



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

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

Ahmad Hisyam
NRP 021116 45 000048

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

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



TUGAS AKHIR – TM141585

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

AHMAD HISYAM
NRP. 021116 45 000048

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

**EXPERIMENT STUDY OF FLOW THROUGH SQUARE
DUCT AND SINGLE GUIDE VANE ELBOW 90°
TOWARDS CYLINDER DISTURBANCE BODY WITH
THE EFFECT OF VARIATION GAP**

AHMAD HISYAM
NRP. 021116 45 000048

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 ALIRAN MELALUI SQUARE
DUCT DAN SINGLE GUIDE VANE ELBOW 90°
TERHADAP CYLINDER DISTURBANCE BODY
DENGAN PENGARUH VARIASI GAP**

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 :

AHMAD HISYAM
NRP. 021116 45 000048

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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

SURABAYA

JULY, 2018

Studi Eksperimen Aliran Melalui *Square Duct* dan *Single Guide Vane Elbow 90°* terhadap *Cylinder Disturbance Body* dengan Pengaruh Variasi Gap

Nama Mahasiswa : Ahmad Hisyam
NRP : 02111645000048
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

ABSTRAK

Penelitian yang dilakukan oleh *Shiming Deng & John Burnett* tahun 2002 tentang rata-rata penggunaan energi di 16 hotel besar di Hongkong menunjukkan konsumsi energi pada gedung persentase 45% untuk sistem tata udara, 31% untuk non-electrical, 17% untuk sistem tata cahaya, dan 7% untuk sistem transportasi gedung. Dari data tersebut didapatkan presentase konsumsi energi terbesar ialah untuk pengkondisian tata udara (*air conditioning*). Instalasi *square duct* memiliki kelebihan mudah dipasang dan hemat ruang. Maka dari itu dengan mengurangi kerugian pada instalasi saluran udara, diyakini dapat mengurangi *separation loss* dan *secondary flow* serta meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Salah satunya dengan merencanakan *fitting* perpipaan *elbow 90°* dengan penambahan *single guide vane*.

Penelitian dilakukan secara eksperimen dengan saluran berpenampang bujur sangkar (*square duct*) dengan $D_h = 125 \text{ mm}$ yang terdiri dari : *upstream duct (straight duct)* dengan panjang $7D_h$, *Cylinder Disturbance Body (CDB)* dengan $d = 6 \text{ mm}$, *square elbow 90°* dengan *curvative ratio* $(R/D_h)=1,5$ dan *downstream duct (straight duct)* dengan panjang $15D_h$, serta *centrifugal fan*. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan *pitot static tube*, *inclined manometer*, dan *pressure transducer*. Pengujian dilakukan dengan variasi gap ($g/D_h = 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4$ dan $0,5$) dan $l/D_h = 0,5$ yang diletakkan pada *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 tiap 2 m/s), untuk *coefficient pressure* pada *elbow 90°* digunakan kecepatan 2 m/s, 12 m/s, dan 20 m/s dengan Re_{Dh} $3,17 \times 10^4$; $9,52 \times 10^4$; dan $1,59 \times 10^5$. Sedangkan untuk mendapatkan profil kecepatan digunakan Re_{Dh} sebesar $9,52 \times 10^4$ pada jarak $(x/D_h) = 2, 4, 6, 10, \text{ dan } 14$ sepanjang *downstream duct*.

Hasil penelitian ini diperoleh bahwa penempatan CDB cukup efektif untuk mereduksi nilai *pressure drop* dengan variasi $g = 0,1D_h$, dimana mampu mereduksi sebesar 0,02% terhadap rasio *pressure drop* dengan *cylinder disturbance body* dan *pressure drop* tanpa *disturbance body* ($\Delta p_{DB}/\Delta p_{D0}$). Lalu pada hasil koefisien *losses* (K) *elbow 90°* juga didapatkan pada variasi CDB $g = 0,1D_h$ dibandingkan tanpa bodi pengganggu, yang mampu mereduksi dengan nilai rata-rata koefisien *losses* (K) *elbow 90°* sebesar 0,218. Penurunan nilai selisih *Pressure Coefficient* pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall* (ΔC_p) paling efektif pada variasi jarak $g = 0,1D_h$ sebesar 0,66, sedangkan nilai ΔC_p tanpa CDB sebesar 0,70, namun pada variasi $g = 0,3D_h$ nilai ΔC_p mengalami kenaikan dibandingkan nilai ΔC_p tanpa CDB sebesar 0,75. Pada profil kecepatan bidang horizontal dan vertical pada *section 2; 4; dan 6* menggambarkan dengan penambahan CDB memiliki profil kecepatan yang berbeda dibandingkan tanpa CDB, sementara pada *section 10 dan 14* secara keseluruhan variasi memiliki profil kecepatan yang mirip. Dapat ditarik kesimpulan bahwa masih terdapat *backflow* atau perlambatan aliran yang ditimbulkan dari *single guide vane* maupun separasi aliran pada sisi *inner wall* dan *centerline*.

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

Experiment Study of Flow Through Square Duct and Single Guide Vane Elbow 90° Towards Cylinder Disturbance Body with the Effect of Variation Gap

Name of Student : Ahmad Hisyam
NRP : 0211164500048
Department : Teknik Mesin FTI – ITS
Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

Abstract

Research conducted by Shiming Deng & John Burnett 2002 about average energy use in 16 major hotels in Hong Kong shows the energy consumption in the building with the 45 % for system of air , 31 % to non-electrical , 17 % to a system the lighting , and 7 % to transportation system building. From the data obtained the percentage largest energy consumption is to conditioning of air duct system. Installation square duct having an excess easy fitted and save space. Therefore by reducing losses on the installation of air ducts, it is believed can reduce separation loss and secondary flow and than improve overall efficiency. One of them is with modification the fittings pipes elbow 90° by the addition of a single guide vane

This research is carried out by experiments with models of rectilinear shaped channel square duct with $D_h=125$ mm 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 centrifugal fan. Measurements in this study using pitot static tube, inclined manometer, and a pressure transducer. The experiment conducted with the variation of gap ($g/D_h = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4$ and 0.5) and $l=0.5D_h$ was placed on the upstream duct. To get the value of pressure drop and coefficient loss elbow 90° used Re_{D_h} $1,59 \times 10^4$ 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 air velocity 4 m/s, 12 m/s and 20 m/s with Re_{Dh} $3,17 \times 10^4$; $9,52 \times 10^4$ and $1,59 \times 10^5$, while to get the velocity profile along the upstream duct and downstream duct used Re_{Dh} of $9,52 \times 10^4$ with distance $(x/Dh)=2,4,6,10$, and 14 along the downstream duct.

The results of this research were obtained that the placement of the CDB is effective for reducing the value of pressure drop with variations of gap $g=0,1Dh$ where able to decrease for 0.02% towards pressure drop ratio with the cylinder body disturbance and pressure drop without disturbance body ($\Delta p_{DB}/\Delta p_{D0}$). Then, in the results of losses coefficient (K) elbow 90° is also obtained on a variation of the CDB $g=0,1Dh$ compared without disturbance body, has an average value of losses coefficient (K) 90° elbow of 0.218. Decreasing of the difference value coefficient pressure on side of outer and inner wall (ΔCp) is most effective on a variation $g=0,1Dh$ amounted to 0,66, while value ΔCp without the CDB is 0.70, but on variations $g=0,3Dh$ ΔCp values increase compared without the CDB with value 0,75. On the velocity profile horizontal and vertical section 2; 4; and 6 can be illustrated with the addition of the CDB has a different velocity profiles are compared without the CDB, while section 10 and 14 overall variations have similar velocity profile. Can be concluded there are still have a backflow or slowing flow caused from single guide vane or separation flow on the side of inner wall and the centerline.

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

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat, ridho, rizki, dan hidayah-Nya kepada penulis dengan segala keterbatasannya sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Sofwan Hadi dan Ibu Sudarwanti selaku orang tua penulis yang selalu memberikan doa serta dukungan.
2. Ainur Rasyid dan Muhammad Qahhar selaku kakak yang selalu memberikan motivasi dan dukungan.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan ide, arahan, bimbingan dan motivasi selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD., Nur Ikhwan, ST, M.Eng, dan Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, PhD. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang tugas akhir ini.
5. Bapak Ir.Bambang Pramujati, M.Sc.Eng.,Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
6. Bapak Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng., Sc. selaku dosen wali penulis yang selalu membimbing dan mengarahkan penulis dalam pengambilan mata kuliah dari awal mahasiswa baru sampai saat ini.
7. Bapak Sutrisno selaku teknisi Laboratorium Mekanika Fluida Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan membantu penulis dalam jalannya pengambilan data di laboratorium.

8. Sege nap staff dan karyawan Jurusan Teknik Mesin yang telah membantu dan memberi ilmu pengetahuan selama penulis menimba ilmu di jurusan Teknik Mesin ini.
9. Zidqi Oddie Matovani, AMd., Dheka Arga, AMd, Aulia Azizah, AMd., Nurul Fajri Al Farizy Putera, AMd dan Arif Rahman, AMd sebagai rekan Tugas Akhir penulis yang telah menyisihkan banyak waktu untuk mengerjakan buku Tugas Akhir ini.
10. Seluruh rekan mahasiswa LJ 2016 Teknik Mesin yang selalu membantu bersama.
11. Septyan Dana Prakasa, AMd., Gerry Prasetyo, AMd., dan Bhima Poetra Perdana, AMd., selaku rekan seperjuangan yang memberi hasutan, semangat, motivasi, dan juga canda tawa saat jenuh menyelesaikan buku tugas akhir ini.

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 khususnya mahasiswa jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Saluran Udara	7
2.2 Klasifikasi Aliran Fluida	8
2.2.1 Aliran <i>Inviscid</i> dan <i>Viscous</i>	9
2.3 Karakteristik Aliran Melalui Saluran Dalam Pipa	10
2.3.1 Aliran Laminar	10
2.3.2 Aliran Transisi	11
2.3.3 Aliran Turbulen	11
2.3.4 Aliran Berkembang Penuh	12
2.3.5 <i>Separation Flow</i> pada <i>Elbow 90°</i>	13
2.3.5 <i>Secondary Flow</i> pada <i>Elbow 90°</i>	14
2.4 Persamaan Euler dalam Koordinat <i>Streamline</i>	15
2.5 Tekanan Stagnasi, Tekanan Statis, dan Tekanan Dinamis	16
2.6 <i>Pressure Coefficient</i>	17
2.7 <i>Head Loss</i>	18
2.7.1 <i>Head Loss Mayor</i>	19
2.7.2 <i>Head Loss Minor</i>	20

2.8 Penelitian Terdahulu.....	21
-------------------------------	----

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Penelitian	31
3.2 Peralatan Pendukung Penelitian	33
3.2.1 <i>Honey Comb, Screen, dan Nozzle</i>	34
3.2.2 <i>Centrifugal Fan</i>	34
3.2.3 <i>Inverter</i>	35
3.2.4 <i>Elbow 90° dengan Single Guide Vane</i>	35
3.2.5 <i>Cylinder Disturbance Body</i>	36
3.2.6 Alat Ukur.....	36
3.3 Analisis Dimensi Parameter – Parameter	40
3.3.1 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk <i>Pressure Drop</i> dan <i>Velocity Profile</i>	41
3.4 Langkah-langkah Validasi	43
3.4.1 Validasi Tekanan Dinamis	43
3.4.2 Validasi Tekanan Statis.....	44
3.5 Prosedur Pengambilan Data.....	46
3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif	46
3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif.....	47

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 <i>Pressure drop overall</i> Fungsi <i>Reynolds Number</i> $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$	53
4.2 <i>Pressure drop per section</i> pada sisi <i>Upstream, Elbow 90°</i> , dan <i>Downstream</i> Fungsi <i>Reynolds Number</i> $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$	55
4.3 Koefisien <i>Minor Losses Elbow 90°</i> Fungsi <i>Reynolds Number</i> $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$	58
4.4 <i>Pressure Coefficient</i> pada <i>Elbow 90°</i> dengan <i>Reynolds Number</i> $9,52 \times 10^4$	60
4.5 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada <i>Upstream Duct</i> dan <i>Downstream Duct</i>	63

4.5.1 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada <i>Upstream Straight Duct</i> dengan $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$	64
4.5.2 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada <i>Downstream Straight Duct</i> dengan $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$	65
4.5.3 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada <i>Downstream Straight Duct</i> dengan $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$	67
4.6 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu	70
4.6.1 Perbandingan <i>Velocity Profile</i> dengan Penelitian Farich (2016).....	71

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran.....	74

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Macam – macam bentuk <i>ducting</i> (a) <i>Circular Tube</i> (b) <i>Square Duct</i> (c) <i>Rectangular Duct</i> (Cengel dan Cimbala, 2006)7
Gambar 2.2	Klasifikasi fluida berdasarkan jenis alirannya (Fox dan Mc. Donald, 2011).....9
Gambar 2.3	Ilustrasi aliran <i>inviscid</i> dan <i>viscous</i> (Fox dan Mc. Donald, 2011) 9
Gambar 2.4	Aliran Laminar (Munson et al, 2002) 10
Gambar 2.5	Aliran Transisi (Munson et al, 2002)..... 11
Gambar 2.6	Aliran Turbulen (Munson et al, 2002) 11
Gambar 2.7	Profil Kecepatan untuk aliran didalam Penampang lurus (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition)..... 12
Gambar 2.8	Terjadinya separasi aliran pada dinding <i>Elbow 90°</i> (Miller, 1990) 14
Gambar 2.9	Terjadinya <i>secondary flow</i> pada <i>Elbow 90°</i> (Miller, 1990)..... 14
Gambar 2.10	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition) 15
Gambar 2.11	Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition) 16
Gambar 2.12	Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya (Dutta dan Nandi, 2015)21
Gambar 2.13	<i>Velocity profile</i> pada sudut 0°, 30°, 60°, dan 90° dengan variasi <i>curvature ratio</i> ($R_c/D = 1 - 5$) (Dutta dan Nandi, 2015)22
Gambar 2.14	Profil kecepatan pada elbow (a) tanpa guide vane, (b) 1 guide vane, (c) 2 guide vane, (d) 3 guide vane23
Gambar 2.15	Skema Instalasi Penelitian (Aqfha, 2017).....25
Gambar 2.16	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow 90°</i> dengan variasi <i>Reynolds Number</i>

	$3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak <i>inlet disturbance body</i> $0,1D_h - 0,5D_h$ (Aqfha, 2017) .	26
Gambar 2.17	Koefisien <i>Losses Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i> dengan variasi <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak <i>inlet disturbance body</i> $0,1D_h - 0,5D_h$ (Aqfha, 2017)	27
Gambar 2.18	Sketsa <i>test section</i> (pandangan atas) (Rizkia, 2017).....	28
Gambar 2.19	<i>Pressure drop square duct</i> dengan variasi peletakkan <i>inlet disturbance body</i> dan Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$ (Rizkia, 2017)	29
Gambar 2.20	<i>Loss coefficient elbow 90°</i> dengan variasi peletakkan <i>inlet disturbance body</i> dan Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $1,35 \times 10^5$ (Rizkia, 2017).....	30
Gambar 3.1	Skema Instalasi Penelitian	31
Gambar 3.2	Model uji penelitian.....	32
Gambar 3.3	Instalasi Penelitian.....	33
Gambar 3.4	<i>Honey Comb, Screen, Nozzle</i>	34
Gambar 3.5	<i>Centrifugal Fan</i>	34
Gambar 3.6	<i>Inverter</i>	35
Gambar 3.7	<i>Elbow 90°</i> dengan <i>Single Guide Vane</i>	36
Gambar 3.8	<i>Cylinder Disturbance Body</i>	36
Gambar 3.9	Skema pemasangan <i>wall pressure tap</i>	37
Gambar 3.10	<i>Pitot Tube</i>	38
Gambar 3.11	(a) DAQ PRO 5300, (b) <i>Differential Pressure Transmitter</i>	38
Gambar 3.12	(a) <i>Inclined Manometer</i> ; (b) <i>Red Gage Oil</i>	40
Gambar 3.13	Skema validasi tekanan dinamis <i>pressure transducer 1"WC</i>	44
Gambar 3.14	Contoh hasil validasi tekanan dinamis dengan <i>pressure transducer 1"WC</i>	44
Gambar 3.15	Skema validasi tekanan statis <i>pressure transducer 3"WC</i>	45

Gambar 3.16	Contoh hasil validasi tekanan statis dengan <i>pressure transducer 3"WC</i>46
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$54
Gambar 4.2	Grafik <i>ratio pressure drop per section</i> pada <i>square duct</i> (a) <i>Upstream</i> ; (b) <i>Elbow 90°</i> ; (c) <i>Downstream</i> ; dengan variasi jarak peletakan <i>square disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$57
Gambar 4.3	Grafik <i>Minor Loss Coefficient 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$59
Gambar 4.4	Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> pada <i>Square Elbow 90°</i> dengan variasi jarak peletakan <i>square disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $9,52 \times 10^4$ 62
Gambar 4.5	Grafik <i>velocity profile</i> (a) bidang horizontal sisi <i>upstream straight duct</i> (b) bidang vertikal sisi <i>upstream straight duct</i>65
Gambar 4.6	Profil kecepatan bidang (a) horizontal dan (b) vertikal sepanjang <i>downstream</i> pada masing-masing posisi <i>cross-section</i> 69
Gambar 4.7	Perbandingan profil kecepatan hasil eksperimen dengan penelitian Farich (2016) 71

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pengaruh penambahan <i>guide vane</i> terhadap <i>pressure drop</i> (Sutardi dkk,2010)	23
Tabel 4.1	Data Perbandingan Penelitian	70

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem pengkondisian udara pada era saat ini menjadi poin vital untuk menunjang proses kenyamanan dan efektivitas suatu gedung perkantoran maupun perhotelan. Dalam hal ini juga mencakup pada bidang industri seperti industri manufaktur, pengolahan makanan, dan pembangkit listrik. Tentunya gedung-gedung tersebut membutuhkan energy yang tidak sedikit untuk kegiatan operasional setiap harinya. Penelitian yang dilakukan oleh **Deng & Burnett [2002]** secara eksperimen menunjukkan rata-rata penggunaan energi di 16 hotel besar di Hong Kong, dan hasil sebaran konsumsi energi yang didapat ialah 45% untuk sistem tata udara, 31% untuk non-electrical, 17% untuk sistem tata cahaya, dan 7% untuk sistem transportasi gedung (*lift* atau *escalator*). Dari data tersebut didapatkan presentase konsumsi energi terbesar untuk pengkondisian tata udara (*air conditioning*). Oleh karena itu pihak pengembang atau kontraktor harus memiliki solusi agar sirkulasi udara tetap baik namun juga tidak menyebabkan banyak kerugian. Dalam hal ini pola instalasi berbentuk bujur sangkar (*square duct*) lebih banyak dipilih meskipun memiliki kerugian lebih besar daripada bentuk silinder, namun penampang (*square duct*) memiliki kelebihan mudah dipasang dan hemat ruang. Maka dari itu dengan mengurangi kerugian-kerugian yang ada pada instalasi saluran udara diyakini dapat mengurangi *separation loss* dan *secondary flow* serta meningkatkan efisiensi secara keseluruhan, salah satunya dengan merekayasa *fitting* perpipaan yakni *elbow 90°* dengan penambahan sudu pengarah atau *single guide vane*.

Square elbow 90° merupakan salah satu *fitting* perpipaan berbentuk melengkung dengan sudut belokan tertentu yang berfungsi untuk membelokkan aliran udara agar dapat mengalir sesuai arah yang diinginkan. Aliran yang melewati *elbow 90°* mengalami fenomena *pressure drop* lebih besar jika dibandingkan

pada penampang lurus dengan panjang ekuivalen dan kecepatan udara yang sama. Hal tersebut terjadi karena adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah melewati *fitting* tersebut. Separasi di dalam *elbow 90°* terjadi akibat ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient*, sehingga sebagian aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya dan akan membentuk sebuah *vortex*. Terbentuknya *vortex* dapat mengurangi energi aliran. Sedangkan terbentuknya *secondary flow* pada *cross section area*, terjadi akibat adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall* dan akibat adanya interaksi *boundary layer* pada *endwall flow*. Efek yang ditimbulkan oleh adanya *secondary flow* ini adalah terjadinya penyumbatan aliran (*blockage effect*) dan mengurangi *effective flow area*.

Sedangkan penambahan bodi pengganggu silinder (*cylinder disturbance body*) pada sisi *upstream duct* merupakan salah satu modifikasi yang dilakukan untuk mengurangi efek *pressure drop* yang tinggi tersebut. Penambahan *cylinder disturbance body* ini bertujuan untuk menunda *separation point* dan membuat aliran memiliki intensitas turbulensi yang kuat. Intensitas turbulensi yang semakin kuat menyebabkan momentum aliran juga semakin kuat sehingga mampu melawan *adverse pressure gradient*. Selain itu juga dapat mengurangi gaya hambat (*drag force*) pada suatu konfigurasi lingkaran silindris (seperti penampang *elbow 90°*). Dengan berkurangnya *drag force*, terjadi penurunan pada *head loss minor* sehingga nilai *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin mengecil.

Beberapa penelitian eksperimen sebelumnya oleh **Sutardi dkk [2010]** menunjukkan pengaruh pada *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 vanes* 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* 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 oleh **Farich [2016]** secara eksperimen pada *square duct* dengan menambahkan *single guide vane* pada *elbow 90°*, selain itu pada pipa sisi *downstream duct* divariasikan bukaan *dampner* sebesar 0° , 10° , 20° , 30° yang diputar secara *CCW* dengan Re_{Dh} $7,88 \times 10^4$. Hasil dari eksperimen tersebut variasi sudut 30° menunjukkan hasil yang efektif dalam proses *recovery* aliran pada akhir *section* dan mampu menghilangkan aliran balik (*backflow*) pada *inner outlet elbow 90°*. Sedangkan nilai *coefficient losses elbow 90°* semakin rendah seiring bertambahnya nilai *reynolds number* pada setiap bukaan sudut *dampner*.

Penelitian yang dilakukan oleh **Rizkia Putra P. [2017]** secara eksperimen pada *square duct* dengan menambahkan *cylinder disturbance body* pada sisi *upstream duct*. Hasilnya pada variasi gap $(g/d)=0,2$ dapat menurunkan *pressure drop* (Δp) sebesar 20,52%. Penurunan Δp paling efektif terjadi pada bilangan Reynolds (Re_{Dh}) $8,74 \times 10^4$. Penurunan terjadi karena meningkatnya momentum aliran sehingga lebih mampu melawan *adverse pressure* di sisi *inner elbow 90°*. Selain itu pada posisi yang sama nilai *coefficient losses elbow 90°* mengalami penurunan seiring menurunnya nilai *pressure drop* tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berkaca pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, secara eksperimental maupun pemodelan numerik tentang upaya 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* dapat direduksi dengan menempatkan bodi pengganggu (*disturbance body*) berbentuk silinder sirkular yang ditempatkan pada sisi *upstream duct*, sebelum aliran memasuki *elbow 90°*. Interaksi aliran dengan *cylinder disturbance body* tersebut diharapkan dapat menghasilkan

intensitas turbulensi yang semakin kuat dan digunakan untuk meningkatkan momentum aliran yang semakin turbulen pada sisi *inner elbow*, dan diharapkan dapat menunda separasi akibat tegangan geser pada dinding maupun *adverse pressure*.

Penambahan *guide vane* pada *elbow 90°* sebagaimana penelitian secara eksperimen yang telah dilakukan oleh **Sutardi, dkk (2010)** pada bilangan *Reynolds* yang rendah mampu mereduksi nilai *pressure drop*, namun pada bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi gagal untuk mereduksi nilai *pressure drop*. Kemudian dapat dirumuskan sebuah ide baru yaitu dengan kombinasi penempatan *disturbance body* pada *upstream duct* dekat dinding searah *inner elbow 90°* dan penambahan *guide vane* pada, yang dialiri fluida menggunakan berbagai variasi bilangan *Reynolds* dengan basis diameter hidrolis *duct*, diharapkan dapat memberikan informasi berkenaan dengan upaya untuk mereduksi *pressure drop* pada saluran udara berpenampang bujur sangkar tersebut.

Penempatan bodi pengganggu berbentuk silinder sirkular atau disebut *cylinder disturbance body (CBD)* pada *upstream duct* dekat dinding searah *inner elbow 90°* ($g/D_h = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; \text{ dan } 0,5$) jarak gap ($l/D_h = 0,5$ (konstan), serta *elbow 90°* dengan $R/D_h = 1,5$ dengan tambahan *single guide vane*. Kombinasi kedua hal tersebut selanjutnya divariasikan dengan kecepatan aliran dari 2 sampai dengan 20 m/s atau pada bilangan *Reynolds* ($1,59 \times 10^4 < Re_{Dh} < 1,59 \times 10^5$). Fenomena interaksi aliran pada saluran udara berkaitan dengan variasi tersebut, maka dapat akan ditampilkan dalam bentuk data mengenai *pressure drop* keseluruhan instalasi, *upstream duct*, *elbow 90°*, *downstream duct*, distribusi koefisien tekanan pada sisi *inner* dan *outer elbow 90°*, serta profil kecepatan pada *upstream duct* dan *downstream duct* pada beberapa posisi.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan agar tidak melebar dari tujuan awal dan untuk memudahkan perhitungan. Adapun batasan masalah sebagai berikut:

1. Fluida kerja adalah udara dengan profil kecepatan udara uniform pada sisi *inlet*, bersifat *incompressible*, *viscous* dan *steady*.
2. Perpindahan panas akibat gesekan antara udara dengan dinding saluran dapat diabaikan.
3. Kekasaran pada permukaan pada dinding diabaikan.
4. Aliran yang melintasi saluran udara merupakan aliran turbulen.
5. Temperatur fluida didalam saluran udara (*ducting*) diasumsikan konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh interaksi aliran antara *cylinder disturbance body* (CDB) dengan kelengkungan *elbow 90°* yang terpasang *single guide vane* pada penampang bujur sangkar (*square duct*). Adapun tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui *pressure drop* antara *upstream* dan *downstream square duct*.
2. Mengetahui *coefficient losses minor* pada *elbow 90°*.
3. Mengetahui *pressure coefficient* (C_p) pada *elbow 90°*.
4. Mengetahui profil kecepatan *downstream square duct* pada posisi vertikal dan horizontal

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini sebagai berikut:

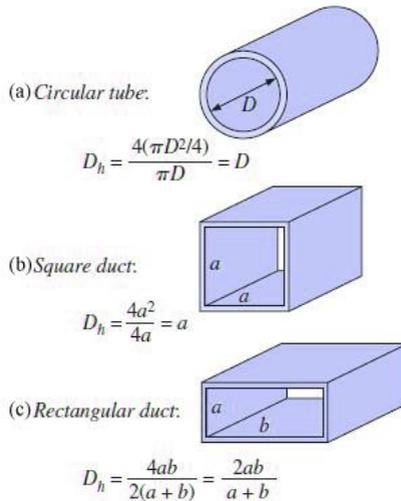
1. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* yang terjadi pada *upstream duct*, *elbow 90°* dan *downstream duct* dengan dan tanpa *cylinder disturbance body* (CDB) pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *cylinder disturbance body* pada *elbow 90°* dengan adanya *single guide vane*.
2. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* yang dipasang *Cylinder Disturbance Body* pada sisi *upstream duct* yang divariasikan terhadap g/Dh sebesar 0,1 ;0,2 ;0,3 ;0,4 dan 0,5. Memberikan penjelasan tentang distribusi *loss coefficient minor* dan *coefficient pressure (C_p)* pada *elbow 90°* dengan dan tanpa *cylinder disturbance body* serta menggunakan variasi gap pada bilangan Reynolds sebesar $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$.
3. Memberikan informasi tentang fenomena perubahan distribusi profil kecepatan aliran pada sisi *downstream duct* pada posisi vertikal dan horizontal yang telah dipasang CDB pada sisi *upstream duct* dengan penambahan *single guide vane* pada *elbow 90°*.

BAB II DASAR TEORI

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

2.1 Sistem Saluran Udara (*Ducting*)

Pada umumnya *ducting* merupakan suatu benda yang berbentuk *square* (bujursangkar) dan *round* (spiral) yang berfungsi sebagai media untuk mendistribusikan fluida yang bersifat udara dari suatu tempat ke tempat lainnya. *Ducting* juga dapat diartikan suatu benda kotak atau spiral yang berfungsi untuk mensirkulasikan sejumlah udara dari suatu ruangan dengan bantuan alat *fan unit/ blower*, serta *AC central* dengan menggunakan sistem resirkulasi (*return air*).



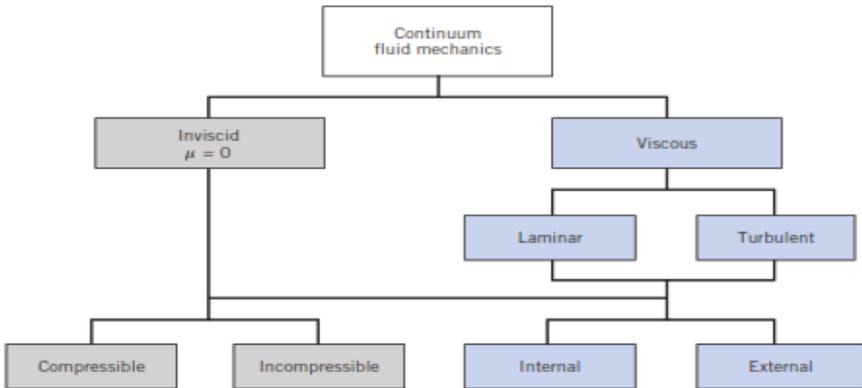
Gambar 2.1 Macam – macam bentuk *ducting* (a) *Circular Tube*
(b) *Square Duct* (c) *Rectangular Duct*
(Cengel dan Cimbala, 2006)

Bahan yang digunakan untuk membuat *ducting* jenisnya bermacam-macam, ada yang terbuat dari bahan *PVC*, *mild steel*, BJLS (baja lapis seng), *PU (Polyurethane)*, untuk *ducting* yang terbuat dari bahan *PU (Polyurethane)* tidak perlu menggunakan lapisan luar tambahan karena didalam lapisannya sudah tersedia dari pabrikan hanya untuk lapisan dalamnya saja yang terdapat didekat unit menggunakan bahan *glassclotch*.

Selain itu, terdapat berbagai macam fungsi *ducting* dalam penggunaannya dalam kehidupan sehari – hari, antara lain sebagai *supply* udara dingin ke ruangan 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 agar tidak terbuang, sedangkan untuk *ducting fresh air* dan *exhaust air* ini tidak menggunakan insulasi, lapisan dari insulasi ini antara lain : *Glasswool*, *Alumunium Foil*, *Spindle pin/ pengikat/ tali/ flinkote*. Sedangkan untuk lapisan *ducting* didekat unit *AC Indoor* (untuk *AC Split*) atau Unit *Air Handling Unit* (sistem *central*) biasanya bagian dalamnya menggunakan *glasswool* dan *glassclotch*, untuk meredam bunyi yang nyaring dari unit.

2.2 Klasifikasi Aliran Fluida

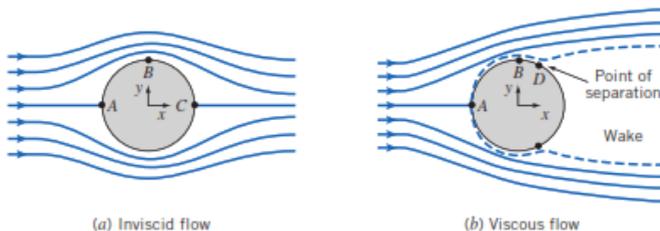
Dalam pengamatan suatu aliran fluida dapat diasumsikan dengan pengamatan pada suatu titik tertentu dan apabila titik tersebut diperbesar akan tampak seperti kubus yang didalamnya berisi molekul-molekul gas. Maka dari itu fluida harus diasumsikan sebagai “*Fluid as continuum*”, dan sebagai konsekuensinya bahwa seluruh *properties* fluida merupakan suatu fungsi dari kedudukan dan waktu. Klasifikasi jenis fluida diilustrasikan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi fluida berdasarkan jenis alirannya (Fox dan Mc. Donald, 2011)

2.2.1 Aliran *Inviscid* dan *Viscous*

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*.



Gambar 2.3 Ilustrasi aliran fluida *inviscid* dan *viscous* (Fox dan Mc. Donald, 2011)

Aliran *viscous* merupakan aliran yang dipengaruhi oleh viskositas dari fluidanya. Viskositas fluida mempengaruhi aliran udara karena fluida yang mengalir akan bergesekan dengan dinding. Ilustrasi suatu aliran fluida yang mengalir melewati permukaan bola ditunjukkan pada gambar 2.3. Titik A dan C menunjukkan titik stagnasi. Pada titik A dan C, kecepatan aliran fluida sebesar nol sehingga tekanan terbesar terdapat pada kedua titik tersebut. Sedangkan pada titik 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 biasa disebut dengan fenomena *advers pressure*.

2.3 Karakteristik Aliran Melalui Saluran Dalam Pipa

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*.

2.3.1 Aliran Laminar

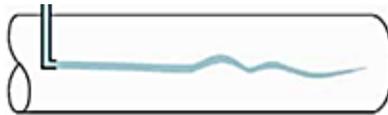
Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan–lapisan atau lamina–lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Aliran laminar ini mempunyai nilai bilangan *Reynolds* kurang dari 2300 ($Re \leq 2300$).



Gambar 2.4 Aliran Laminar (Munson et al, 2002)

2.3.2 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 Reynolds-nya antara 2300 sampai dengan 4000 ($2300 \leq Re \leq 4000$).



Gambar 2.5 Aliran Transisi (Munson et al, 2002)

2.3.3 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 Reynoldsnya lebih besar dari 4000 ($Re \geq 4000$).



Gambar 2.6 Aliran Turbulen (Munson et al, 2002)

Kondisi aliran *laminar* atau *turbulent* dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds* untuk aliran *incompressible*. Jenis lapis batas yang terjadi pada aliran udara yang mengalir suatu obyek juga sangat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* (Re). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas gaya geser dan gaya inersia sangat penting, sementara bilangan *reynolds* sendiri menggambarkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geser.

$$Re = \frac{\text{Gaya inertia}}{\text{Gaya geser}} \quad (2.1)$$

dimana : Gaya Inersia = $p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2$

Gaya Geser = $\tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2$

Sehingga untuk aliran internal diameter hidrolis (D_h) digunakan untuk perhitungan saluran tak bundar. Diameter hidrolis dapat didefinisikan sebagai berikut :

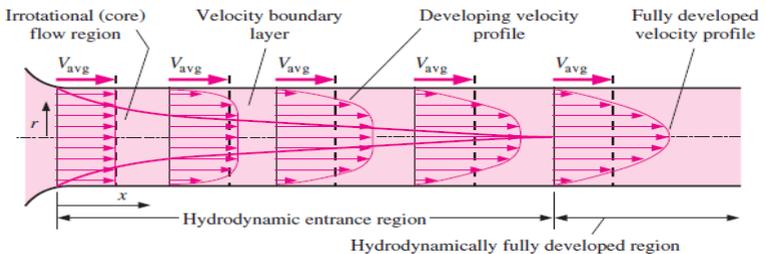
$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (2.2)$$

dimana : A = Luas penampang
 P = keliling penampang

Sehingga, $Re_{D_h} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu}$ (2.3)

dimana : Re = bilangan *Reynolds*
 U_{ref} = kecepatan aliran *fluida* (m/s)
 D_h = diameter dalam saluran (m)
 μ = viskositas kinematis *fluida* (Nm/s²)

2.3.4 Aliran Berkembang Penuh (*Fully Developed Flow*)



Gambar 2.7 Profil kecepatan untuk aliran di dalam penampang lurus

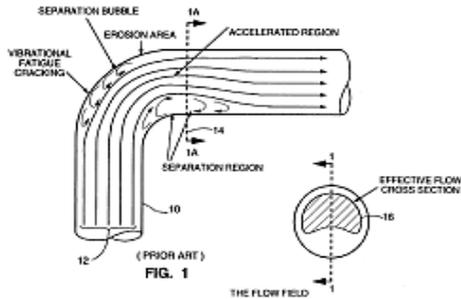
(Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

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.

2.3.5 Separation Flow Pada Elbow 90°

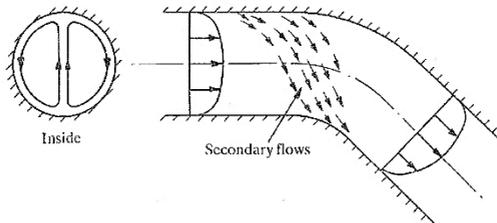
Pada gambar 2.8 merupakan visualisasi terjadinya separasi aliran yang dapat menimbulkan terjadinya kerugian *pressure drop*. Hal tersebut disebabkan oleh adanya hubungan antara aliran dengan dinding *elbow* sehingga terjadi *friction loss* yang dapat mengurangi momentum dari aliran. Momentum aliran yang semakin kecil akan menambah ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient* sehingga juga akan mengurangi kecepatan aliran dan terbentuknya *vortex* di sekitar dinding *elbow*. *Adverse pressure gradient* sendiri ialah meningkatnya tekanan yang searah dengan arah aliran. Terbentuknya *vortex* tersebut akan berakibat pada mengecilnya luasan penampang aliran utama yang menyebabkan aliran mengalami percepatan dan menyebabkan terjadinya *pressure drop*.



Gambar 2.8 Terjadinya separasi aliran pada dinding *Elbow 90°* (Miller, 1990)

2.3.6 *Secondary Flow* pada *Elbow 90°*

Secondary flow terjadi karena adanya perbedaan distribusi tekanan yang terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*, tekanan statis akan semakin besar pada sisi *outer wall*. Oleh karena itu, aliran yang melewati elbow tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama, sehingga terjadilah aliran sekunder (*secondary flow*). Pada *square elbow* memiliki ciri yang berbeda dibandingkan dengan *circular elbow*, yaitu terjadinya *secondary flow* pada sisi sudut. Pada *circular elbow*, tidak dijumpai fenomena *boundary layer* pada sisi samping dan bawah, namun pada *square elbow* hal tersebut dapat dijumpai. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi samping dan bawah tersebut yang menyebabkan terjadinya *secondary flow*.



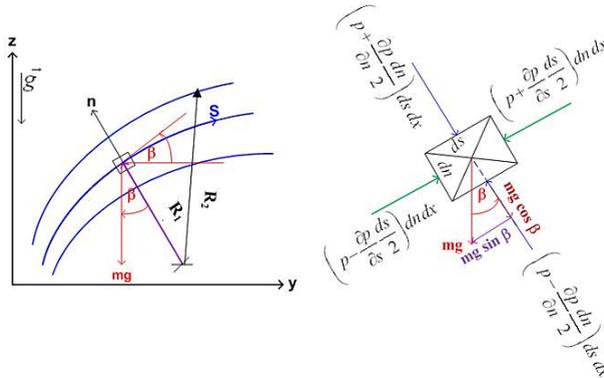
Gambar 2.9 Terjadinya *secondary flow* pada *Elbow 90°* (Miller, 1990)

2.4 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*.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.4)$$

Untuk memperjelas, dapat dilihat aliran pada bidang *yz* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 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 2.10 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Persamaan Euler di sepanjang *streamline* ke arah s , untuk *steady flow* dan mengabaikan *body forces*, dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) 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.

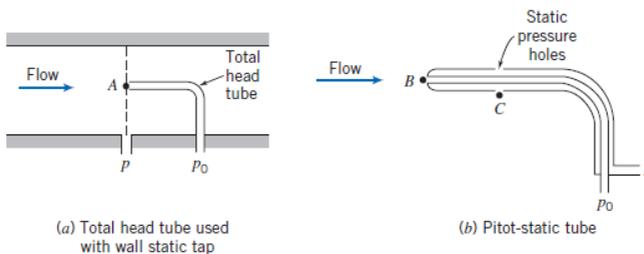
Persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) 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.

2.5 Tekanan Stagnasi, Tekanan Statis, dan Tekanan Dinamis

Tekanan yang diukur dengan suatu alat, yang bergerak bersama partikel fluida dengan kecepatan relatif alat ukur terhadap aliran dinamakan tekanan statis. Pengukuran tekanan statis



biasanya menggunakan *wall pressure tap*, kecepatan aliran fluida pada permukaan dinding saluran fluida akan bernilai nol karena aliran fluida telah berkembang penuh (*fully developed flow*).

Gambar 2.11 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis
(Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Tekanan stagnasi dapat didefinisikan sebagai tekanan yang diukur pada titik stagnasi, dimana kecepatan pada titik stagnasi tersebut adalah nol. Persamaan Bernoulli dapat diterapkan pada aliran kompresibel untuk sepanjang suatu *streamline*, yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = \text{konstan} \quad (2.7)$$

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

$$P_o = P + \frac{U^2}{2} \rho \quad (2.8)$$

Tekanan dinamis merupakan selisih antara tekanan stagnasi dengan tekanan statis.

$$P_o - P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.9)$$

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

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,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.10)$$

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 loss* sangat merugikan dalam aliran fluida di dalam sistem pemipaan, karena *head loss* dapat menurunkan tingkat efisiensi aliran fluida.

Salah satu penyebab *head loss* 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 loss*) ialah dapat menyebabkan besarnya energi yang

dibutuhkan untuk menggerakkan aliran fluida yang berdampak meningkatnya penggunaan listrik pada mesin penggerak fluida seperti pompa.

Persamaan *Bernoulli* untuk fluida sesungguhnya menggambarkan keseimbangan energi, dengan mengikutsertakan kerugian-kerugian energi yang terjadi di dalam persamaan tersebut.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \sum H_{LT} \quad (2.11)$$

Dimana : P = Tekanan statis (Pa)

\bar{V} = Kecepatan aliran $\left(\frac{m}{s}\right)$

z = Ketinggian fluida (m)

ρ = Massa jenis fluida $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

g = Percepatan gravitasi $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

H_{LT} = Head loss total (m)

α = Koefisien energi kinetik

Jika diameter sepanjang aliran tetap dan perbedaan ketinggian dianggap sangat kecil, maka untuk mencari *head loss* dapat dicari dengan:

$$\sum H_{LM} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (2.12)$$

2.7.1 Head Loss Mayor

Head loss 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 horizontal, maka penurunan tekanan dapat dihitung secara analitis, yaitu:

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{D} \quad (2.13)$$

Substitusi dari persamaan , didapatkan:

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{\rho D} = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2.14)$$

Dimana: $h_{lm} = \text{head loss minor}$ (m)

Dan koefisien gesekan (f) untuk aliran laminar adalah:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.15)$$

b. Turbulen

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

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.16)$$

Dimana f (koefisien gesek) didapat dari hasil eksperimen dan dipengaruhi oleh bilangan *Reynolds* (*Re*) dan kekasaran permukaan relatif $\left(\frac{e}{D} \right)$.

2.7.2 Head Loss Minor

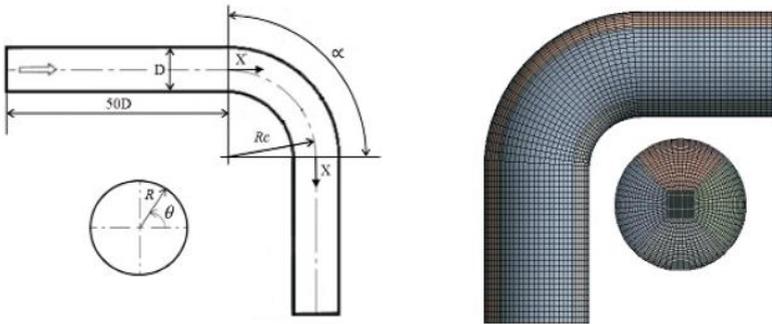
Head loss minor (rugi minor) adalah besar nilai kehilangan energi aliran fluida di dalam pipa yang disebabkan oleh perubahan luas penampang jalan aliran, *entrance*, *fitting*, dan lain sebagainya. Rugi minor adalah rugi yang disebabkan gangguan lokal seperti pada perubahan penampang, adanya katub, belokan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

$$h_{lm} = K \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.17)$$

Dimana : $h_{lm} = \text{head loss minor (m)}$

2.8 Penelitian Terdahulu

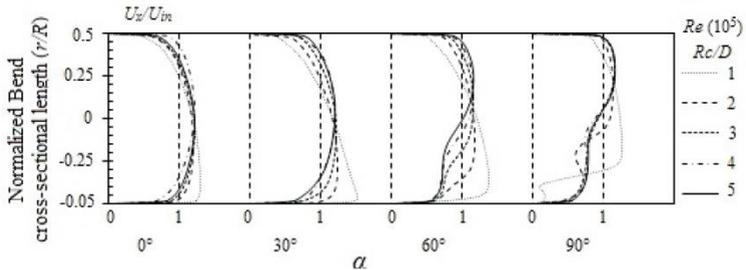
Dutta dan Nandi (2015) melakukan studi eksperimen dan numerik tentang pengaruh *Reynolds Number* dan *Curvature Ratio* pada aliran turbulen dalam pipa melengkung. Pada penelitian ini, aliran turbulen mengalir melalui saluran sirkular dengan pipa melengkung 90° (*elbow* 90°) menggunakan *curvature ratio* ($Rc/D = 1$ sampai 5) dengan memiliki diameter inner yang sama yaitu 0,01 m serta menggunakan panjang *inlet* $50D$ dan panjang *outlet* $20D$, dimana Rc adalah radius kelengkungan dan D adalah diameter pipa serta menggunakan bilangan Re dari 1×10^5 sampai 10×10^5 .



Gambar 2.12 Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya
(**Dutta dan Nandi, 2015**)

Dari penelitian ini didapatkan bahwa untuk nilai Re yang semakin tinggi, maka pengaruh kelengkungan akan menurun. Kecenderungan separasi aliran akan meningkat untuk lengkungan dengan *curvature ratio* yang rendah serta kemampuan melawan

unsteady dan *complex flow* akan meningkat untuk lengkungan dengan *curvature ratio* yang tinggi.



Gambar 2.13 *Velocity profile* pada sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° dengan variasi *curvature ratio* ($R_c/D = 1 - 5$) (Dutta dan Nandi, 2015)

Gambar 2.13 adalah *velocity profile* untuk variasi 5 jenis *curvature ratio* ($R_c/D = 1 - 5$) dengan menggunakan *Reynolds Number* ($Re = 1 \times 10^5$). Pada outlet elbow ($\alpha = 90^\circ$), terdapat aliran balik sebagai akibat dari *adverse pressure* pada outlet elbow dimana memiliki momentum aliran yang lebih rendah daripada momentum pada *freestream*, yang mana menurunkan kecepatan pada dekat dinding dan *boundary layer thickness*. Selain itu juga didapati bahwa percepatan yang lebih tinggi terjadi pada *curvature ratio* yang rendah.

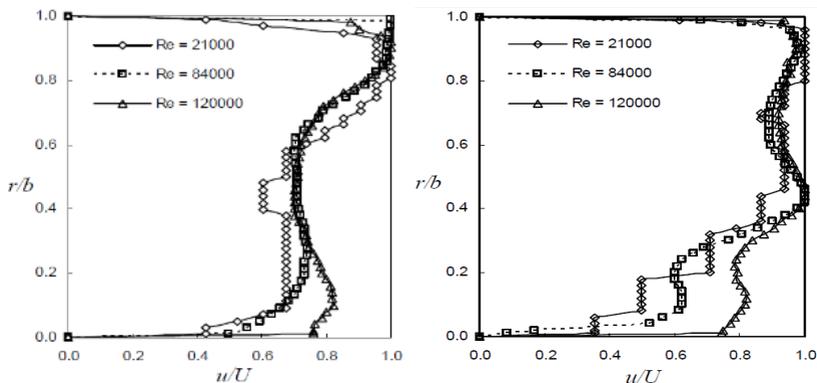
Sutardi dkk (2010) melakukan penelitian secara eksperimen pada sebuah elbow. Elbow yang digunakan berbentuk *rounded* dan *rectangular* dengan 4 variasi pemasangan guide vane yaitu tanpa guide vane, satu guide vane, dua guide vane, dan tiga guide vane. Re_{dh} aliran yang melalui elbow divariasikan menjadi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

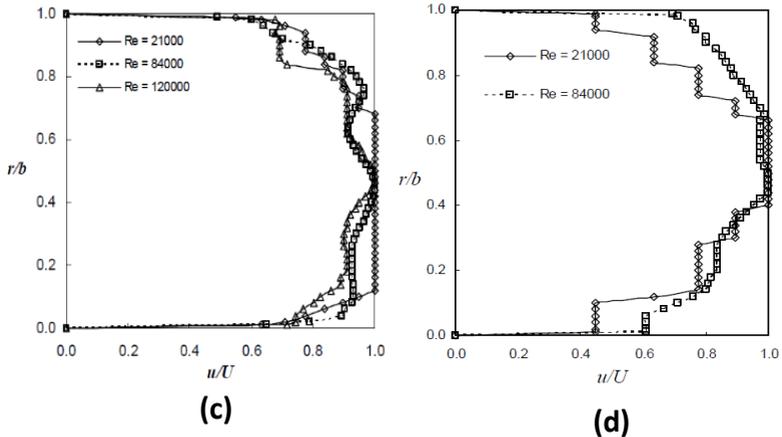
Sedangkan untuk profil kecepatan lokasi *downstream* pada elbow dengan 4 variasi pemasangan guide vane yaitu tanpa guide vane, satu guide vane, dua guide vane, dan tiga guide vane ditunjukkan pada gambar 2.12. Lokasi *downstream* adalah $3Dh$ dari ujung guide vanes. Untuk semua konfigurasi elbow, tanpa guide vane, dengan satu, dua, atau tiga guide vanes, profil kecepatannya dipengaruhi oleh nilai Re_{dh} . Profil kecepatan



(a)

(b)

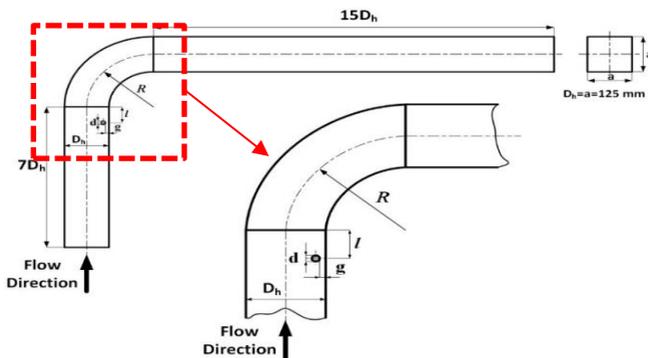
berkembang pada nilai Re_{dh} yang tinggi, hal ini disebabkan karena alirannya lebih turbulen.



Gambar 2.14 Profil kecepatan pada elbow (a) tanpa guide vane, (b) 1 guide vane, (c) 2 guide vane, (d) 3 guide vane (Sutardi dkk, 2010)

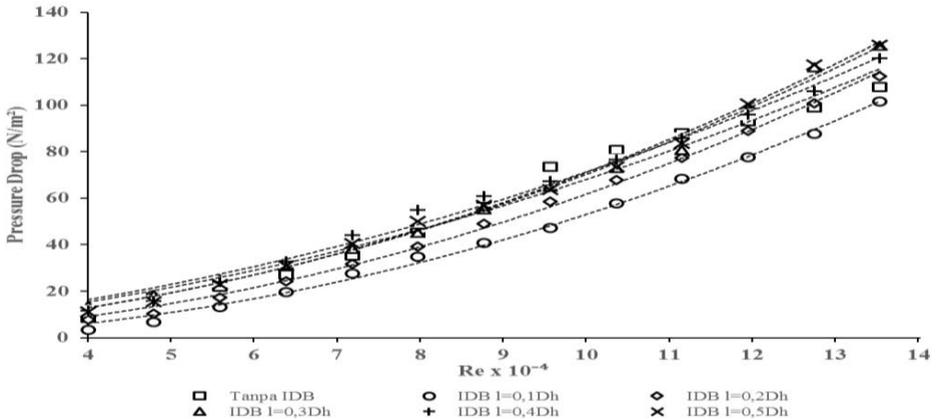
Profil kecepatan elbow tanpa guide vane pada gambar 2.12 (a) saat $Re_{dh} = 12 \times 10^5$ lebih berkembang dibandingkan saat $Re_{dh} = 2,1 \times 10^4$ dan $8,4 \times 10^4$. Untuk elbow dengan satu guide vane pada gambar 2.12 (b) profil kecepatannya lebih berkembang daripada elbow tanpa guide vane 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 2.12 (d). Pada gambar 2.12 (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

Aqhfa (2017) melakukan penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square ducting* dengan model saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*) dengan $D_h = 125 \text{ mm}$ yang terdiri dari : *upstream duct (straight duct)* dengan panjang $7D_h$, *Inlet Disturbance Body* dengan $D = 12,5 \text{ mm}$, *elbow 90°*, dan dilengkapi *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 $0,1D_h$ 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 *pressure drop elbow 90°* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* berupa nilai *pressure coefficient*, koefisien *loss minor elbow 90°* pada variasi nilai Re_{D_h} sebesar $3,94 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$.



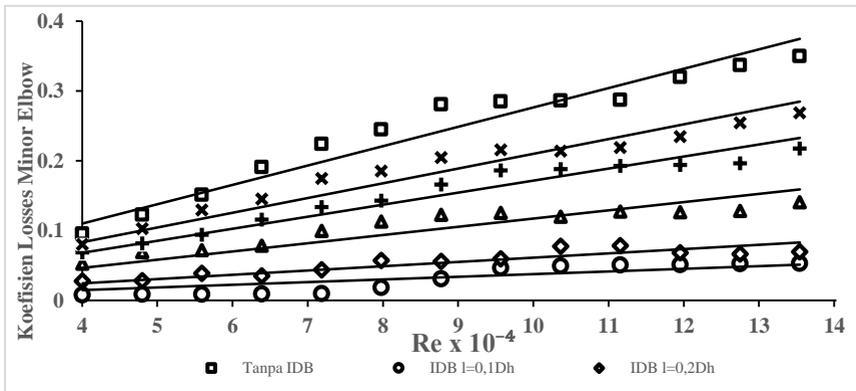
Gambar 2.15 Skema Instalasi Penelitian (Aqhfa, 2017)

Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa penempatan jarak *inlet disturbance body* efektif untuk proses *recovery* aliran dan menanggulangi timbulnya *secondary flow*. Penempatan *inlet disturbance body* pada saluran dengan jarak $0,1D_h$ merupakan jarak paling efektif untuk meningkatkan intensitas turbulensi dan menurunkan *pressure drop*. Secara fungsi Reynolds Number, jarak *inlet disturbance body* $0,1D_h$ memiliki nilai *koefisien losses elbow 90°* paling rendah.



Gambar 2.16 *Pressure drop* pada *square duct* dengan *square elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak *inlet disturbance body* $0,1D_h - 0,5D_h$ (Aqhfa, 2017)

Dari grafik gambar 2.16 dapat dilihat 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 *Reynolds Number* pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*. Secara fungsi *Reynolds Number*, jarak *inlet disturbance body* $0,1D_h$ memiliki nilai *koefisien losses elbow 90°* paling rendah .

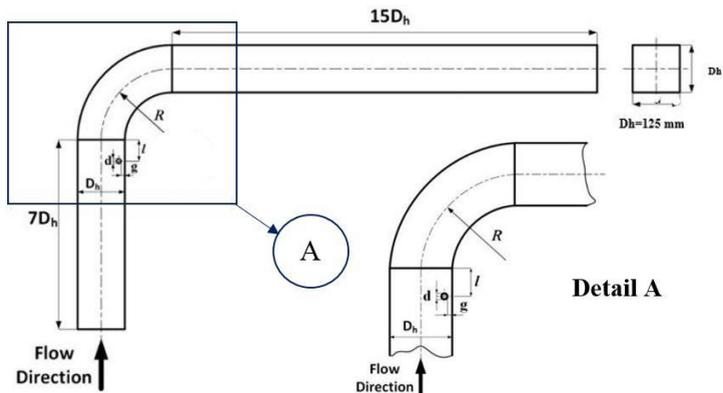


Gambar 2.17 Koefisien *Losses Elbow 90°* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak *inlet disturbance body* $0,1D_h - 0,5D_h$ (Aqhfa, 2017)

Dari gambar 2.17 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds number* maka akan semakin meningkat pula nilai *koefisien losses elbow 90°* yang terjadi pada masing-masing pada masing-masing jarak peletakan *inlet disturbance body*. Sehingga dapat dikatakan jika kecepatan dari suatu fluida meningkat, maka *koefisien losses elbow 90°* akan meningkat.

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 Reynolds (Re_{Dh}) $8,74 \times 10^4$. Untuk mendapatkan *pressure coefficient elbow 90°*, pengujian dilakukan pada bilangan Reynolds (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.

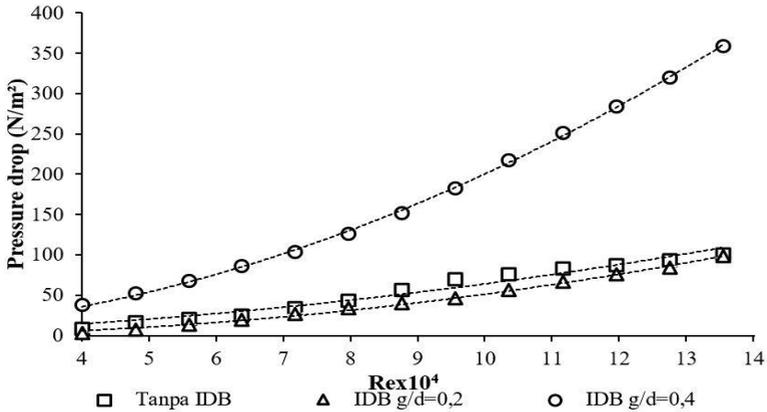


Gambar 2.18 Sketsa *test section* (pandangan atas) (Rizkia , 2017)

Spesifikasi dari *square duct* sebagai berikut :

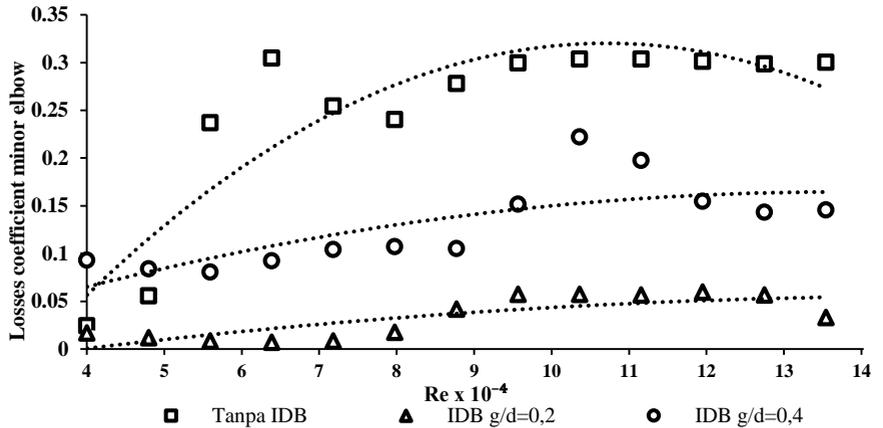
- Bentuk penampang : Persegi
- Bahan : Akrilik
- Tebal (*ducting*) : 8 mm
- L_m (panjang total *garis tengah elbow 90°*) : 2973,12 mm
- L_i (*upstream duct*) : 750 mm
- L_o (*downstream duct*) : 2125 mm
- R (*centerline elbow 90° radius*) : 187,5 mm
- D_h (*diameter hidrolis*) : 125 mm
- l (*jarak IDB 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 2.19 *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 2.19 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 2.20 *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 2.24 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.

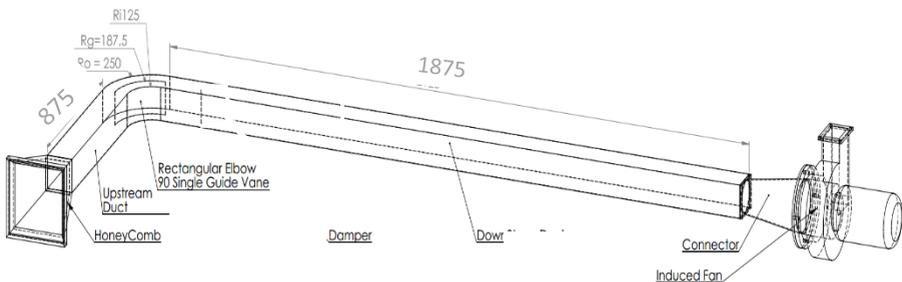
BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini dibahas metode penelitian yang digunakan, yaitu metode penelitian secara eksperimen untuk menganalisa karakteristik suatu aliran dalam *square ducting* dan *square elbow 90°* dengan rasio kelengkungan ($R/Dh = 1,5$) dengan terdapat *single guide vane* pada *centerline square elbow 90°*.

Variasi pada eksperimen kali ini menggunakan sebuah bodi pengganggu (*Cylinder Disturbance Body*) dengan diameter 6 mm dan tinggi 125 mm yang diletakkan pada posisi $l/Dh = 0,5$ dari *inlet elbow* didalam *inner upstream duct* dengan variasi gap pada $g/Dh = 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4$ dan $0,5$. Pembahasan meliputi instalasi dan test section penelitian, peralatan pendukung penelitian, analisa dimensi, prosedur pengambilan data, serta langkah-langkah dalam pengelolaan data.

3.1 Skema Penelitian

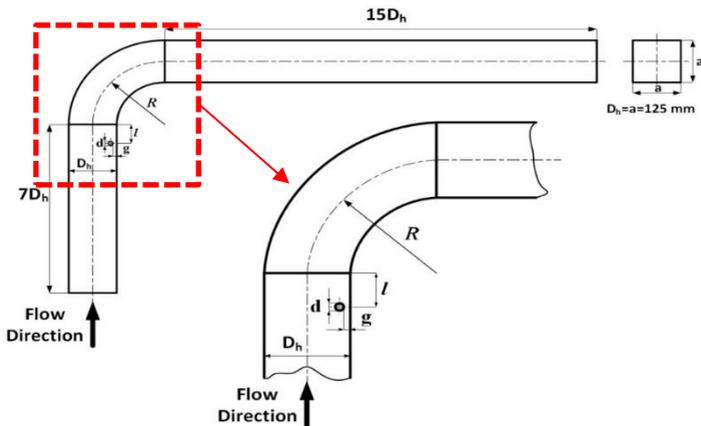
Skema instalasi penelitian berupa benda uji (*test section*) berpenampang bujur sangkar (*square duct*) secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.1. Peralatan pendukung instalasi meliputi *honey comb*, *upstream duct*, *elbow 90°* dengan ditambahkan *single guide vane*, *downstream duct*, dan *cylinder disturbance body*.



Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian

Penelitian menggunakan *square ducting* dan *square elbow 90°* ini dimaksudkan untuk dapat menguji benda dalam skala model. Hal ini disebabkan sulitnya membuat instalasi dengan skala sebenarnya serta membutuhkan biaya relatif mahal . Oleh sebab itu, dirancanglah instalasi peralatan *square ducting* dan *square elbow 90°* semirip mungkin sehingga menghasilkan data yang cukup akurat dan memadai dengan kondisi riilnya.

Square ducting yang digunakan dalam percobaan ini bertipe *open circuit*, dimana udara yang masuk melalui *honey comb* akan diteruskan melalui *upstream duct*, *elbow 90° with single guide vane*, *downstream duct* , dan dikeluarkan melalui *centrifugal fan*.



Gambar 3.2 Model Uji Penelitian

Spesifikasi *square ducting* :

- Bahan : *Acrylic*
- Tebal (*ducting*) : 8 mm
- D_h (diameter hidrolik) : 125

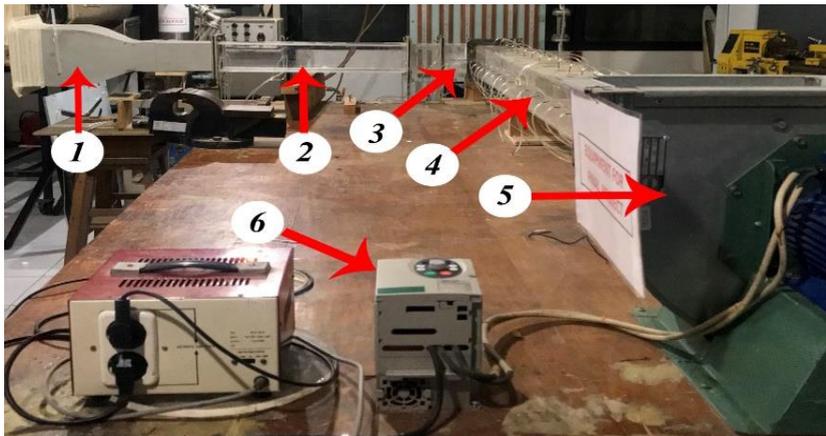
mm

- L_i (*upstream straight duct*) : 875 mm
- L_o (*downstream straight duct*) : 1875 mm

- R_m (centerline elbow 90° radius) : 187,5 mm
- R_i (inner radius) : 125 mm
- R_o (outer radius) : 250 mm
- R_g (guide vane radius) : 187,5 mm
- l (jarak CDB dari inlet elbow 90°) : 62,5 mm
- d (diameter CDB) : 6 mm
- g (gap CDB dari dinding inner upstream): $0,1D_h$; $0,2D_h$; $0,3D_h$; $0,4D_h$ dan $0,5D_h$

3.2 Peralatan Pendukung Penelitian

Peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian, yaitu *honey comb*, *nozzle*, *square duct*, *cylinder disturbance body*, *centrifugal fan*, *inverter* dan berbagai macam alat ukur.



Gambar 3.3 Instalasi Penelitian

- Keterangan :
1. *Honeycomb, Screen, & Nozzle*
 2. *Upstream Duct*
 3. *Elbow 90° dengan single guide vane*
 4. *Downstream Duct*
 5. *Centrifugal Fan*
 6. *Inverter*

3.2.1 *Honey Comb, Screen dan Nozzle*

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



Gambar 3.4 *Honey Comb ,Screen & Nozzle*

3.2.2 *Centrifugal Fan*

Pada penelitian ini digunakan 1 buah *centrifugal fan* yang berfungsi untuk menghisap udara seperti pada gambar berikut :



Gambar 3.5 *Centrifugal Fan*

- Merk : *Vanco Direct Centrifugal Fan*
- *Type* : VDC/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

3.2.3 Inverter

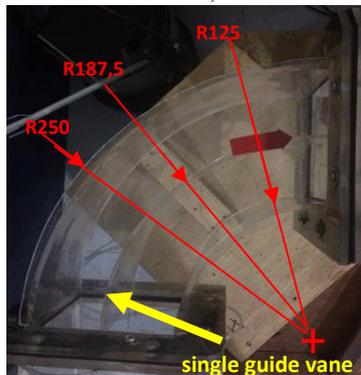
Pada penelitian kali ini digunakan sebuah *Inverter* yang berfungsi memberikan input berupa frekuensi (*Hz*) kemudian dikonversikan menjadi putaran oleh *centrifugal fan*.



Gambar 3.6 *Inverter*

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 3.7 *Elbow 90° dengan Single Guide Vane*

3.2.5 *Cylinder Disturbance Body*

Bodi pengganggu pada penelitian kali ini menggunakan bentuk silinder dengan diameter sebesar 6 mm dan tinggi sebesar 125 mm seperti tampak pada gambar 3.8 *Cylinder Disturbance Body* diletakkan pada bagian *upstream duct* di sisi *inner* dengan posisi $l/Dh=0,5$ dari *inlet elbow 90°* pada variasi $g/Dh = 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4$ dan $0,5$.



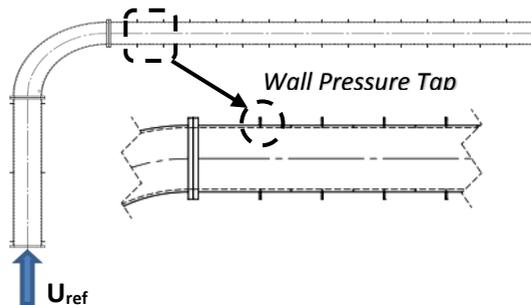
Gambar 3.8 *Cylinder Disturbance Body*

3.2.6 Alat Ukur

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

1. *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 3.9 Skema pemasangan *wall pressure tap*

Posisi pemasangan *wall pressure tap* pada benda uji secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.8. *Wall pressure tap* dipasang sepanjang *downstream straight duct* mulai dari *outlet elbow 90°* pada setiap dinding *ducting* yang disusun secara paralel pada masing-masing *test section* yang berjarak 125 mm. Titik pengukuran tekanan statis dimulai pada titik yang berjarak 1250 mm dari *inlet upstream* sampai pada titik yang berjarak 3250 mm dari *inlet upstream*. Sedangkan *stagnation pitot tube* dipasang pada *centerline* tepat sejajar dengan *wall pressure tap*, dimana jarak antar *tap* adalah 125 mm.

Jumlah *wall pressure tap* disesuaikan dengan kondisi tekanan pada setiap section. Pada bagian *downstream straight duct* dipasang 15 *wall pressure tap*. Untuk mengetahui profil kecepatan aliran, maka *test section* dibagi menjadi 15 *section* yang akan dijadikan posisi peletakan *pitot tube*.

2. Pitot Tube

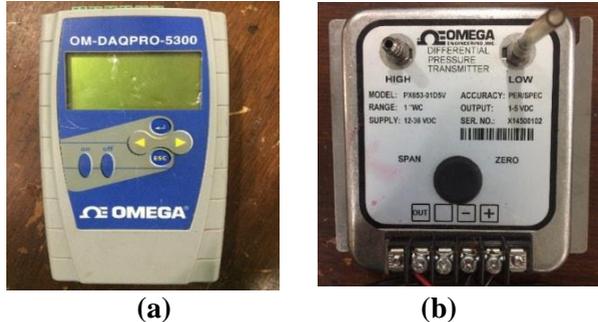
Alat ini berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis sekaligus tekanan stagnasi aliran fluida yang terdapat pada saluran maupun yang terletak dibelakang benda uji. Pergeseran titik



pengukuran secara horizontal maupun vertikal pada setiap *cross section* yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran tertentu.

Gambar 3.10 *Pitot Tube*

3. Transducer Tekanan dan Data Akuisisi



Gambar 3.11 (a) DAQ PRO 5300, (b) *Differential Pressure Transmitter*

Berikut spesifikasi *Differential Pressure Transmitter* yang akan digunakan dalam pengujian ini :

Untuk mengukur *velocity profile*, dan *coefficient of pressure* dan validasi tekanan dinamis :

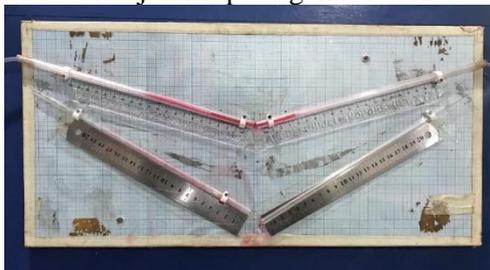
Model	: PX653 – 01D5V
Range	: $\pm 1''$ WC
Akurasi	: 0.25 % FS (Fullscale)
Output	: 1 – 5 VDC
Excitation	: 12 – 36 Vdc
Ser.no.	: X14500102

Sedangkan untuk mengukur *pressure drop*, *coefficient losses elbow*, dan validasi tekanan statis menggunakan :

Model : PX653 – 03D5V
 Range : $\pm 3''$ WC
 Akurasi : 0.25 % FS (Fullscale)
 Output : 1 – 5 VDC
 Excitation : 12 – 36 Vdc
 Ser.no. : X11450113

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 3.12.



(a)



(b)

Gambar 3.12 (a) *Inclined Manometer* ; (b) *Red Gage Oil*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Red Oil* (SG = 0,827)
- Kemiringan (θ) : 15°

3.3 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*. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran sepanjang *downstream duct*.

Δp : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m²)

ρ : massa jenis fluida (kg/m³)

μ : viskositas absolut fluida (kg/(m.s))

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

u : kecepatan local (m/s)

D_h : diameter hidrolis saluran (m)

R_i : *inner radius elbow 90°* (m)

R_o : *outer radius elbow 90°* (m)

R_g : *single guide vane radius* (m)

L_i : panjang *upstream duct* (m)

L_o : panjang *downstream duct* (m)

l : jarak antara *CDB* dari *inlet elbow 90°* (m)

d : diameter *cylinder disturbance body* (m)

g : gap antara *CDB* dan dinding *inner upstream duct* (m)

3.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk *Pressure Drop dan Velocity Profile* pada *Square Ducting*

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

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, R_i, R_o, R_g, L_i, L_o, l, d, g) \quad (3.1)$$

Menggunakan *Buckingham Pi-theorema* dengan parameter ρ, U_{ref} dan D_h diperoleh 10 grup tak dimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}$: coefficient tekanan
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan Reynolds
3. $\pi_3 = \frac{R_i}{D_h}$: perbandingan inner radius elbow 90° dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{R_o}{D_h}$: perbandingan outer radius elbow 90° dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{R_g}{D_h}$: perbandingan single guide vane radius dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{L_i}{D_h}$: perbandingan mean radius elbow 90° dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{L_o}{D_h}$: perbandingan panjang total outer searah streamline elbow radius elbow 90° dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak cylinder disturbance body dari inlet elbow 90° dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter cylinder disturbance body dengan diameter hidrolik
10. $\pi_{10} = \frac{g}{D_h}$: perbandingan gap cylinder disturbance body dari dinding sisi inner upstream duct dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\bullet \pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}) \quad (3.2)$$

$$\bullet \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_1 \left(\frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}, \frac{R_i}{D_h}, \frac{R_o}{D_h}, \frac{R_g}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{g}{D_h} \right) \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah $\frac{R_i}{D_h}$, $\frac{R_o}{D_h}$, $\frac{R_g}{D_h}$, $\frac{L_i}{D_h}$, $\frac{L_o}{D_h}$, $\frac{l}{D_h}$, dan $\frac{d}{D_h}$ sehingga

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{g}{D_h} \right) \quad (3.4)$$

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

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

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

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_3 \left(Re_{D_h}, \frac{g}{D_h} \right) \quad (3.6)$$

Untuk menghitung profil kecepatan dengan menggunakan *Reynolds number* konstan yaitu $9,52 \times 10^4$.

3.4 Langkah-Langkah Validasi

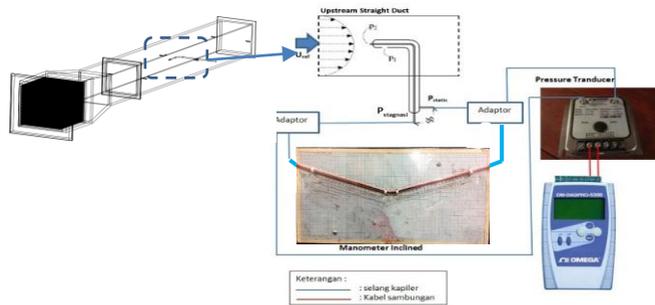
Validasi dilakukan sebanyak 2 kali yaitu pada pengambilan data tekanan statis dan dinamis. Peralatan yang digunakan, yaitu *inclined manometer*, *pressure transducer* 1” WC (untuk mengukur *velocity profile*), *pressure transducer* 3” WC (untuk mengukur *pressure drop* , *coefficient loss minor elbow* dan *coefficient pressure*), data akuisisi DAQ PRO 5300, dan *pitot static tube*.

Langkah-langkah validasi yang dilakukan sebelum pengambilan data pada penelitian sebagai berikut:

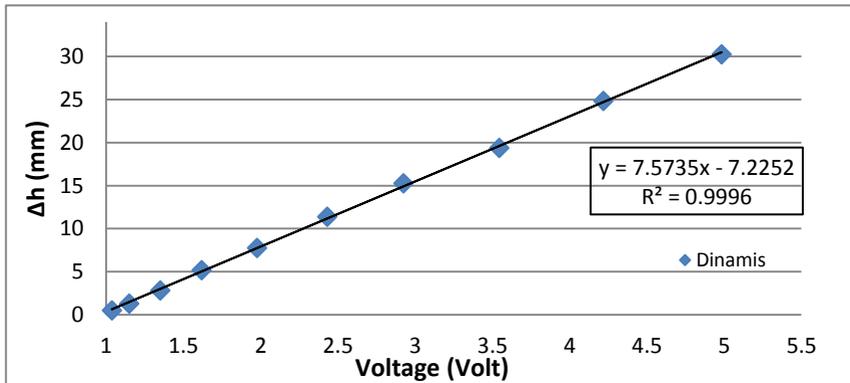
3.4.1 Validasi Tekanan Dinamis

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 dinamis.
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 dinamis *pressure transducer 1"WC*

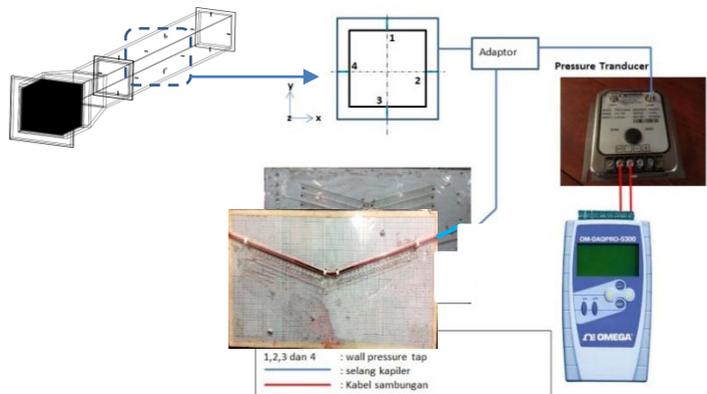


Gambar 3.14 Contoh hasil validasi tekanan dinamis dengan *pressure transducer 1"WC*

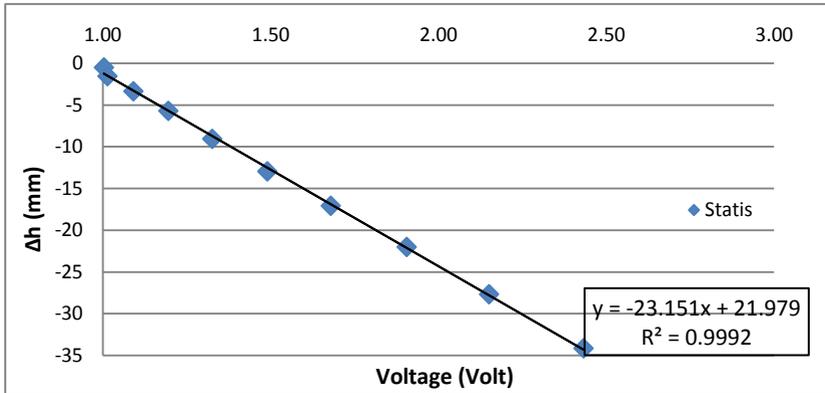
3.4.2 Validasi Tekanan Statis

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 aquisisi didapatkan *Voltage (Volt)*.
6. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



Gambar 3.15 Skema validasi tekanan statis *pressure transduser 3" WC*



Gambar 3.16 Contoh hasil validasi tekanan statis dengan *pressure transducer 3"WC*

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 terlebih dahulu.
- b) *Pitot tube* dipasang pada posisi yang ingin diukur.
- c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer 1"WC* dengan selang kapiler dan *adaptor*.
- d) Frekuensi *inverter* diatur mulai dari 0-50 Hz dengan kenaikan 5Hz untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
- e) Nilai *Voltage* yang terbaca di alat data akuisisi (*daqpro*) pada tekanan stagnasi dicatat.

- f) Langkah d) sampai e) diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.
 - g) *Inverter* dikembalikan pada putaran 0 Hz hingga *Blower* telah mati.
- 2) Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:
- a) *Test section* dipersiapkan terlebih dahulu.
 - b) *Wall pressure tap* dihubungkan dengan *pressure transducer* 3"WC dengan selang kapiler dan *adaptor*.
 - c) Frekuensi *inverter* diatur mulai dari 0-50 Hz dengan kenaikan 5Hz untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - d) Nilai *Voltage* yang terbaca di alat data akuisisi (*daqpro*) pada tekanan stagnasi dicatat.
 - e) Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* selanjutnya.
 - f) Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi $15D_h$ dari *inlet downstream 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 hidrolis (D_h) : 125 mm
- Panjang *downstream duct* : 1875 mm
- Panjang *inlet upstream - downstream Inner wall* (l_i) : 2875 mm
- *Outer wall* (l_o) : 3000 mm
- Sudut *inclined manometer* (θ) : 15°
- *Specific Gravity Red Oil* ($SG_{Red Oil}$) : 0,827

- Percepatan Gravitasi (g) : 9,81 m/s²
- Temperatur ruangan dianggap konstan (T) : 26,6°C
- Massa jenis udara pada $T = 26,6^\circ\text{C}$ (ρ_{ud}) : 1,1698 kg/m³
- Viskositas kinematis udara $T=26,6^\circ\text{C}$ (ν): 1,844x10⁻⁵ m²/s
- Massa jenis air pada $T = 26,6^\circ\text{C}$ (ρ_{H2O}) : 996 kg/m³

1) Perhitungan untuk *Reynolds Number*

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynolds* yang didapat melalui persamaan 3.7 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada *Reynolds Number* 1,585 x 10⁴.

$$Re_{DH} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.7)$$

Dimana:

- ρ_{ud} : massa jenis udara
- ν : viskositas kinematis udara pada $T = 26,6^\circ\text{C}$
- μ : viskositas absolut udara pada $T = 26,6^\circ\text{C}$
- U_{ref} : kecepatan freestream *inlet upstream duct*
- D_h : diameter hidrolis ducting

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 3.8 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{Red\ Oil} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 = SG_{Red\ Oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta y \cdot \sin 15^\circ$$

$$U_{ref}^2 = \frac{4 \cdot SG_{Red\ Oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta y \cdot \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}$$

$$U_{ref} = \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{Red\ Oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta y \cdot \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}} \quad (3.9)$$

dimana :

- $P_{dinamis}$: ($P_{stagnasi} - P_{statis}$) tekanan dinamis diukur dengan pitot tube (N/m^2)
- $\rho_{Red\ Oil}$: 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 inlet upstream (m/s)
- $SG_{Red\ Oil}$: Specific Gravity red oil
- ρ_{H_2O} : Massa jenis air pada (kg/m^3)

2) Perhitungan Kecepatan Lokal

Profil kecepatan diukur pada 15 test section sepanjang *downstream straight duct* dengan variasi *Cylinder Disturbance Body* pada $g/Dh = 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4$ dan $0,5$ pada sisi *inner upstream duct*. Perhitungan profil kecepatan pada lokasi *section X/Dh* : 2; 4; 6; 10 dan 14 sepanjang *downstream straight duct* ditulis sesuai persamaan 3.10 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{udara}}} \quad (3.10)$$

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 $T = 26,6^\circ\text{C}$
- $p_o - p_s$: tekanan dinamis

3) Perhitungan *Coefficient Losses elbow 90°* ($K_{elbow 90^\circ}$)

Eksperimen ini menggunakan *square duct & square elbow 90°* dengan dipasang sebuah *cylinder disturbance body* pada jarak longitudinal $l=0,5Dh$ dan variasi $g/Dh= 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4$ dan $0,5$ pada sisi *inner upstream duct*. Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan *coefficient losses* pada saluran. *Coefficient 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, *coefficient losses elbow 90°* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°*.

$$P_{outlet elbow 90^\circ} - P_{inlet elbow 90^\circ} = K_{elbow 90^\circ} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.11)$$

$$K_{elbow 90^\circ} = \frac{(P_{outlet elbow 90^\circ} - P_{inlet elbow 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.12)$$

dimana: $P_{outlet elbow 90^\circ}$: Tekanan *outlet elbow 90°* (N/m^2)
 $P_{inlet elbow 90^\circ}$: Tekanan *inlet elbow 90°* (N/m^2)
 \bar{V}^2 : Kecepatan udara masuk pada upstream (m/s)
 ρ_{udara} : Massa jenis udara pada $T=26,6^\circ\text{C}$ (kg/m^3)
 $K_{elbow 90^\circ}$: *Coefficient losses elbow 90°*

Coefficient losses elbow 90° pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4$; $9,52 \times 10^4$; dan $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 ; 12; dan 20 m/s) dengan variasi gap peletakan *cylinder disturbance body* $g/Dh = 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4$ dan $0,5$.

4) 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 :

$$\Delta P = P_{upstream} - P_{downstream} \quad (3.13)$$

$$\Delta P = (\rho_{Red\ Oil} \cdot g \cdot \Delta h_{upstream}) - (\rho_{Red\ Oil} \cdot g \cdot \Delta h_{downstream})$$

$$\Delta P = (SG_{Red\ Oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{upstream}) - (SG_{Red\ Oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{downstream}) \quad (3.14)$$

Dimana : ΔP : Pressure Drop (N/m²)
 $P_{upstream}$: Tekanan inlet pada upstream straight duct (N/m²)
 $P_{downstream}$: Tekanan outlet pada downstream straight duct (N/m²)

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.

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3.15)$$

$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3.16)$$

Dimana :

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

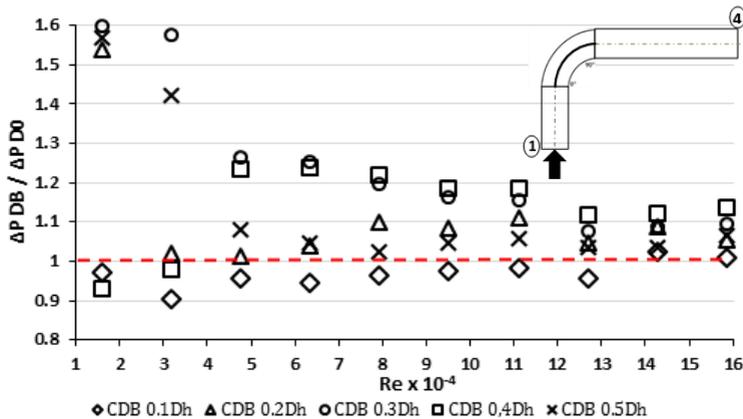
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab berikut akan ditampilkan dan dibahas hasil studi eksperimen yang sudah didapatkan dari data percobaan. Penyajian hasil studi eksperimen dilakukan tanpa dan dengan *cylinder disturbance body* pada *gap* $0,1D_h - 0,5D_h$ yang ditampilkan dalam sub-bab sebagai berikut, yaitu *pressure drop overall* dengan *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4$ hingga $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s, dengan kenaikan kecepatan udara 2 m/s). *Pressure drop per section* meliputi *upstream*, *elbow*, dan *downstream* dengan *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4$ hingga $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s, dengan kenaikan kecepatan udara 2 m/s). Lalu *coefficient loss minor* pada *elbow* 90° dengan *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4$ hingga $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s, dengan kenaikan kecepatan udara 2 m/s). Kemudian *coefficient pressure* pada *elbow* 90° dengan *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4$; $9,51 \times 10^4$; dan $1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s, 12 m/s, 20 m/s). Selanjutnya *velocity profile* pada posisi vertikal dan horizontal dengan *Reynolds Number* $9,51 \times 10^4$ (kecepatan udara 12 m/s) di sisi *upstream* pada $X/D_h = 2, 4, 6, 10$ dan 14 .

4.1 Pressure drop overall Fungsi Reynolds Number $1,59 \times 10^4 \leq Re_{D_h} \leq 1,59 \times 10^5$

Pada sub-bab ini ditampilkan hasil penelitian berupa grafik pengaruh *Reynolds Number* (Re_{D_h}) terhadap rasio *pressure drop cylinder disturbance body* dan *pressure drop* tanpa *disturbance body* ($\Delta p_{DB}/\Delta p_{D0}$) sepanjang *square duct* dengan *elbow* 90° dengan variasi jarak $g = 0,1D_h - 0,5D_h$. Gambar 4.1 akan menjelaskan karakteristik *pressure drop overall* berupa grafik dari nilai *pressure drop* dengan variasi *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4 < Re_{D_h} < 1,59 \times 10^5$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan kecepatan 2 m/s) dengan variasi tanpa *disturbance body*

dan jarak peletakan CDB tetap ($l = 0,5D_h$) dengan gap $0,1D_h$ hingga $0,3D_h$.



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 $1,59 \times 10^5$

Pada gambar 4.1 menunjukkan grafik variasi peletakan *cylinder disturbance body* dengan gap $0,1D_h$ mampu menurunkan *pressure drop* mulai dari nilai Re $1,59 \times 10^4$ sampai Re $12,6 \times 10^4$ namun meningkat pada nilai Re $12,6 \times 10^4$ sampai Re $15,9 \times 10^4$ dibandingkan tanpa penambahan *disturbance body* dengan nilai Re $1,59 \times 10^4$ sampai Re $1,59 \times 10^5$. Sedangkan jika dicermati terdapat fenomena lain bahwa dengan penambahan *cylinder disturbance body* dengan gap $0,3D_h$ menghasilkan *pressure drop* yang lebih meningkat secara keseluruhan nilai Re dibandingkan tanpa penambahan *disturbance body* dengan nilai Re yang sama.

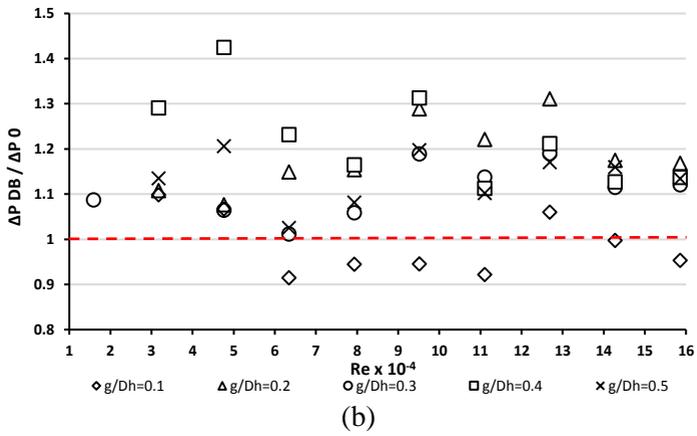
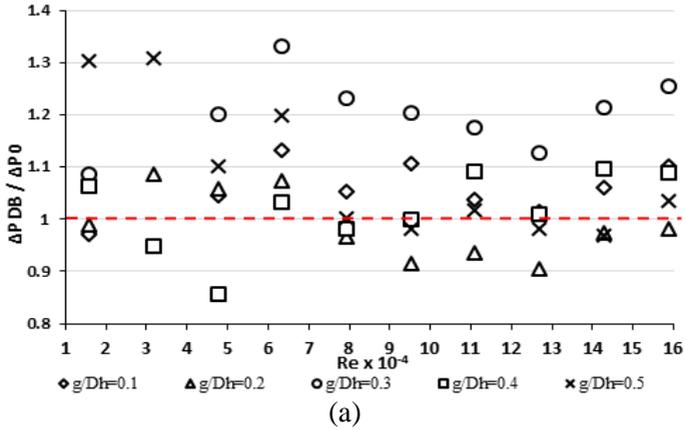
Berdasarkan kedua hasil variasi tersebut dapat disimpulkan, rata-rata penurunan *pressure drop* paling efektif terdapat pada CDB ($g=0,1D_h$) dengan presentase sebesar 0,02% , serta memiliki nilai rasio dibawah 1 dengan nilai rasio paling rendah 0,902 dan paling tinggi mencapai 0,982 sehingga mampu menurunkan *pressure drop* pada nilai Re rendah hingga sedang, hal ini menunjukkan bahwa momentum aliran lebih besar sehingga mampu

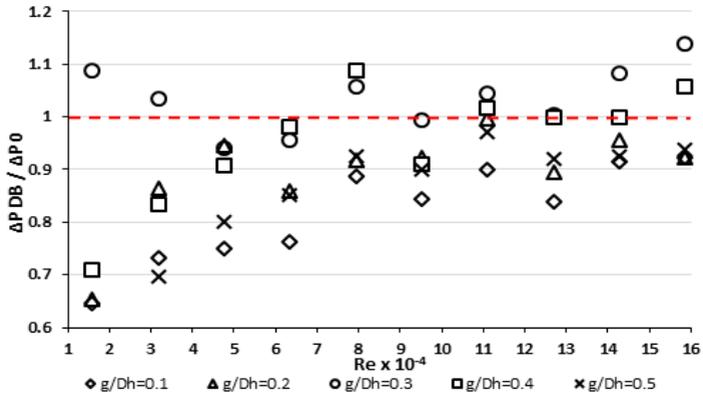
melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow 90°*, separasi aliran pada sisi *inner elbow 90°* juga mengalami penundaan, dan *blockage area* berkurang karena mendapatkan momentum aliran tambahan dari bodi pengganggu tersebut.

Sedangkan untuk variasi peletakan CDB ($g=0,3D_h$) justru mengalami kenaikan *pressure drop* dengan presentase rata-rata sebesar 0,14%, serta memiliki nilai rasio diatas 1 dengan nilai rasio 1,077 hingga 1,599 dengan kesimpulan variasi ini paling tidak efektif dalam menurunkan *pressure drop overall* jika dibandingkan tanpa bodi pengganggu. Fenomena ini berkebalikan dengan sebelumnya, yang berarti bahwa aliran pada penambahan CDB ($g = 0,1D_h$) mengalami separasi terlebih dahulu dibandingkan saluran tanpa CDB, hal ini menunjukkan bahwa *shear layer* yang terbentuk pada CDB ($g = 0,1D_h$) tidak sempat *attach* pada sisi *inner elbow 90°* untuk menambah momentum aliran, melainkan langsung terseparasi akibat jarak peletakan yang dekat dengan radius sisi *inner elbow 90°*.

4.2 *Pressure drop per section pada sisi Upstream, Elbow 90°, dan Downstream Fungsi Reynolds Number $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$*

Pada sub-bab ditampilkan distribusi *pressure drop per section* atau secara mikro berupa grafik fungsi nilai *pressure drop (N/m²)* terhadap nilai *Reynolds Number*. Dimana untuk gambar 4.2(a) menjelaskan penurunan *pressure drop* pada sisi *upstream duct*, gambar 4.2(b) penurunan *pressure drop* pada sisi *square elbow 90°*, dan gambar 4.2(c) penurunan *pressure drop* pada sisi *downstream duct* dengan variasi tanpa *disturbance body* dan jarak peletakan CDB tetap ($l= 0,5/D_h$) dengan gap $0,1D_h$ hingga $0,3D_h$.





(c)

Gambar 4.2 Grafik *ratio pressure drop per section* pada *square duct* (a) *Upstream*; (b) *Elbow 90°*; (c) *Downstream*; dengan variasi jarak peletakan *square 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 *cylinder 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 :

$$\frac{P_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{outlet}^2}{2} + gZ_{outlet} = \frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{inlet}^2}{2} + gZ_{inlet} + h_{lT} \quad (4.1)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{lT} = h_l + h_{lm} \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\bar{v}^2}{2} \times \left(f \frac{L_{upstream}}{D_h} + f \frac{L_{downstream}}{D_h} + k_{elbow 90^\circ} \right) \quad (4.3)$$

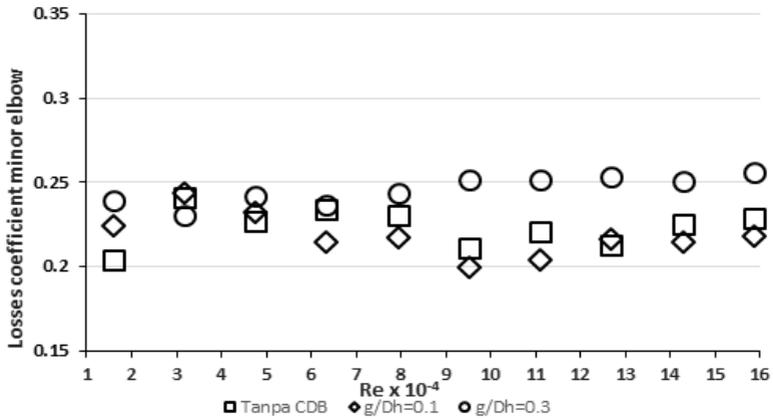
Pada gambar 4.2 (a) menunjukkan grafik *pressure drop* sisi *upstream*, nilai yang paling efektif menurunkan *pressure drop* sisi *upstream* terletak pada variasi CDB ($g=0,2D_h$) dibandingkan tanpa CDB, sedangkan pada variasi CDB ($g=0,3D_h$) semakin

meningkatkan *pressure drop* dibandingkan tanpa CDB. Lalu pada gambar 4.2 (b) menunjukkan grafik *pressure drop* sisi *elbow 90°*, terlihat bahwa nilai *pressure drop* variasi CDB ($g=0,1D_h$) lebih rendah dan variasi CDB ($g=0,2D_h$) semakin meningkatkan *pressure drop* dibandingkan tanpa bodi pengganggu. Selanjutnya, pada gambar 4.2 (c) menunjukkan grafik *pressure drop* sisi *downstream*, terdapat nilai yang secara signifikan dalam menurunkan *pressure drop* terletak pada variasi CDB ($g=0,1D_h$), sedangkan pada variasi CDB ($g=0,3D_h$) terlihat semakin meningkatkan *pressure drop* jika dibandingkan tanpa CDB.

Berdasarkan hasil grafik *pressure drop* tiap *section* tersebut tampak dengan adanya penambahan bodi pengganggu yang ditempatkan pada sisi *inner upstream* akan meningkatkan nilai *pressure drop* di *section upstream* yang terlihat pada variasi ($g=0,3D_h$). Namun jika melihat grafik *section elbow 90°* akan memperkuat hipotesa bahwa nilai *pressure drop* akan berkurang secara signifikan ketika terdapat penambahan bodi pengganggu terutama pada variasi CDB ($g=0,1D_h$). Kemudian, pada grafik *downstream* nilai rasio variasi CDB ($g=0,1D_h$) dan tanpa bodi pengganggu akan menurun cukup signifikan searah dengan penambahan Re .

4.3 Koefisien *Minor Losses Elbow 90°* Fungsi *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,59 \times 10^5$

Pada sub-bab ini ditampilkan hasil penelitian pengaruh koefisien *minor elbow 90°* terhadap *cylinder disturbance body* (CDB) dan bilangan *Reynolds*. *Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan SDB sebelum memasuki *elbow 90°*, jarak CDB tetap ($l=0,5/D_h$) dan variasi jarak $g = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°*. Sedangkan variasi Re_{Dh} sebesar $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ atau pada kecepatan udara sebesar 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan kecepatan udara sebesar 2 m/s. Sedangkan variasi Re_{Dh} sebesar $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$ atau pada kecepatan udara sebesar 2 m/s sampai 20 m/s dengan kenaikan kecepatan udara sebesar 2 m/s.



Gambar 4.3 Grafik *Minor Loss Coefficient elbow 90°* dengan variasi jarak peletakan *cylinder disturbance body* terhadap Re_{Dh} $1,59 \times 10^4$ sampai $1,59 \times 10^5$

Dari gambar 4.3 dapat dilihat dari grafik tersebut menjelaskan bahwa dengan penambahan *cylinder disturbance body* menghasilkan nilai *koefisien losses elbow 90°* secara *overall* yang menurun seiring dengan meningkatnya *Reynold's Number* pada variasi *gap 0,1D_h* dan memiliki nilai rata-rata sebesar 0,218 bila dibandingkan tanpa adanya bodi pengganggu. Sedangkan pada variasi *gap 0,3D_h* terlihat nilai mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya *Reynolds Number* bila dibandingkan dengan tanpa bodi pengganggu. Sehingga dapat dikatakan jika *pressure drop* dari suatu fluida meningkat, maka *koefisien losses elbow* akan meningkat. Hal ini dapat disebabkan oleh *headloss minor* yang semakin besar, sesuai dengan perumusan sebagai berikut :

$$\frac{P_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{outlet}^2}{2} + gZ_{outlet} = \frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{inlet}^2}{2} + gZ_{inlet} + h_{lm} \quad (4.4)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{elbow 90^\circ} \quad (4.5)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = k_{elbow 90^\circ} \left(\frac{\bar{v}^2}{2} \right) \quad (4.6)$$

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

Penambahan *disturbance body* pada *upstream duct* akan mengakibatkan kenaikan *losses* pada *elbow 90°*. Berdasarkan pembahasan diatas dapat diketahui bahwa besarnya *loss coefficient elbow* sangat bergantung pada besarnya nilai *pressure drop* pada *elbow 90°*. Jika *pressure drop* pada *elbow 90°* dapat diturunkan maka besarnya *loss coefficient elbow 90°* juga akan berkurang. Hasil penelitian tersebut sesuai tabel *loss coefficient* yang didapatkan oleh penelitian yang dilakukan **Miller (1990)**.

4.4 Pressure Coefficient pada Elbow 90° dengan Reynolds Number $9,52 \times 10^4$

Pressure Coefficient adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan koefisien tekanan dari satu titik ke titik lain dalam *single guide vane elbow 90°*. *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 *single guide vane elbow 90°* yang dipasang masing – masing sebanyak 18 *pressure tap* dari 0° sampai 90° dengan selisih pemasangan antar *pressure tap* setiap kenaikan 5°.

Pada sub bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan *Pressure Coefficient inner wall* maupun *outer wall* pada *single guide vane elbow 90°* dengan menggunakan nilai *Reynolds Number* yang konstan yaitu 9.52×10^4 (kecepatan udara 12 m/s) yang divariasikan tanpa dan dengan *cylinder disturbance body* yang dipasang pada sisi *upstream*, dengan jarak longitudinal ($l = 0,5D_h$) dan variasi *gap* $g = 0,1D_h$ hingga $0,5D_h$ dari *inner upstream* dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 1.5. 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 :

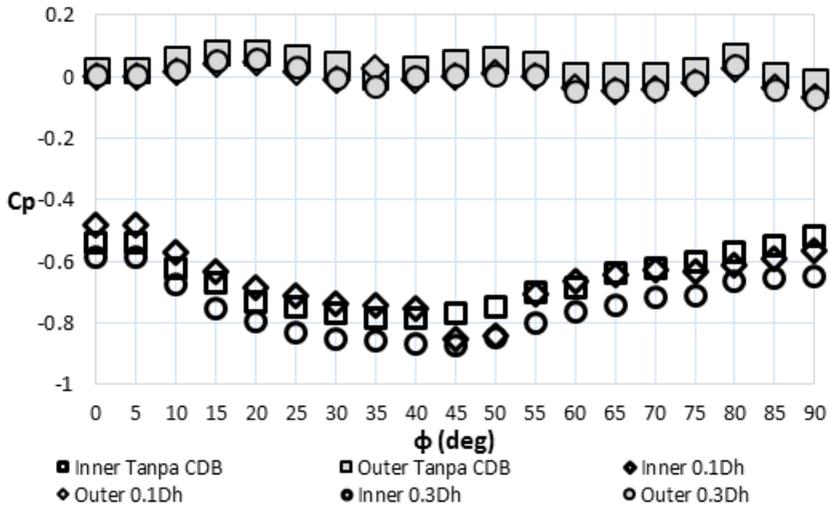
$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (4.8)$$

$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (4.9)$$

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 :

$$\Delta C_p = C_{p_{outer}} - C_{p_{inner}} \quad (4.10)$$

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



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

Pada gambar 4.4 penambahan *cylinder disturbance body* dapat menurunkan dan meningkatkan nilai ΔC_p pada *single guide vane elbow* 90° dibanding saluran tanpa bodi pengganggu. Penurunan nilai selisih *Pressure Coefficient* pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall* (ΔC_p) paling efektif pada variasi jarak (g/D_h) = 0.1 sebesar 0.65, sedangkan nilai ΔC_p tanpa bodi pengganggu sebesar 0.70, namun pada variasi jarak (g/D_h) = 0.3 nilai ΔC_p mengalami kenaikan dibandingkan nilai ΔC_p tanpa bodi pengganggu sebesar 0.74. Dari perbandingan ketiga variasi diketahui bahwa nilai penurunan ΔC_p paling efektif terjadi pada jarak (g/D_h) = 0.1 dengan nilai rata-rata sebesar 0,66 dibanding nilai tanpa CDB sebesar 0,7 hal ini semakin memperkuat hipotesa awal bahwa penambahan *cylinder disturbance body* dapat menurunkan *pressure drop* pada *square duct*.

Karakteristik 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 $0^\circ - 40^\circ$, dimana pada sudut tersebut terjadi penurunan tekanan dan kenaikan kecepatan aliran. Sebaliknya, ketika aliran melewati sudut $45^\circ - 90^\circ$ seolah-olah aliran melewati sebuah *diffuser* yang ditandai dengan kenaikan nilai C_p , menandakan terjadi kenaikan tekanan dan penurunan kecepatan.

Fenomena aliran seperti dijelaskan diatas terjadi pada semua variasi baik tanpa maupun dengan penambahan *cylinder disturbance body*. Lalu 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 *adverse pressure* pada sisi *inner wall*. Dari pembahasan grafik diatas dapat disimpulkan penambahan *cylinder disturbance body* pada jarak ($g/D_h = 0.1$) dan *single guide vane* pada *elbow 90°* efektif untuk menurunkan *Pressure Coefficient* (ΔC_p).

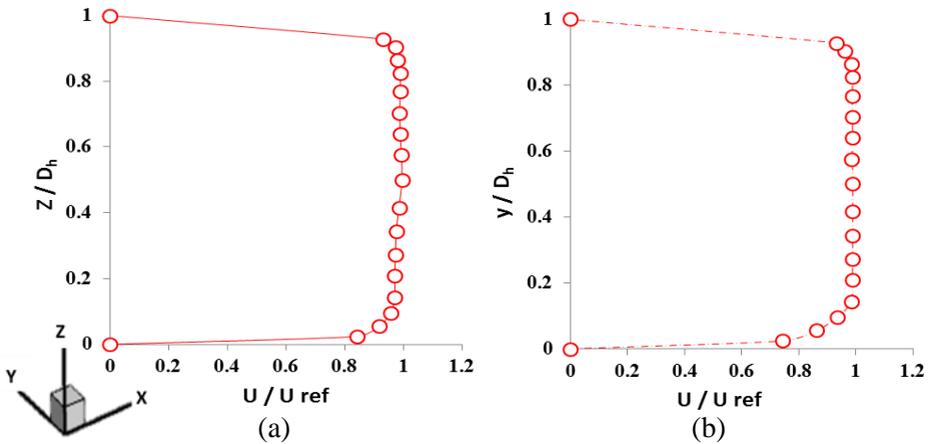
4.5 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada *Upstream Duct* dan *Downstream Duct*

Pada sub bab ini ditampilkan hasil penelitian berupa profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal pada bagian *upstream* dan *downstream square duct*. Bagian *upstream* diletakkan tanpa dan dengan *cylinder disturbance body* (CDB) dengan jarak ($l = 0,5D_h$) dari *inlet elbow 90°* dan ($g = 0,1 - 0,5D_h$) dan variasi $Re_{D_h} 9,52 \times 10^4$ dengan rasio kelengkungan tetap ($R/D_h = 1,5$).

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. Profil kecepatan pada sisi *upstream straight duct* digunakan sebagai acuan untuk menentukan gambaran proses *recovery* profil kecepatan daerah *downstream*.

4.5.1 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada *Upstream Straight Duct* dengan $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$

Pada gambar 4.5 ditampilkan profil kecepatan pada bagian *upstream* (a) bidang horizontal dan (b) bidang vertikal. 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 yang telah berkembang dengan sempurna (*fully developed flow*) pada posisi z/D_h 0,02 sampai 0,92.



Gambar 4.5 Grafik *velocity profile* (a) bidang horizontal sisi *upstream straight duct* (b) bidang vertikal sisi *upstream straight duct*

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_{ref} sebesar nol. Kemudian profil kecepatan bergerak seragam telah berkembang dengan sempurna (*fully developed flow*) pada posisi y/D_h 0,02 sampai 0,92. Profil kecepatan ini dijadikan acuan pengukuran pada bagian *downstream* bidang vertical.

4.5.2 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada *Downstream Straight Duct* dengan $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$

Pada sub bab ini diambil data profil kecepatan bidang horizontal pada *section 2* ($x/D_h=2$), 4 ($x/D_h=4$), 6 ($x/D_h=5$), 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*. *Upstream duct* divariasikan tanpa dan menggunakan CDB dengan jarak tetap $l = 0,5D_h$ dari *inlet*

elbow 90° dan variasi jarak $g=0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 1,5 serta ReD_h $9,52 \times 10^4$.

Analisa profil kecepatan bidang horizontal secara dua dimensi sepanjang *downstream* ditunjukkan pada gambar 4.6. 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 (a) ditampilkan profil kecepatan bidang horizontal sepanjang *downstream* pada masing-masing *cross-section* untuk keseluruhan variasi. Secara umum profil kecepatan mengalami perubahan setelah *outlet elbow 90°* dibanding pada *upstream*. Perbedaan tekanan secara signifikan karena kelengkungan *radius elbow 90°* antara kecepatan sisi *inner* dan *outer* terlihat saat aliran telah melewati *elbow 90°*, 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°*.

Pada *section 2* ($x/D_h=2$), tampak grafik pada setiap variasi hampir membentuk *trendline* yang sama dengan kecepatan tertinggi berada pada $Z/D_h=0.416$, namun terdapat perbedaan pada sisi *inner downstream* tampak profil kecepatan variasi tanpa *CDB* mengalami penurunan kecepatan pada $Z/D_h=0.02$ hingga 0.2 sebelum naik secara signifikan, hal tersebut menandakan bahwa masih terdapat *backflow* setelah melewati sisi *inner elbow 90°*. Demikian pada penambahan *cylinder disturbance body* pada jarak ($g=0,1D_h$) dan ($g=0,3D_h$) penurunan kecepatan pada sisi *inner downstream* mengalami penundaan akibat diberikan agitasi pada aliran yang melaluinya. 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 ($x/D_h=6$), 10 ($x/D_h=10$), dan 14 ($x/D_h=14$) *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 akibat penambahan *single guide vane* seperti terlihat pada ketiga gambar. Dan pada *section* 10 ($x/D_h = 10$) dan 14 ($x/D_h = 14$) semua aliran pada ketiga gambar sudah mendekati profil kecepatan yang berkembang secara penuh (*fully developed flow*) seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*, hanya masih terdapat sedikit aliran pada variasi tanpa *CDB* yang lebih besar pada sisi *outer*.

4.5.3 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada Downstream Straight Duct dengan $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$

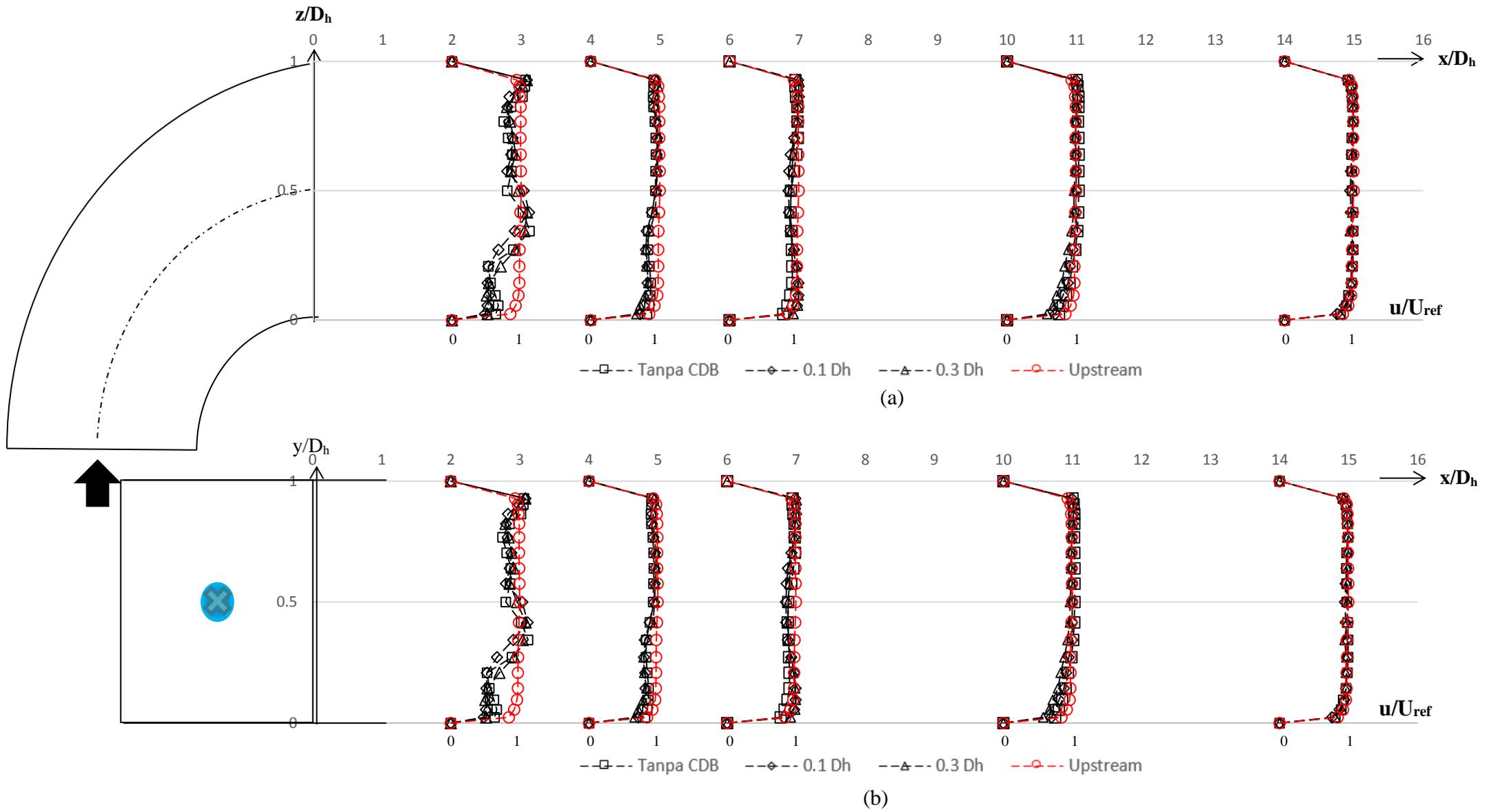
Data profil kecepatan bidang vertical diambil pada *section* 2 ($x/D_h=2$), 4 ($x/D_h=4$), 6 ($x/D_h=5$), 10 ($x/D_h=10$), dan 14 ($x/D_h=14$). Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari sisi *lower* sampai sisi *upper square duct*. *Upstream duct* divariasikan tanpa dan menggunakan *CDB* dengan jarak tetap $l = 0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°* dan variasi jarak $g=0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 1,5 serta $Re_{Dh} 9,52 \times 10^4$.

Analisa profil kecepatan bidang horizontal secara dua dimensi sepanjang *downstream* ditunjukkan pada gambar 4.6 (b). 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 (b) ditampilkan profil kecepatan bidang vertikal sepanjang *downstream* pada masing-masing *cross-section* untuk keseluruhan variasi. Secara umum profil kecepatan mengalami perubahan setelah *outlet elbow 90°* dibanding pada *upstream*. Perbedaan tekanan tidak terlalu terlihat secara signifikan karena kelengkungan *radius elbow 90°* antara kecepatan sisi *lower* dan *upper* tidak berpengaruh saat aliran telah melewati *elbow 90°*.

Sedikit perbedaan tampak pada *section 2* pada semua variasi, dimana terdapat penurunan kecepatan pada $y/D_h=0,5$ atau pada posisi *centreline* dikarenakan penambahan *single guide vane* mampu menyebabkan aliran setelah melewati *elbow* akan sedikit terhambat akibat adanya fenomena *backflow* sehingga profil kecepatan sedikit menurun. Distribusi kecepatan aliran mulai terlihat berubah ketika memasuki *section 4* hingga *section 14* dimana mengalami percepatan aliran pada semua variasi peletakan *cylinder disturbance body*. Pada variasi CDB ($g=0,3D_h$) terlihat sedikit perbedaan dibandingkan variasi lain dimana terdapat akselerasi kecepatan pada posisi *section 6* dan $y/D_h=0,02$ hingga $0,1$ hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan bodi pengganggu dapat meningkatkan kecepatan pada sisi *lower downstream*.

Selanjutnya pada *section 10* ($x/D_h = 10$) dan *14* ($x/D_h = 14$) semua aliran pada ketiga gambar sudah mendekati profil kecepatan yang berkembang secara penuh (*fully developed flow*) seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*, hanya masih terdapat sedikit aliran yang lebih besar pada sisi *lower dan upper*.



Gambar 4.6 Profil kecepatan sepanjang *downstream* pada masing-masing posisi *cross-section* (a) horizontal; (b) vertikal

4.6 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

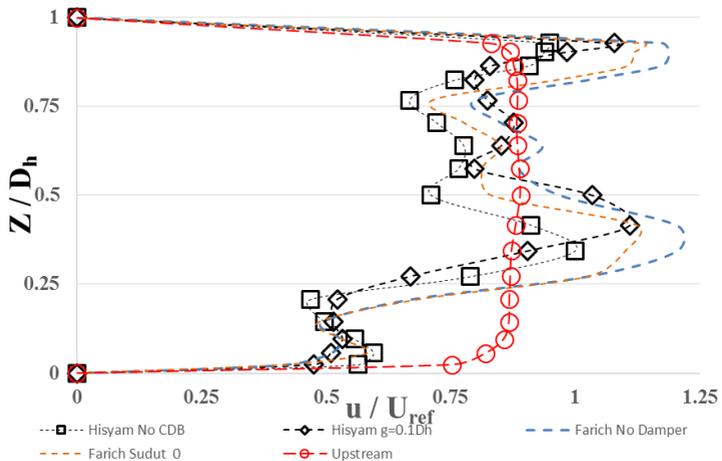
Pada sub-bab ini akan dibandingkan hasil eksperimen dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Farich (2016)**. Pada penelitian yang berjudul *studi eksperimen aliran melalui square duct dan square elbow 90° dengan single guide vane* pada variasi sudut bukaan *damper*, memiliki tujuan yang sama untuk mengamati karakteristik aliran yang melewati *square duct* dengan ditambahkan *elbow 90°*. 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 penelitian ini seperti *Reynolds Number*, dan variasi yang digunakan. Perbedaan tersebut dapat dikesampingkan karena hasil eksperimen yang dibandingkan menggunakan bilangan yang tak berdimensi. Adapun persamaan dan perbedaan dalam penelitian ini dijelaskan dalam tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Perbandingan Penelitian

Parameter	Farich Firmansyah. H (2016)	Ahmad Hisyam (2018)
Geometri	<i>Square Duct</i> ($D_h=125\text{mm}$)	<i>Square Duct</i> ($D_h=125\text{mm}$)
Panjang Upstream	7 Dh	7 Dh
rasio kelengkungan <i>elbow 90°</i>	($r/D_h=1.5$)	($r/D_h=1.5$)
Panjang Downstream	15 Dh	15 Dh
Type <i>elbow 90°</i>	<i>Single Guide Vane</i>	<i>Single Guide Vane</i>
<i>Re</i> untuk profil kecepatan	<i>Re</i> 9.21×10^4 (Kecepatan 10 m/s)	<i>Re</i> 9.5×10^4 (Kecepatan 12 m/s)
Variasi	Sudut bukaan <i>damper</i> $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ dan 30°	Jarak ($g/D_h= 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; \text{ dan } 0,5$)

4.6.1 Perbandingan *Velocity Profile* dengan Penelitian Farich Firmansyah H. (2016)

Hasil penelitian yang akan dibandingkan yaitu profil kecepatan horizontal. 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 (2016)** dibandingkan pada posisi yang sama yaitu pada section 2 ($x/D_h = 2$). Perbedaannya penelitian kali ini terdapat pada pemilihan nilai *Reynolds Number* yaitu $Re\ 9,52 \times 10^4$ pada variasi jarak longitudinal ($g/D_h = 0.1$), sedangkan Farich menggunakan *Reynolds Number* $7,88 \times 10^4$ pada variasi bukaan damper sudut 0° . Grafik perbandingan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7 sebagai berikut :



Gambar 4.7 Perbandingan profil kecepatan hasil eksperimen dengan penelitian terdahulu oleh **Halwan Firmansyah, Farich (2016)**

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian

Berdasarkan pembahasan hasil penelitian pada bab analisa dan pembahasan maka diambil kesimpulan bahwa :

1. Penambahan *Cylinder Disturbance Body* (CDB) sebagai bodi pengganggu dapat menurunkan nilai *pressure drop* dibandingkan dengan tanpa menggunakan *Cylinder disturbance body*, tetapi penurunan nilai *pressure drop* secara umum efektif pada nilai Re $1,59 \times 10^4$ sampai dengan Re $12,6 \times 10^4$. Penurunan nilai *pressure drop* paling efektif pada variasi peletakan $g=0,1D_h$ dengan *Reynolds Number* rendah hingga sedang. sedangkan variasi lain semakin meningkatkan nilai *pressure drop*.
2. Peletakan *Cylinder disturbance body* di dalam *elbow* akan mengakibatkan penurunan dan kenaikan nilai *loss coefficient elbow* secara umum. Penurunan nilai *loss coefficient elbow* paling efektif pada variasi peletakan $g=0,1D_h$, sedangkan untuk variasi lain semakin meningkatkan nilai *loss coefficient elbow* jika dibandingkan dengan tanpa CDB sehingga peletakan CDB didalam *elbow* mampu untuk menurunkan K elbow.
3. *Coefficient Pressure* (C_p) untuk variasi peletakan CDB menunjukkan nilai ΔC_p yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa CDB. Tetapi jika diamati pada masing-masing variasi jarak peletakan CDB, nilai ΔC_p pada variasi $g=0,1D_h$ menghasilkan ΔC_p yang paling kecil. Sehingga pada variasi $g=0,1D_h$ merupakan variasi yang paling efektif menurunkan *pressure drop*, karena mampu melawan *advers pressure* dibandingkan tanpa CDB.
4. Penambahan *Cylinder Disturbance Body* pada saluran *square duct* belum lebih cepat untuk membuat aliran *recovery* karena momentum aliran tanpa bodi pengganggu

lebih besar jika dibandingkan dengan penambahan CDB. Selain itu, aliran sepanjang saluran merupakan *entrance region* apabila panjang saluran diperpanjang bukan tidak mungkin penambahan CDB akan mempercepat proses *recovery*.

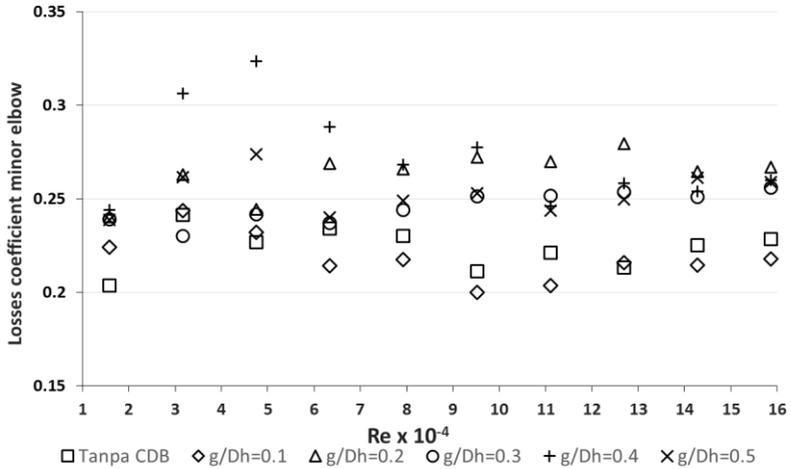
5.2 Saran

Adapun saran-saran yang diberikan untuk memperbaiki penelitian kedepannya yaitu sebagai berikut :

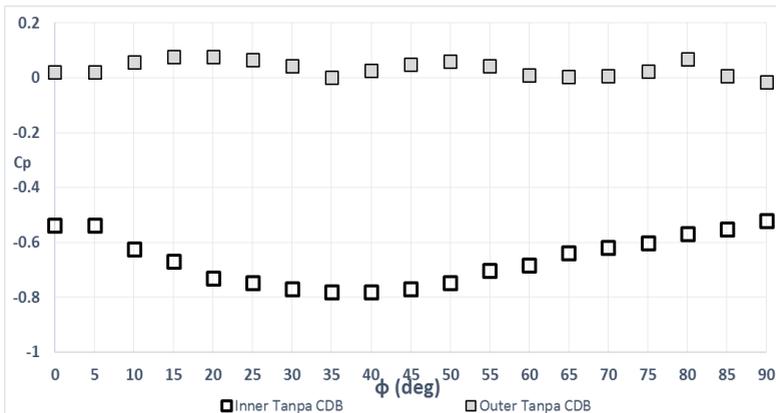
1. Diperlukan adanya pergantian peralatan instalasi maupun alat ukur untuk menunjang keakuratan pengambilan data.
2. Ketika mengambil data sebaiknya menggunakan thermometer untuk mengatur suhu ruangan, karena kondisi ruangan yang stabil harus dikontrol agar data yang diperoleh baik.
3. Diperlukan pula simulasi secara numerik untuk memperkuat hasil penelitian yang telah dilakukan. Contohnya memperkuat posisi terjadinya *reattachment* pada sisi *inner elbow*.
4. Mengganti penyangga instalasi *ducting* dengan yang lebih tinggi agar mampu mengambil data *velocity profile* posisi vertikal pada sisi bawah *downstream duct*.
5. Memastikan kondisi sekitar instalasi kondusif saat pengambilan data supaya tidak terjadi *losses* lain, seperti *losses* ketika *induced draft fan* atau *nozzle* tertutup oleh benda atau orang yang lewat.

LAMPIRAN

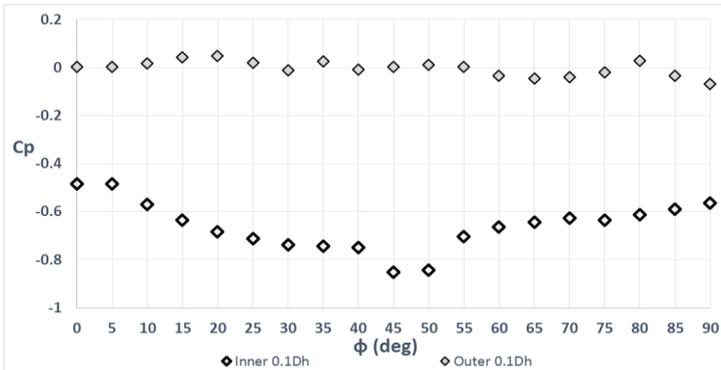
A. Koefisien Losses Minor Elbow Sepanjang Saluran duct 90° pada seluruh variasi penempatan CDB



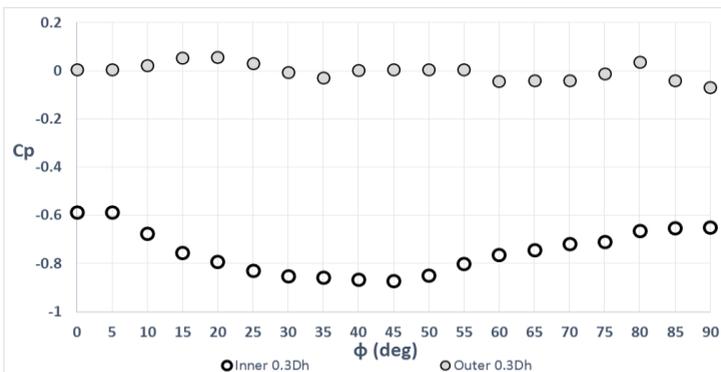
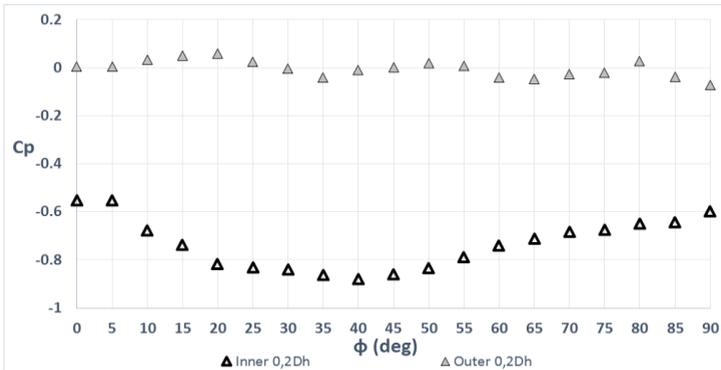
B. Coefficient of Pressure elbow 90° pada Re=9,51x10⁴



Coefficient of Pressure elbow 90° dengan variasi Tanpa CDB

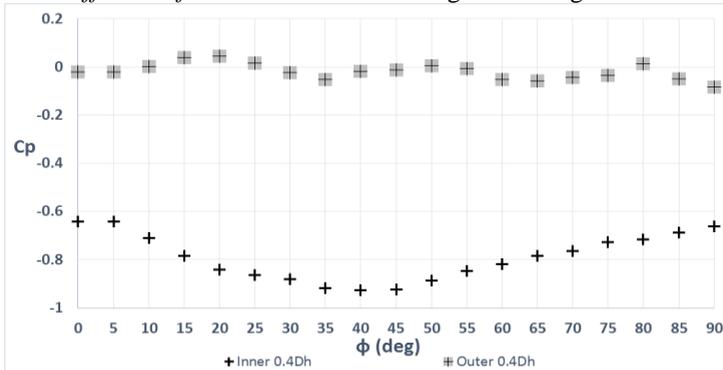


Coefficient of Pressure elbow 90° dengan variasi $g/Dh=0.1$

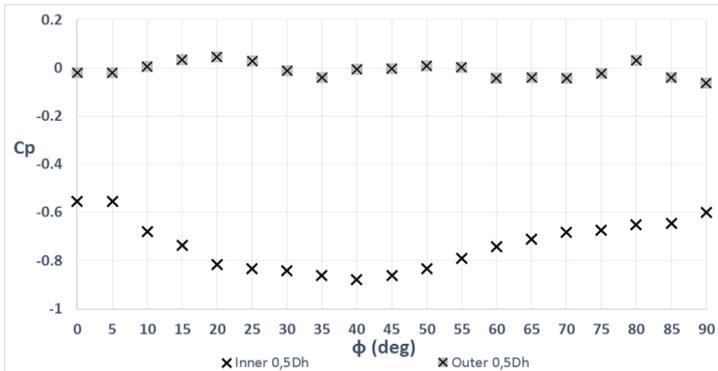


Coefficient of Pressure elbow 90° dengan variasi $g/Dh=0.2$

Coefficient of Pressure elbow 90° dengan variasi $g/Dh=0.3$

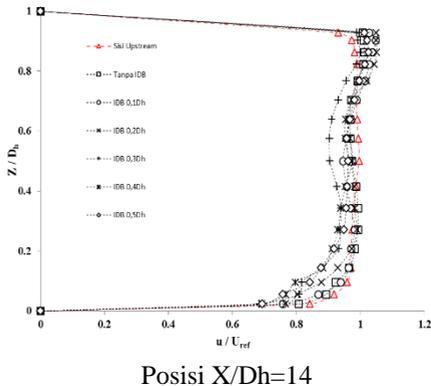
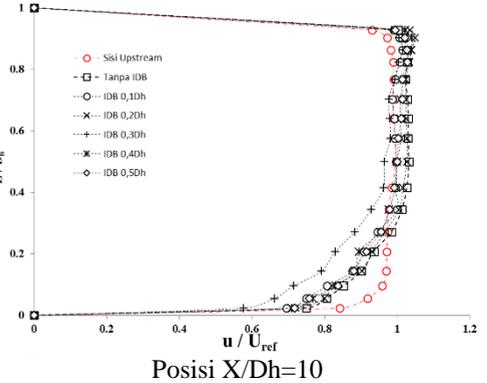
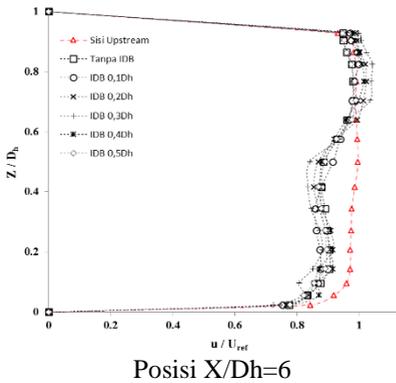
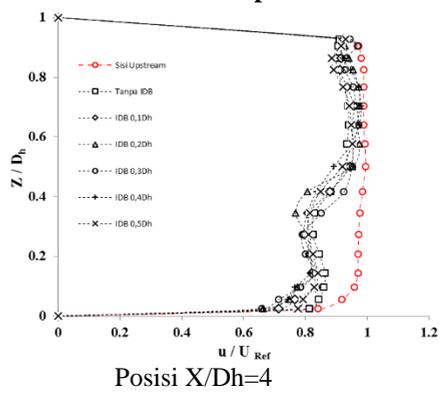
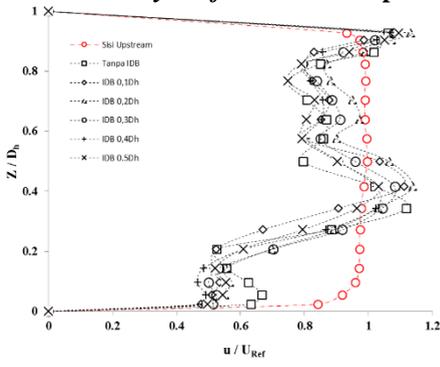


Coefficient of Pressure elbow 90° dengan variasi $g/Dh=0.4$

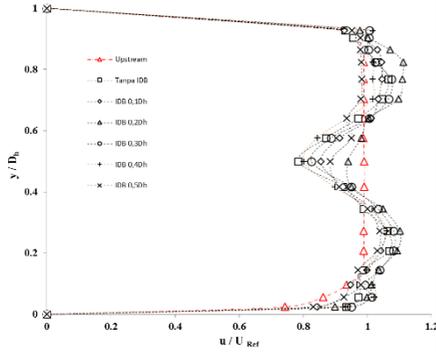


Coefficient of Pressure elbow 90° dengan variasi $g/Dh=0.5$

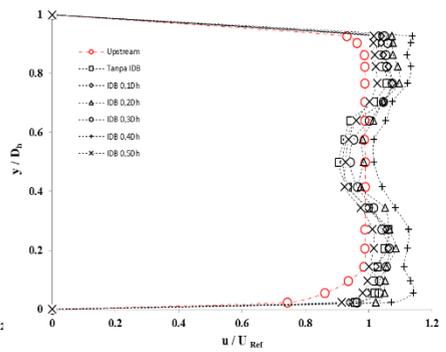
C. Velocity Profile Horizontal pada Downstream Duct Setiap Section



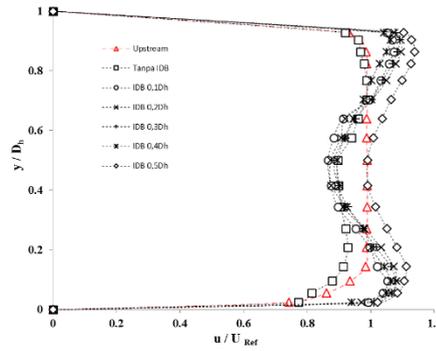
D. Velocity Profile Vertikal pada Downstream Duct Setiap Section



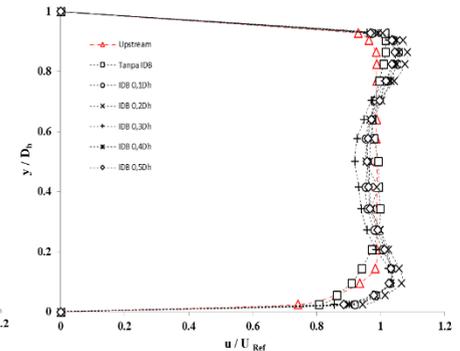
Posisi $X/D_h=2$



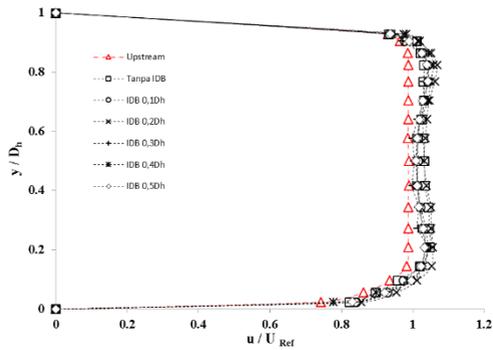
Posisi $X/D_h=4$



Posisi $X/D_h=6$



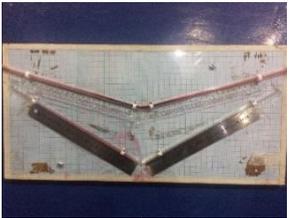
Posisi $X/D_h=10$



Posisi $X/D_h=14$

Tabel 3.1 Peralatan penelitian

No	Nama Alat	Gambar
1.	<p>DAQ PRO 5300 0-24 mA: 0-10V max Input: 8 Rate: 100/sample Samples: 1000</p>	
2.	<p>Pressure transducer 1" WC Model: PX653 – 01D5V Range : ± 1" WC (Water column) Akurasi: 0.25 % FS (Full scale) Output: 1 – 5 V DC Excitation: 12 – 36 V DC Ser.no.: X14500102</p>	
3.	<p>Pressure transducer 3" WC Model: PX653 – 03D5V Range : ± 1" WC (Water column) Akurasi: 0.25 % FS (Full scale) Output: 1 – 5 V DC Excitation: 12 – 36 V DC Ser.no.: X11450113</p>	
4.	<p>Inverter Model : ATV31HU15M2A U (V~) : -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>Centrifugal fan Merk: Vanco direct Centrifugal Fan Type: VDC/4-225 Voltase: 220 / 380 Voltase Frekuensi: 50 Hz Daya: 0,75 KW Putaran: 1450 RPM Max.Air Volume: 2550 m³/h</p>	
<p>5.</p>	<p>Pitot static tube</p>	
<p>6.</p>	<p>Manometer Inclined Skala minimum: 1 mm Fluida: Red Oil Kemiringan: 15°</p>	
<p>7.</p>	<p>Rh-Meter</p>	
<p>8.</p>	<p>Inlet disturbance body Diameter: 6 mm Tinggi: 125 mm</p>	

BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara yang dilahirkan pada tanggal 27 September 1995 di Surabaya, Provinsi Jawa Timur. Pendidikan formal yang pernah ditempuh meliputi SDN BARATAJAYA, SMPN 12 SURABAYA, SMAN 15 SURABAYA. Setelah itu penulis meneruskan pendidikan tingkat perguruan tinggi di Program Studi D3 Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013 dan

mengambil bidang studi Konversi Energi. Untuk mengasah pengetahuan tentang ilmu *mechanical* penulis melanjutkan ke jenjang Lintas Jalur S-1 Teknik Mesin ITS pada tahun 2016. Selain itu, ketertarikan penulis dalam bidang keorganisasian membuat penulis aktif dalam kegiatan-kegiatan organisasi di lingkungan kampus diantaranya Staff Departemen LINGPUS HMDM FTI-ITS, Staff Departemen DAGRI BEM FTI-ITS pada tahun kepengurusan 2014/2015. Dan Direktur BSO MINAT BAKAT HMDM FTI-ITS. Selain itu penulis beberapa kali mengikuti perlombaan futsal dan sepak bola tingkat jurusan dan fakultas. 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 melalui email : ahmadhisem@gmail.com atau no. telp : 081319576166.