cylinder disturbance body* yang mempunyai nilai ΔC_p terbesar berada pada sudut kelengkungan 45° sebesar 0,8173.

4. Pengamatan profil kecepatan dilakukan pada bidang horizontal dan vertikal pada section 2,4,6,10 dan 14 menunjukkan bahwa dengan penambahan CDB, profil kecepatan horizontal pada section 2 – 4 memiliki bentuk yang berbeda dibanding tanpa CDB, sedangkan untuk profil kecepatan vertikal pada section 2 - 6 juga memiliki bentuk yang berbeda dibanding tanpa CDB. Pada section 6 - 14 untuk *horizontal* dan section 10-14 untuk *vertikal* semua variasi menunjukkan bentuk profil kecepatan yang mirip. Penambahan CDB dapat menyebabkan penundaan separasi aliran karena *shear layer* yang dihasilkan CDB memberikan momentum aliran yang lebih kuat untuk melawan *advers pressure* dan penambahan *single guide vane* pada *elbow* 90° berfungsi untuk memecah aliran dan mengarahkan aliran agar *secondary flow* tidak sampai terbentuk.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan adanya *maintenance* instalasi penelitian maupun kalibrasi alat ukur untuk menunjang keakuratan pengambilan data.
2. Pengaturan suhu, kelembapan, dan kebersihan lingkungan kerja diperlukan agar pengganggu tidak mempengaruhi proses pengambilan data.
3. Diperlukan simulasi numerik (CFD) untuk memperkuat hasil penelitian yang telah dilakukan dan melihat fenomena lain yang tidak bisa dilihat pada penelitian ini.

4. Diperlukan adanya penelitian dengan variasi penambahan *disturbance body* dalam bentuk yang lain untuk memperlengkap hasil penelitian tentang *square duct* dengan *elbow* 90° yang ditambahkan *disturbance body* sebelumnya.
5. Diperlukan adanya penelitian dengan variasi penambahan jumlah *guide vane* dalam *elbow* 90° dan penambahan nilai *ratio* kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) serta peletakkan *disturbance body* pada *elbow* 90° yang menggunakan *guide vane*.
6. Untuk pengambilan *Velocity Profile* secara vertikal meja diganti dengan penyangga lebih tinggi agar memudahkan untuk proses pengambilan data pada beberapa titik yang sukar untuk diambil, dikarenakan keterbatasan dari efek lengkungan *pitot tube*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

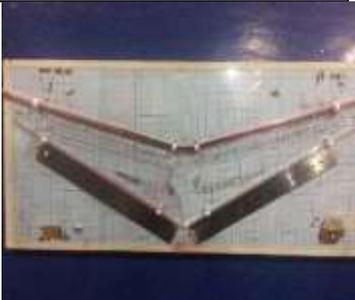
- A.Cengel, Yunus & M.Cimbala, John.2006. *Fluid Mechanics Fundamental and Application*. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc
- Dutta, Prasun & Nandi, Nityananda. 2015. *Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends*. *Mechanics and Mechanical Engineering Vol. 19, No. 1 (2015) 5–16* Lodz University of Technology.
- Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. *Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition*. New York : John Wiley & Sons Inc.
- H. Choi & J. Lee. 2000. *Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer*. *Journal of Fluids and Structures* volume 14, Issue 5, July 2000, Pages 697-709
- Halwan Firmansyah, Farich 2016. **Studi Eksperimen Aliran Melalui Square Duct dan Square Elbow 90° Dengan Single Guide Vane pada Variasi Sudut Bukaam Damper**. *JURNAL TEKNIK ITS Vol. 5 No. 3 (2016)* Tugas Akhir : Teknik Mesin ITS-Surabaya
- Hardian, Aqfha. 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Jarak Inlet Disturbance Body terhadap Aliran melalui Square Duct dengan Elbow 90°**. *JURNAL TEKNIK ITS Vol. 6 No. 1 (2017)*. Tugas Akhir : Teknik Mesin ITS-Surabaya
- Munson, Bruce R., Young, Donald F. & Okiishi, Theodore H. 2002. *Fundamentals of Fluid Mechanics, 4th Edition*. New York : John Wiley & Sons Inc.
- Putra Pratama, Rizkia, 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Gap Inlet Disturbance Body Terhadap Aliran Melalui Square Duct Dengan Elbow 90°**. *JURNAL TEKNIK ITS Vol. 6 No. 1 (2017)*. Tugas Akhir : Teknik Mesin ITS-Surabaya

- S.Miller, Donald.1990. ***Internal Flows System, 2nd edition***. BHRA
(*Information Services*)
- Sutardi, Wawan A.W., Affan & M.D. Sutrisno. 2010.
***Experimental Study on the Effect of Guide Vane
Insertion and Reynolds Number on the Flow Pressure
Drop in a 90° Rectangular Elbow***. Surabaya: Institut
Teknologi Sepuluh Nopember.

Lampiran 1. Peralatan Penelitian

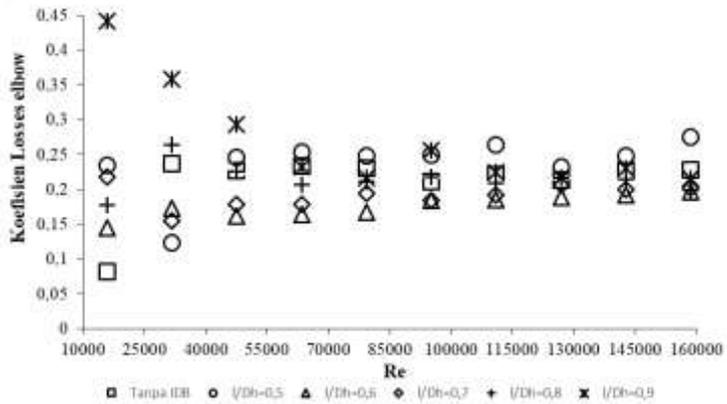
No	Nama Alat	Gambar
1	DAQ PRO 5300 0-24 mA: 0-10V max Input: 8 <i>Rate: 100/sample</i> <i>Samples: 1000</i>	 A blue and white handheld digital multimeter with a green LCD screen and several buttons. The screen displays '0.000'. The brand name 'JVC OMEGA' is visible at the bottom.
2	<i>Pressure transducer</i> 1" WC Model: PX653 - 01D5L Range : ± 1 " WC (<i>Water column</i>) Akurasi: 0.25 % FS (<i>Full scale</i>) Output: 1 – 5 V DC <i>Excitation: 12 – 36 V</i> DC Ser.no.: X14500102	 A rectangular metal pressure transducer with a white label. It has a circular port on top and several electrical terminals on the bottom. Wires are connected to the terminals.

<p>3</p>	<p><i>Pressure transducer</i> <i>3" WC</i> Model: PX653 - 03D5V Range: $\pm 3''$ WC (<i>Water column</i>) Akurasi: 0.25 % FS (<i>Full scale</i>) Output: 1 – 5 V DC Excitation: 12 – 36 V DC Ser.no.: X11450113</p>	
<p>4</p>	<p><i>Inverter</i> Model : ATV31HU15M2A U (V\sim) : -input = 200/240 Ø1 -output = 200/240 Ø3 F (Hz) : -input = 50/60 -output = 0.5/500 I (A) : -input = 15.8 max -output = 8.0</p>	

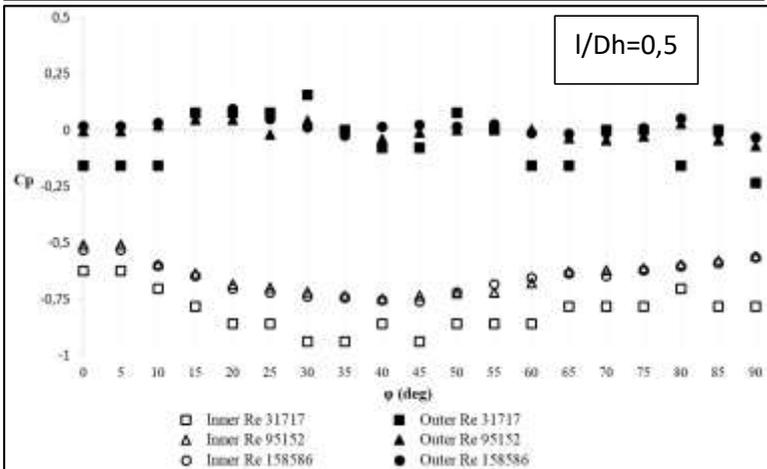
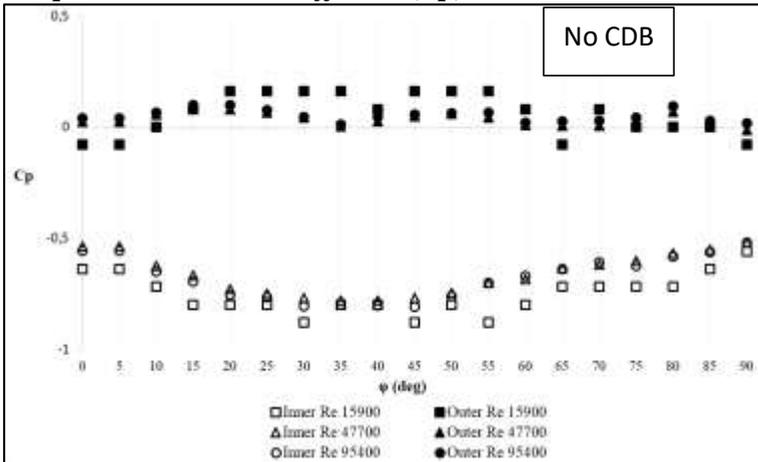
<p>5</p>	<p><i>Centrifugal fan</i> Merk: Vanco direct Centrifugal Fan Type: VDC/4-225 Voltage: 220 / 380 Voltage Frekuensi: 50 Hz Daya: 0,75 KW Putaran: 1450 RPM Max.Air Volume: 2550 m³/h</p>	
<p>6</p>	<p><i>Pitot static tube</i></p>	
<p>7</p>	<p>Manometer Skala minimum: 1 mm Fluida: <i>Red Oil</i> Kemiringan: 15°</p>	

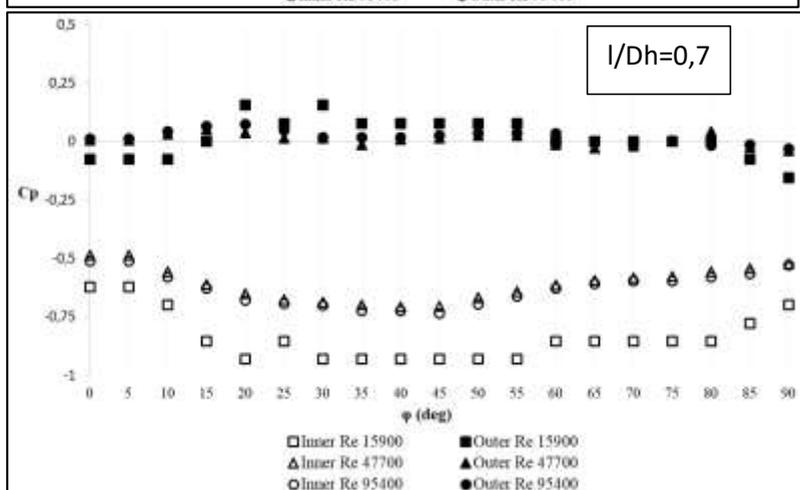
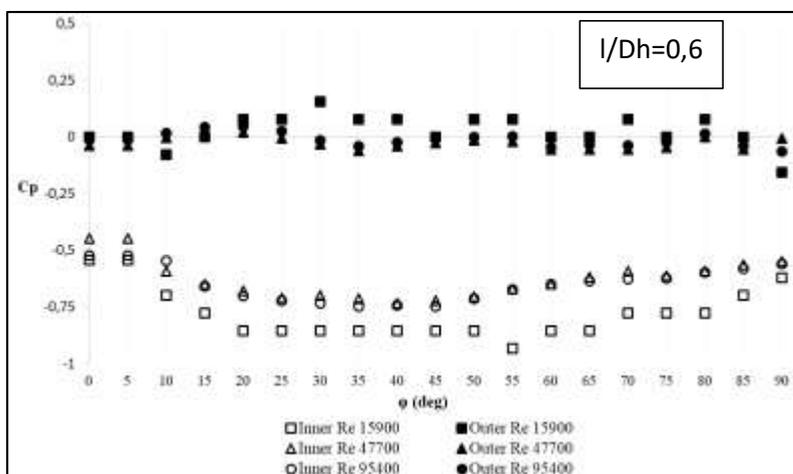
8	<p>Cylinder disturbance body</p> <p>Diameter: 6 mm</p> <p>Tinggi: 125 mm</p>	
---	---	---

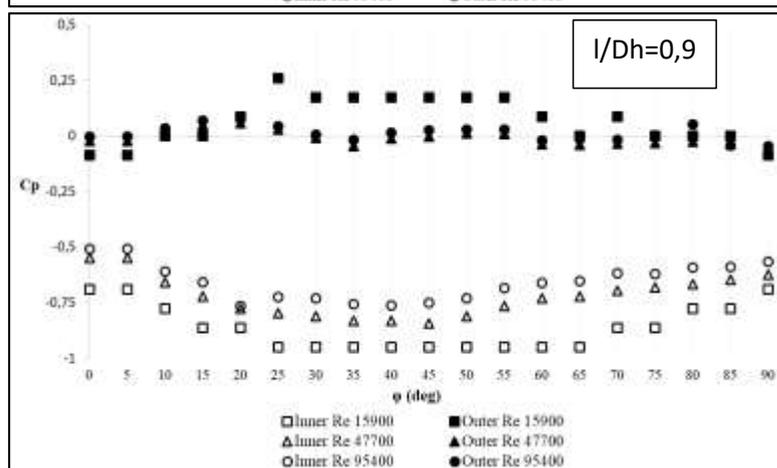
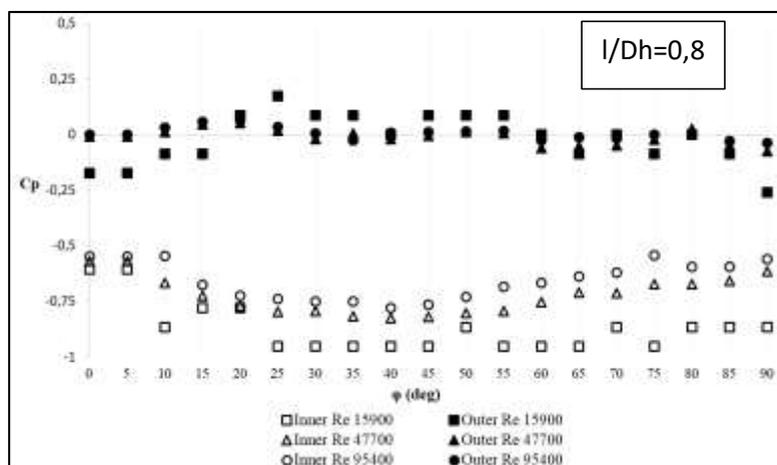
Lampiran 2. Koefisien Losses (K) Elbow 90°



Lampiran 3. Pressure Coefficient (C_p)









BIOADATA PENULIS

Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara yang dilahirkan pada tanggal 01 Februari 1994 di Mojokerto, Jawa Timur. Pendidikan formal yang pernah ditempuh meliputi SDN Miji 1 Mojokerto, SMPN 1 Sooko Mojokerto, dan SMAN 1 Puri Mojokerto dengan bidang studi Ilmu Pengetahuan Alam dan lulusan D3 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember konsentrasi konversi energi. Setelah itu penulis meneruskan pendidikan tingkat perguruan tinggi Lintas Jalur S1

Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016. Selama masa pendidikan baik di perkuliahan penulis aktif di beberapa kegiatan organisasi dan mengikuti pelatihan – pelatihan di D3 Teknik Mesin FTI - ITS. Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. IPMOMI Paiton-Probolinggo, Jawa Timur. Bagi pembaca yang ingin lebih mengenal penulis dan ingin berdiskusi lebih luas lagi dapat menghubungi:

- e-mail : oddiematovani01@gmail.com
- No. Telp. : [081-334-212-533](tel:081-334-212-533)

