



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN
MELALUI *SQUARE DUCT* DENGAN *ORIENTED
SQUARE CYLINDER* SEBAGAI *INLET DISTURBANCE
BODY* DI DALAM *ELBOW 90°***

SONNY ADITYA LUQMAN HAKIM
NRP 2115 105 037

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN
MELALUI *SQUARE DUCT* DENGAN *ORIENTED
SQUARE CYLINDER* SEBAGAI *INLET
DISTURBANCE BODY* DI DALAM *ELBOW 90°***

SONNY ADITYA LUQMAN HAKIM
NRP. 2115105037

Dosen Pembimbing:
Dr. WAWAN ARIES WIDODO. ST., MT.

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT – TM141585

**EXPERIMENT INVESTIGATION OF FLOW
CHARACTERISTIC THROUGH *SQUARE DUCT*
WITH *ORIENTED SQUARE CYLINDER AS INLET*
*DISTURBANCE BODY INSIDE ELBOW 90°***

SONNY ADITYA LUQMAN HAKIM
NRP. 2115105037

Advisory Lecturer
Dr. WAWAN ARIES WIDODO. ST., MT.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017

**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN
MELALUI *SQUARE DUCT* DENGAN *ORIENTED
SQUARE CYLINDER* SEBAGAI *INLET DISTURBANCE
BODY* DI DALAM *ELBOW 90°***

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 :

SONNY ADITYA LUQMAN HAKIM

NRP. 2115 105 037

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
3. Vivien Suphandani, ST, M.Eng, PhD (Penguji II)
NIP. 198105292003122003
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, PhD (Penguji III)
NIP. 197512062005011002

SURABAYA

JULI, 2017

STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DENGAN *ORIENTED SQUARE CYLINDER* SEBAGAI *INLET DISTURBANCE BODY* DI DALAM *ELBOW 90°*

Nama Mahasiswa : Sonny Aditya Luqman Hakim
NRP : 2115 105 037
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

ABSTRAK

Saluran udara berbentuk persegi (*square duct*) banyak digunakan pada aplikasi disekitar kita misalnya sebagai *supply* udara dingin ke ruang yang dikondisikan (*AHU*). Aliran yang mengalir melewati *elbow 90°* akan mengalami *pressure drop* akibat adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow*. Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi di dalam *elbow 90°* adalah dengan menambahkan sebuah bodi pengganggu berupa *Inlet Disturbance Body*, berbentuk *Oriented Square Cylinder (rotated 45°)* bertujuan untuk menunda *separation point* pada sisi *inner* dan *outter wall elbow* dan membuat aliran terjadi turbulen saat memasuki *elbow*. Semakin turbulen suatu aliran maka akan memiliki momentum yang lebih besar sehingga dapat menambah kemampuan untuk melawan *adverse pressure*.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *sqare duct* ($D_h = 125$ mm) yang melewati *elbow 90°* dengan *body* pengganggu didalam *elbow* berupa *Inlet Disturbance Body*. Skema penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu: *upstream duct (straight duct)* sepanjang $7D_h$, *square elbow 90°* rasio kelengkungan ($Rc/D_h = 3$) dengan *Inlet Disturbance Body* setinggi 125 mm dan berdiameter (D_{IDB}) 12,5 mm yang divariasikan letaknya didalam *inner wall elbow* yaitu pada $5°$ sampai $20°$ dari *inlet elbow*, dan *downstream*

duct (straight duct) dengan panjang $15D_h$. Pengujian dilakukan dengan variasi Re_{D_h} sebesar $4,77 \times 10^4$ untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang *downstream duct*, *Pressure Drop* dan *Coefficient Loss Minor elbow 90°* pada *Reynolds* $1,46 \times 10^4$ sampai $10,3 \times 10^4$, *Pressure Coefficient elbow 90°* pada *Reynolds* $4,77 \times 10^4$; $6,36 \times 10^4$; dan $9,54 \times 10^4$.

Hasil penelitian ini diperoleh bahwa penggunaan *Inlet Disturbance Body (IDB)* dapat menurunkan *pressure drop* dalam kondisi tertentu, variasi letak *IDB 10°* merupakan posisi terbaik dalam menurunkan *pressure drop* pada bilangan *Reynolds* $1,59 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$. Untuk variasi letak *IDB 15°* dan $20°$ penurunan *pressure drop* optimal pada bilangan *Reynolds* $5,5 \times 10^4$, setelah melewati bilangan *Reynolds* tersebut *trendline IDB* mulai memotong *trendline* tanpa *IDB*. Hal ini terjadi karena *shear layer* pada letak variasi *IDB* tersebut sudah tidak optimal untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow*, sehingga *blockage area* pada *outlet elbow* tidak berkurang. Dari nilai koefisien *losses elbow* dengan adanya *IDB* di dalam *elbow* menjadikan nilai koefisien *losses elbow* yang lebih yang lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan *IDB*. Hal ini terjadi karena timbulnya gaya *drag* fluida terhadap *IDB*. Namun adanya *IDB* ini menjadikan timbulnya *shear layer* yang meningkatkan intensitas turbulensi pada *outer elbow*. Intensitas turbulensi tertinggi pada $z/D_h = 0,024$ pada variasi *IDB 20°* yaitu sebesar 14%, profil kecepatan pada variasi ini menunjukkan *deficit momentum* pada *center line* ($x/D_h = 0$ sampai $x/D_h = 4$) dapat berkurang sehingga proses *recovery* aliran lebih cepat dan menanggulangi timbulnya *secondary flow*.

Kata kunci: *Square Duct, Square Elbow 90°, Karakteristik Aliran, Pressure Drop, Inlet Disturbance Body, Oriented Square Cylinder.*

***EXPERIMENT INVESTIGATION OF FLOW
CHARACTERISTIC THROUGH SQUARE DUCT WITH
ORIENTED SQUARE CYLINDER AS INLET
DISTURBANCE BODY INSIDE ELBOW 90°***

Name : Sonny Aditya Luqman Hakim
NRP : 2115 105 037
Department : Mechanical Engineering FTI – ITS
Supervisor : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

ABSTRACT

Square duct is many used in applications around us, for examples as supply cold air to conditioned room (AHU). One of fittings of ducting system is elbow 90°, meanwhile air flows through elbow 90° have some losses like pressure drop, it come about with existence of friction loss, separation loss, and secondary flow. The ways to reduce pressure drop who occur in elbow 90° is by adding a disturbance body called “Inlet Disturbance Body”, by shaped Oriented Square Cylinder (rotated 45°) purposed to delay the separation point on the inner and outer wall elbow also make flow become turbulence when entering the elbow. More turbulent a stream will have greater momentum so it can increase the ability to against adverse pressure.

This research was doing by experimentally to analyze flow characteristics in sqare duct ($D_h = 125$ mm) trough elbow 90° with disturbance body inside the elbow called as “Inlet Disturbance Body”. The scheme is divided into three main parts: upstream duct (straight duct) with length $7D_h$, square elbow 90° ($R_c/D_h = 3$) with Inlet Disturbance Body ($h = 125$ mm, $D_{IDB} = 12,5$ mm) which varies location within the inner wall elbow that is on 5°, 10°, 15° 20° from inlet elbow, and downstream duct (straight duct) with length $15D_h$. This experiment uses variation Reynolds Number ($Re_{D_h} 4,77 \times 10^4$) to calculate velocity profile throughout downstream duct, Pressure Drop and Coefficient Loss Minor

elbow 90° with Reynolds $1,46 \times 10^4$ to $10,3 \times 10^4$, Pressure Coefficient elbow 90° uses three Reynolds $4,77 \times 10^4$; $6,36 \times 10^4$; and $9,54 \times 10^4$.

The results showed that by addition of IDB can reduce pressure drop in special case, the variation of IDB 10° is the best position to reduce pressure drop at Reynolds $1,59 \times 10^4$ up to $9,54 \times 10^4$. The variation IDB 15° and 20° optimal reduction at Reynolds number $1,59 \times 10^4$ up to $5,5 \times 10^4$, after passing that Reynolds the trendline of variation IDB showed cut through the trendline with no IDB. It's happen because the shear layer of this variation is not optimal to against adverse pressure on inner side wall elbow, so that the blockage area at outlet elbow cannot be reduced. The value of coefficient losses elbow showed that all of variation with IDB have larger value than without using IDB. This happen because of the existence of drag force between fluid flow and the IDB. However, this IDB makes occurrence of shear layer (vortex) that increase the turbulence intensity in outer elbow. The highest turbulence intensity at $z/D_h = 0,024$ with variation of IDB 20° that is 14%, velocity profile at this variation shows deficit momentum at center line ($x/D_h = 0$ up to $x/D_h = 4$) can reduced, so that fluid recovery processes can be faster and reduce secondary flow.

Keyword: Square Duct, Square Elbow 90° , Flow Characteristic, Pressure Drop, Inlet Disturbance Body, Oriented Square Cylinder.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur saya haturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, karena atas rahmat dan hidayah -Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas akhir ini disusun 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. Allah SWT dan junjungan besarku, Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan ketenangan dalam jiwaku.
2. Orangtua penulis, khususnya Ibu Siti Kayatun yang senantiasa mendoakan, mendorong, dan menyemangati penulis selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Saudara kandung penulis, Rahma Aditya Luqman Hakim yang selalu mendoakan penulis dan memberikan motivasi agar segera menyelesaikan masa studinya.
4. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
5. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD., Vivien Suphandani, ST, M.Eng, PhD. dan Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, PhD. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang tugas akhir ini.
6. Nur Ikhwan, ST, M.Eng. selaku kepala Laboratorium Mekanika Fluida dan Mesin Fluida yang telah membantu dalam proses penelitian.
7. Sutrisno selaku karyawan Laboratorium Mekanika Fluida dan Mesin Fluida yang telah membantu dalam proses penelitian.
8. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTI ITS, atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama ini.

9. Adhe Tri Wira, Selvi Kusrina, Amberski Gantara, Janice Gavrila, dan Fadhila Avionela yang senantiasa memberi motivasi, mendoakan, menemani, dan memberi kenangan indah bagi penulis.
10. Muh Septa, Abdillah Gigih, Rizky Akbar, dan teman – teman anggota Pak Wawan squad yang selalu memberikan semangat pada penelitian ini dalam suka – dukanya.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Amin. Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa kami menyadari dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan, keterbatasan, dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

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

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aliran Fluida dalam Pipa (<i>Internal Flow</i>)	7
2.1.1 Aliran Berkembang Penuh (<i>Fully Developed Flow</i>)	8
2.1.2 Karakteristik Aliran di Dalam <i>Elbow 90°</i>	9
2.1.3 <i>Secondary Flow</i> pada <i>Elbow</i>	10
2.1.4 <i>Separation Loss</i> pada <i>Elbow</i>	10
2.2 Persamaan Euler dalam Koordinat <i>Streamline</i>	12
2.3 Tekanan Statis, Tekanan Stagnasi dan Tekanan Dinamis ..	13
2.4 Bilangan <i>Reynolds</i>	15
2.5 <i>Pressure Coefficient</i> (C_p).....	15
2.6 <i>Head Loss</i>	16
2.6.1 <i>Head Loss Mayor</i>	17
2.6.2 <i>Head Loss Minor</i>	18
2.7 Intensitas Turbulensi	18
2.8 Penelitian Terdahulu.....	19

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Skema Penelitian	31
3.2	Peralatan Pendukung	32
3.2.1	<i>Square Ducting</i>	32
3.2.2	<i>Centrifugal Fan</i>	34
3.2.3	<i>Honey Comb, Screen dan Nozzle</i>	34
3.2.4	<i>Inlet Disturbance Body</i>	35
3.2.5	<i>Alat Ukur</i>	36
3.3	Analisis Dimensi Parameter – Parameter	38
3.3.1	Analisis Grup Tak Berdimensi untuk <i>Pressure Drop</i> pada <i>Square Ducting</i>	39
3.3.2	Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Kecepatan pada <i>Square Ducting</i>	41
3.4	Langkah – Langkah Validasi	43
3.4.1	Alat yang Digunakan.....	43
3.4.2	Validasi Tekanan Dinamis	43
3.4.3	Validasi Tekanan Statis	45
3.5	Prosedur Pengambilan Data.....	47
3.5.1	Pengambilan Data Kuantitatif	47
3.5.2	Pengolahan Data Kuantitatif.....	48
3.6	Urutan Langkah Pengambilan Data.....	52
3.7	Gambar Peralatan Penelitian.....	53

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1	<i>Pressure Drop Variasi Letak IDB (5°, 10°, 20°) Fungsi Reynolds Number</i>	55
4.2	<i>Koefisien Losses Elbow 90° Variasi Letak IDB (5°, 10°, 15°, 20°) Fungsi Reynolds Number</i>	60
4.3	<i>Pressure Coefficient Elbow 90° Variasi Letak IDB (5°, 10°, 15°, 20°) Fungsi Reynolds Number</i>	62
4.4	Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi <i>Upstream Duct</i> dan <i>Downstream Duct</i> $ReDh = 4,77 \times 10^4$...	67
4.4.1	Profil Kecepatan Bidang Horizontal sisi <i>Downstream Duct</i> $ReDh = 4,77 \times 10^4$	68

4.4.2 Profil Kecepatan Bidang Vertical sisi <i>Downstream Duct</i> <i>ReDh = 4,77x10⁴</i>	71
4.5 Perbandingan Intensitas Turbulensi Variasi Letak <i>IDB</i> (<i>5°</i> , <i>10°</i> , <i>15°</i> , <i>20°</i>) dengan Tanpa <i>IDB</i> pada <i>ReDh = 4,77x10⁴</i> ...	73
4.6 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Penelitian Terdahulu pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i>	77

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	82

DAFTAR PUSTAKA 84

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Profil kecepatan aliran dalam saluran lurus.....	8
Gambar 2.2	Karakteristik aliran pada <i>elbow 90°</i> dan <i>Loss Coefficient Elbow</i>	9
Gambar 2.3	Terjadinya <i>secondary flow</i> pada belokan.....	10
Gambar 2.4	Separasi aliran pada <i>elbow circular</i>	11
Gambar 2.5	Terjadinya separasi aliran pada <i>boundary layer</i>	12
Gambar 2.6	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i>	12
Gambar 2.7	Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis	14
Gambar 2.8	a) Skema pengambilan <i>data</i> pada <i>test section</i> ; b) <i>Mesh</i> pada <i>volume</i>	19
Gambar 2.9	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$	20
Gambar 2.10	Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer elbow</i>	20
Gambar 2.11	Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya.....	21
Gambar 2.12	<i>Velocity profile</i> pada sudut 0°, 30°, 60°, dan 90° dengan variasi <i>curvature ratio</i> ($R_c/D = 1 - 5$)....	22
Gambar 2.13	Sekema pengambilan data dan definisi parameter untuk <i>square cylinder</i>	23
Gambar 2.14	a) <i>Streamwise velocity</i> dan <i>spectrum</i> analisis pada $Reynolds = 3400$ b) <i>Vorticity</i> $\omega^* OSC$ case A ($Re = 500$) & case B ($Re = 3400$)	24
Gambar 2.15	Geometri penelitian dan pemodelannya	25
Gambar 2.16	Pengaruh jarak <i>gap</i> terhadap formasi <i>vortex</i> pada $Re = 250$	26
Gambar 2.17	Skema instalasi penelitian dan gambar peletakan <i>IDB</i>	27
Gambar 2.18	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow 90°</i> dengan variasi $l/D_h = 0.1 - 0.5$ pada $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$	28

Gambar 2.19	Koefisien <i>Loss Elbow 90°</i> pada <i>square duct</i> dengan variasi $l/D_h = 0.1 - 0.5$ pada $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$ 29
Gambar 3.1	Skema instalasi penelitian dan peletakan <i>IDB</i> ... 32
Gambar 3.2	Model uji penelitian 33
Gambar 3.3	<i>Centrifugal Fan</i> 34
Gambar 3.4	<i>Honey Comb</i> dan <i>Nozzle</i> 35
Gambar 3.5	Konfigurasi <i>Oriented Square Disturbance Body</i> 35
Gambar 3.6	Skema pemasangan <i>wall pressure tap</i> dan <i>pitot tube</i> 36
Gambar 3.7	Lokasi perngambilan untuk profil kecepatan 37
Gambar 3.8	<i>Inclined Manometer</i> 38
Gambar 3.9	Skema validasi tekanan dinamis <i>pressure transducer 1" WC</i> 44
Gambar 3.10	Hasil validasi tekanan dinamis <i>pressure transducer 1" WC</i> 44
Gambar 3.11	Skema validasi tekanan statis <i>pressure transducer 3" WC</i> 45
Gambar 3.12	Hasil validasi tekanan statis <i>pressure transducer 3" WC</i> 46
Gambar 3.13	Skema validasi tekanan statis <i>pressure Transducer 1" WC</i> 46
Gambar 3.14	Hasil validasi tekanan statis <i>pressure transducer 1" WC</i> 47
Gambar 3.15	Lokasi perhitungan untuk <i>pressure drop</i> 51
Gambar 4.1	<i>Pressure drop</i> antara <i>upstream</i> dan <i>downstream duct</i> variasi letak <i>IDB 10°, 20°</i> dan tanpa <i>IDB</i> pada <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ 58
Gambar 4.2	<i>Pressure drop</i> antara <i>upstream duct, elbow 90°, downstream duct</i> pada <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ 59

Gambar 4.3	koefisien <i>losses elbow 90°</i> antara tanpa <i>IDB</i> dan variasi letak <i>IDB 5°, 10°, 15°, 20°</i> pada <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < ReD_h < 13,5 \times 10^4$ 61
Gambar 4.4	<i>Pressure coefficient elbow 90°</i> tanpa <i>IDB</i> sebagai fungsi <i>Reynolds Number</i> 63
Gambar 4.5	<i>Pressure coefficient elbow 90°</i> variasi a) <i>IDB 5°</i> b) <i>IDB 10°</i> c) <i>IDB 15°</i> d) <i>IDB 20°</i> fungsi <i>Reynolds Number</i> 64
Gambar 4.6	Profil kecepatan bidang horizontal pada <i>cross-section</i> (a) $x/D_h=0$ sec 1; (b) $x/D_h=1$ sec 2; (c) $x/D_h=5$ sec 4; (d) $x/D_h=8$ sec 9; (e) $x/D_h=11$ sec 12; (f) $x/D_h=13$ sec 14 68
Gambar 4.7	Gambar sekema pengambilan profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal pada masing - masing posisi <i>cross - section</i> 68
Gambar 4.8	Profil kecepatan bidang vertikal pada a) $x/D_h=0$ b) $x/D_h=1$ c) $x/D_h=2$ d) $x/D_h=3$ e) $x/D_h=4$ f) $x/D_h=5$ g) $x/D_h=8$ h) $x/D_h=11$ i) $x/D_h=12$ j) $x/D_h=$ 69
Gambar 4.9	13Profil kecepatan bidang vertikal (a) $x/D_h=0$ sec 1; (b) $x/D_h=1$ sec 2; (c) $x/D_h=5$ sec 4; (d) $x/D_h=8$ sec 9; (e) $x/D_h=11$ sec 12; (f) $x/D_h=13$ sec 14... 71
Gambar 4.10	Grafik <i>turbulent intensity</i> pada posisi $x/D_h=0$ setelah <i>outlet elbow 90°</i> 74
Gambar 4.11	Grafik fluktuasi kecepatan bidang horizontal $x/D_h = 0$ dan $z/D_h = 0,056$ pada saluran menggunakan <i>IDB</i> dengan variasi letak $5°, 10°$ dan tanpa <i>IDB 75</i>
Gambar 4.12	Grafik <i>velocity profile</i> bidang horizontal pada posisi $x/D_h = 1$ masing – masing data dan penelitian terdahulu 78
Gambar 4.13	<i>Pressure drop</i> saluran antara hasil eksperimen dan penelitian terdahulu oleh Aqfha Hardian..... 79

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Desain kecepatan untuk komponen HVAC	7
Tabel 3.1	Urutan langkah pengambilan data	52
Tabel 3.2	Peralatan penelitian.....	53
Tabel 4.1	<i>Pressure drop</i> antara <i>upstream</i> dan <i>downstream duct</i>	58

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Instalasi saluran udara sering kali kita jumpai dalam kehidupan sehari – hari, misalnya dalam bidang industri seperti pada instalasi gas buang pabrik, transportasi gas (*handling unit*) pada industri minyak dan gas, dan instalasi pengkondisian udara (*Air Handling Unit*) pada gedung-gedung bertingkat. Khusus pada sistem pengkondisian udara pada gedung – gedung bertingkat kenyamanan suatu gedung sangat penting baik untuk manusia maupun untuk melindungi peralatan – peralatan di dalam gedung tersebut. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem yang dapat mengkondisikan udara di dalam gedung tersebut agar kenyamanan tersebut dapat tercapai, namun sebagai konsekuensinya kebutuhan energi yang dibutuhkan menyumbang cukup besar dari total kebutuhan energi pada gedung tersebut. Dalam hal ini para kontraktor tata udara banyak mempergunakan sistem saluran pipa berbentuk persegi (*square duct*), karena lebih mudah dipasang dan tidak terlalu memakan tempat jika dibandingkan dengan saluran pipa silinder. Saluran berbentuk persegi (*square duct*) memiliki kerugian energi yang lebih besar dibandingkan dengan saluran silinder, maka diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi kerugian ini.

Instalasi tata udara terdiri dari dua komponen utama, yaitu pipa lurus dan *fitting*. Salah satu contoh *fitting* adalah *elbow*, yang berfungsi untuk membelokkan arah aliran agar instalasi sesuai dengan arah kebutuhan. Aliran yang mengalir melewati *elbow* 90° akan mengalami *pressure drop* akibat adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah melewati aksesoris tersebut. Separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient*. Sedangkan terbentuknya *secondary flow* terjadi akibat adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall*, distribusi tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar daripada sisi *inner wall*, hal ini memungkinkan partikel

fluida bergerak dari *outer wall* menuju *inner wall*. Kerugian-kerugian yang terjadi pada aliran baik kerugian gesekan (*friction loss*) dan kerugian akibat separasi (*separation loss*) dan *secondary flow* tersebut mengakibatkan terjadi fenomena aliran yang baru yaitu, terbentuknya *vortex* yang dapat mengurangi energi aliran sebagai akibat dari *separation loss* dan terjadinya penyumbatan aliran (*blockage effect*) serta mengurangi *effective flow area* sebagai akibat adanya *secondary flow* pada *cross section area*.

Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* pada aliran yang melewati *elbow 90°* adalah menambahkan sebuah bodi pengganggu (*Inlet Disturbance Body*) pada sisi *inlet inner wall elbow*. Penambahan *Inlet Disturbance Body* ini bertujuan untuk menunda *separation point* pada sisi *inner* dan *outer wall elbow* dan membuat aliran terjadi turbulen saat memasuki *elbow*. Semakin turbulen suatu aliran maka akan memiliki momentum yang lebih besar sehingga dapat menambah kemampuan untuk melawan *adverse pressure*, jika separasi aliran dapat tertunda dan aliran dapat kembali pada kontur aliran utamanya, maka akan terjadi penurunan *minor head losses* dan nilai *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin mengecil.

Rup dan Sarna [1] melakukan perbandingan penelitian yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct*. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada $Re = 40000$ yang memiliki ukuran geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$. Hasil yang didapatkan bahwa hasil simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada lokasi $\phi = 30^\circ$ dan 60° serta perbedaan profil kecepatan yang cukup signifikan pada lokasi $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($V_k = 1034\ 775$). Selain itu, didapatkan koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut

$\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$). Berdasarkan penelitian Dutta dan Nandi [2] secara eksperimen dan numerik mengetahui pengaruh variasi rasio radius kelengkungan *elbow* 90° pada bilangan Reynolds 1×10^5 sampai 10×10^5 terhadap pola aliran sekunder yang berputar pada *elbow* dan profil kecepatan aliran setelah melewati *elbow*. Variasi dari *curvature ratio* ($Rc/D = 1$ sampai 5), Rc merupakan radius kelengkungan dan D merupakan diameter pipa. Hasil dari penelitian ini didapatkan profil kecepatan terbaik terjadi pada variasi $Rc/D = 5$ dan bilangan Reynolds rendah ($Re = 10^5$). Dari penelitian ini disimpulkan bahwa rata – rata bentuk kecepatan aliran untuk semakin cepat membentuk *fully recovery* adalah bergantung pada bilangan Reynolds rendah dan semakin besarnya *curvature ratio*. Ozgoren [3] melakukan penelitian secara eksperimen dengan metode *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV) untuk mengetahui karakteristik aliran yang melewati *body circular cylinder* (CC), *square cylinder* (SC), dan 45° orientated *square cylinders* (OSC) dalam aliran seragam (*uniform flow*), observasi dilakukan pada daerah dekat wake (*wake region*), parameter karakteristik aliran ditentukan oleh besarnya *strouhal number*, yaitu bilangan tanpa dimensi yang menggambarkan mekanisme osilasi aliran pada Reynold 550 sampai 3400. Dari penelitian ini didapatkan nilai *strouhal number* untuk CC, SC, OSC berturut – turut 0.204 – 0.212, 0.120 – 0.134, 0.165 – 0.174 pada $550 \leq Re \leq 3400$. Pada body dengan nilai *strouhal number* terkecil merepresentasikan osilasi aliran terjadi menjauhi daerah wake. Mahir [4] melakukan penelitian simulasi numerik untuk mengetahui pengaruh variasi gap dan efek dari struktur aliran pada daerah wake (*wake region*) dari sebuah silinder kotak (*square cylinder*) yang diletakkan dekat sebuah *plane wall* dengan mengaplikasikan metode *fully implicit finite-difference* pada persamaan *Navier-Stokes*. Rasio jarak antara silinder dengan dinding (*gap*) dan diameter silinder (G/D) divariasikan dari 0,2 sampai 4. Reynolds yang digunakan adalah 175, 185, dan 250. Untuk rasio $G/D = 4$ vorteksitas yang terbentuk tidak berinteraksi dengan *boundary layer* yang terbentuk pada *plane wall*. Sedangkan

pada rasio $G/D = 1,2$ tiga *shear layer* berinteraksi pada *downstream* dari silinder. *Vortex* negatif dan positif terseparasi dari sisi atas dan bawah silinder, *vortex* negatif dari sisi bawah silinder berinteraksi dengan *vortex* negatif dari dinding. Hasil dari interaksi ini menjadikan *vortex* negatif semakin kuat dan *vortex* positif menjadi melemah pada sisi *downstream* silinder. Untuk rasio $G/D = 0,2$ negatif *shear layer* terseparasi dari sisi atas silinder hampir secara horizontal pada *wake region*, *shear layer* positif dan negatif masing – masing terseparasi pada sisi bawah silinder dan dinding, *vortex shedding* yang terbentuk lebih sedikit. Hardian [5] melakukan penelitian secara eksperimen aliran fluida pada *square duct* dan *square elbow 90°* yang melalui suatu bodi pengganggu berupa *Inlet Disturbance Body (IDB)*. Eksperimen ini dilakukan pada $Rc/Dh = 1.5$ dengan variasi peletakan *IDB* $l/Dh = 0.1$ sampai 0.5 . l merupakan jarak *longitudinal IDB* dari *inlet elbow*. Dh merupakan *diameter hydraulic square duct*. Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa penempatan *IDB* sebagai body pengganggu dapat menurunkan *pressure drop* yang terbaik pada peletakan $l/Dh = 0.1$ dengan presentase penurunan sebesar 23.57% dari tanpa *IDB*, sedangkan 12.61% nilai koefisien *losses elbow 90°* lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan *IDB*. Proses *recovery* aliran pada jarak *IDB* $l/D_h = 0.1$ lebih cepat jika dibanding variasi yang lain. Intensitas turbulensi pada sisi *inner outlet elbow 90°* tertinggi terjadi pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l/Dh = 0.1$ yaitu sebesar 30,92% dan nilai intensitas pada sisi *inner outlet elbow 90°* terendah terjadi pada saluran yang menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l/Dh = 0.4$ yaitu sebesar 8,07%.

1.2 Rumusan Masalah

Pada latar belakang masalah di atas, telah dijelaskan beberapa penyebab terjadinya *pressure drop* aliran di dalam *elbow 90°*, diantaranya disebabkan karena adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow*. Adanya intensitas turbulensi yang cukup kuat dari *shear layer* (aliran yang terseparasi) pada

Inlet Disturbance Body (IDB) diharapkan mampu memberikan agitasi pada *boundary layer* aliran yang melintasi dinding saluran yang memiliki kelengkungan, yaitu dengan melawan *adverse pressure* dan *wall shear stress*.

Blockage area pada sisi *outlet elbow 90°* semakin berkurang seiring bertambah besarnya radius kelengkungan *elbow 90°* (R_c), sehingga *pressure drop* juga semakin berkurang. Titik separasi aliran pada *inner wall elbow* akan semakin menjauhi *inlet elbow* pada R_c yang besar, sehingga dilakukan penelitian mengenai fenomena aliran pada *square duct* setelah melewati *elbow 90°* dengan $R_c/D_h = 3$ dan juga melewati suatu body pengganggu yaitu *Inlet Disturbance Body* (IDB) berbentuk *oriented square cylinder* yang divariasikan letaknya didalam *inner wall elbow* yaitu pada 5° sampai 20° .

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sehingga pembahasan dalam penelitian ini terfokus dan tidak melebar dari tujuan awal. Batasan masalah tersebut adalah sebagai berikut :

1. Fluida yang digunakan adalah udara yang memiliki sifat aliran *incompressible*, *viscous*, dan *steady*.
2. Temperatur fluida pada saluran udara diasumsikan konstan.
3. Perpindahan panas yang terjadi akibat gesekan fluida dan dinding diabaikan.
4. Kekasaran pada permukaan dinding diabaikan.
5. Variasi kecepatan berdasarkan pada standart *ASHRAE duct design*.
6. Aliran yang melintasi saluran udara termasuk dalam *region* aliran turbulen.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan umum dalam penelitian ini yaitu guna mengetahui pengaruh interaksi aliran antara *Inlet Disturbance*

Body (IDB) dan kelengkungan (*elbow 90°*) dinding saluran berpenampang bujur sangkar (*square duct*) yang divariasikan letaknya didalam *inner wall elbow* yaitu pada 5° sampai 20° , untuk mengetahui karakter aliran tersebut dilakukan studi eksperimental, adapun tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui *pressure drop* antara *upstream duct* dan *downstream duct*.
2. Mengetahui koefisien *loss minor elbow 90°* .
3. Mengetahui nilai *pressure coefficient* (C_p) pada *elbow 90°*.
4. Mengetahui profil kecepatan pada *downstream duct* (posisi bidang horisontal dan vertikal).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* instalasi saluran udara antara *downstream duct* dan *upstream duct* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.
2. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* serta koefisien *loss minor elbow 90°* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.
3. Memberikan gambaran tentang perbedaan nilai *pressure coefficient* (C_p) pada *elbow 90°* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.
4. Memberikan gambaran tentang perbedaan profil kecepatan aliran pada *downstream duct* yang melewati suatu saluran berpenampang *square* dan *elbow 90°* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

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

2.1 Aliran Fluida Dalam Pipa (*Internal Flow*)

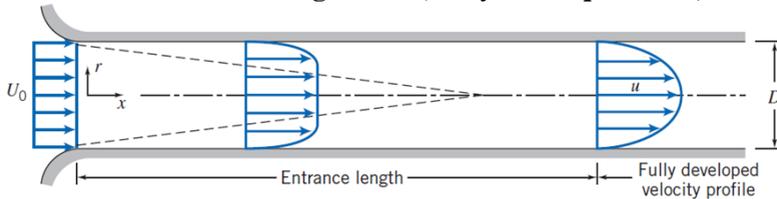
Aliran yang mengalir dan secara keseluruhan dibatasi oleh permukaan padat (*solid*) disebut aliran internal. Aliran internal tersebut mengalir melalui beberapa komponen seperti pipa, *duct*, *nozzle*, *diffuser*, *sudden contraction*, *expansion*, *valve* dan *fitting*. Salah satu aplikasi dari aliran internal tersebut adalah sistem *ducting*. *Ducting* merupakan suatu benda berbentuk sirkular dan rectangular yang berfungsi sebagai media untuk mendistribusikan fluida udara dari suatu lokasi ke lokasi lain. Aliran fluida yang melewati sistem *ducting* dalam perancangannya diatur berdasarkan standart *ASHRAE* [6], diantaranya rekomendasi kecepatan aliran udara yang diperbolehkan agar dalam operasinya tidak menimbulkan *noise*.

Tabel 2.1 Desain kecepatan untuk komponen HVAC ^[6]

No.	Duct Element	Face Velocity, m/s
1	Louvers <ul style="list-style-type: none"> • Intake • Exhaust 	2 2.5
2	Filters <ul style="list-style-type: none"> • Panel filter impingement • Dry-type, extended-surface • HEPA • Electric air cleaners 	1 – 4 1 – 3.8 1.3 0.8 – 1.8
3	Heating Coil <ul style="list-style-type: none"> • Steam and hot water • Electronic wire • Dehumidifying coils 	2.5 – 5 4.5 2 – 3
4	Air Washers <ul style="list-style-type: none"> • Spray type • Cell type • High velocity spray type 	1.5 – 3 1.5 – 5 6 – 9

Aliran dalam *ducting* pada umumnya berupa aliran *turbulence*. Untuk khusus aliran *turbulence* solusi analitis tidak dapat menyelesaikan secara pasti. Sehingga harus menggunakan pendekatan semi-empiris dan berdasarkan data eksperimen. Dalam khusus aliran fluida air yang melewati pipa *circular* batas transisi aliran *laminar* ke *turbulence* terjadi pada $Re \approx 2300$ dengan diameter 1-in. dengan kecepatan rata-rata 0,3 ft/s.

2.1.1 Aliran Berkembang Penuh (*Fully Developed Flow*)



Gambar 2.1 Profil kecepatan aliran dalam saluran lurus.^[6]

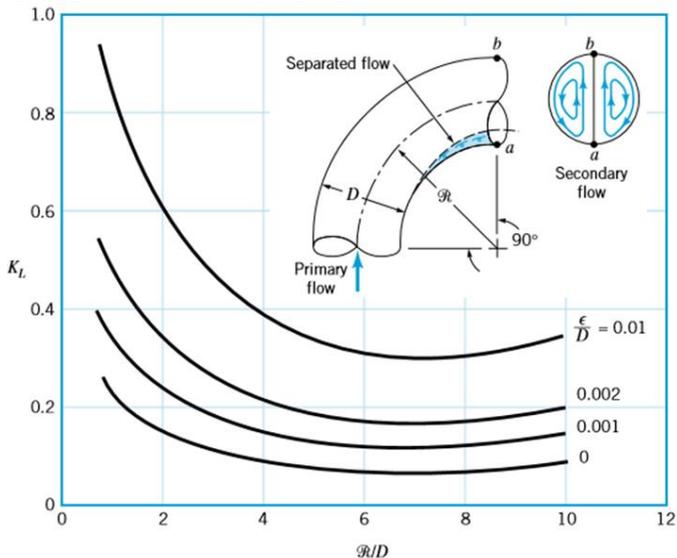
Gambar diatas menunjukkan bahwa ketika aliran *viscous* masuk ke dalam saluran dengan kecepatan tertentu dan bentuk aliran yang uniform, maka setelah pada jarak tertentu dindingnya akan membentuk lapisan batas (*boundary layer*). Sedangkan *entrance length* merupakan jarak dimana suatu fluida setelah memasuki saluran sebelum terbentuknya *fully developed flow*, untuk aliran laminar jarak *entrance length* sebesar $138D$, pada aliran turbulen sebesar $25D - 40D$. Lapisan tersebut akan bertemu pada suatu titik tertentu sehingga akan mengubah aliran menjadi bentuk *fully developed flow* sesuai dengan gambar tersebut. *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.

2.1.2 Karakteristik Aliran di Dalam *Elbow 90°*

Tikungan dalam pipa menghasilkan kerugian (*head loss*) yang lebih besar daripada jika pipa yang lurus. Kerugian ini diakibatkan adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah melewati aksesoris tersebut. Separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure*. Sedangkan terbentuknya *secondary flow* terjadi akibat adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall* dan akibat adanya interaksi *boundary layer* pada *endwall flow*. Efek dan besarnya *coefficient loss* tersebut bergantung pada besar Reynolds yang mengalir melalui sebuah *elbow 90°* ditunjukkan pada Gambar. 2.2. Kerugian gesekan karena panjang aksial *elbow 90°*.



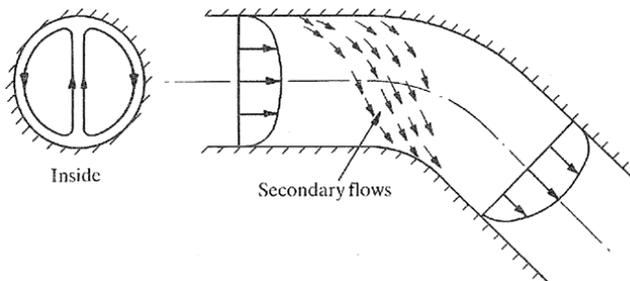
Gambar 2.2 Karakteristik Aliran pada *elbow 90°* dan *Loss Coefficient Elbow*.^[7]

Besar kecilnya nilai *coefficient loss elbow* (K_L) selain dipengaruhi oleh *Reynolds* juga dipengaruhi oleh rasio kelengkungan *elbow* (R). Gambar 2.2 menunjukkan hasil eksperimen nilai K_L dibandingkan dengan R/D untuk berbagai rasio kekasaran permukaan per – diameter pipa (ϵ/D).

2.1.3 Secondary Flow pada Elbow

Fluida yang melewati *elbow* akan menyebabkan terbentuknya *Secondary flow* akibat adanya perbedaan distribusi tekanan 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*.

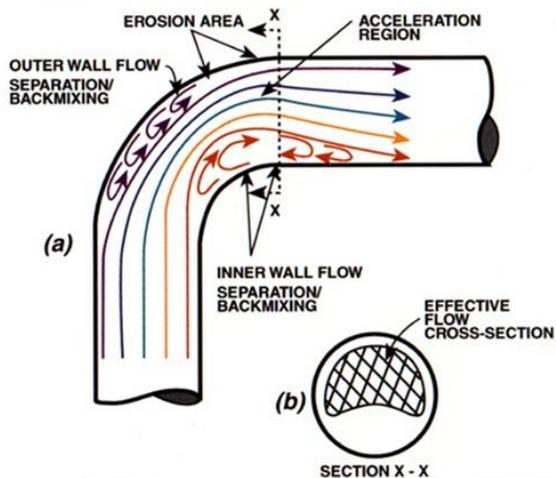


Gambar 2.3 Terjadinya *secondary flow* pada belokan.^[8]

2.1.1 Separation Loss pada Elbow

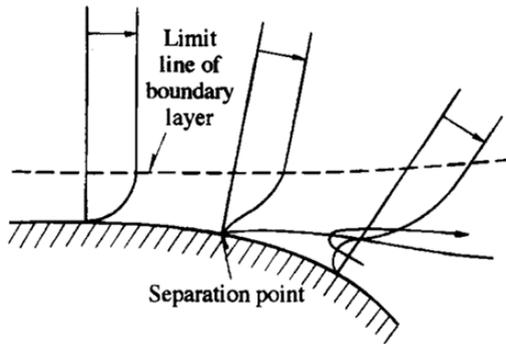
Sparasi aliran adalah fenomena dimana fluida terpisah dari arah vektornya akibat ketidak mampuan fluida melawan *adverse*

pressure gradient. 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*. Terbentuknya *vortex* tersebut akan berakibat pada mengecilnya luasan penampang aliran utama yang menyebabkan aliran mengalami percepatan dan menyebabkan terjadinya *pressure drop*. Terjadinya separasi aliran yang dapat menimbulkan terjadinya kerugian *pressure drop*.



Gambar 2.4. Separasi aliran pada *elbow circular*.^[9]

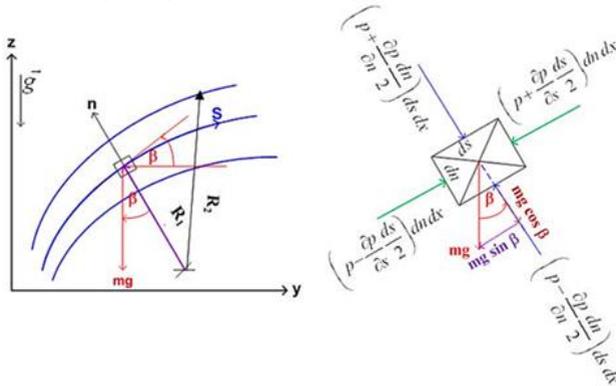
Detail titik separasi dan *boundary layer* pada sisi *inner wall elbow* ditunjukkan pada gambar 2.5. Dimana terlihat jelas momentum aliran yang melemah dan terbentuknya *adverse pressure*.



Gambar 2.5 Terjadinya separasi aliran pada *boundary layer* ^[10]

2.2 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*

Dari persamaan Euler menyatakan persamaan gerak dalam koordinat *streamline* untuk *inviscid flow*. *Streamline* adalah suatu garis yang digambarkan dalam medan aliran. Dimana garis yang bersinggungan pada setiap titik dalam satu garis, menyatakan arah kecepatan aliran. Setiap kecepatan aliran hanya diwakili oleh satu *streamline*, sehingga tidak ada aliran yang menyeberangi atau menyinggung *streamline* lain. Hal ini membuat streamline seakan-akan menjadi suatu batas padat yang tidak bisa ditembus oleh aliran itu sendiri (*imaginary solid boundary*).



Gambar 2.6 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* ^[6]

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.1)$$

Pada bidang yz seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Persamaan gerak dituliskan dalam koordinat s (jarak disepanjang *streamline*) dan juga koordinat n (jarak normal terhadap *streamline*). Tekanan di pusat dari element adalah p .

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

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.2)$$

Tanda negatif pada persamaan (2.2) menunjukkan hubungan bila kecepatan menurun maka tekanan naik.

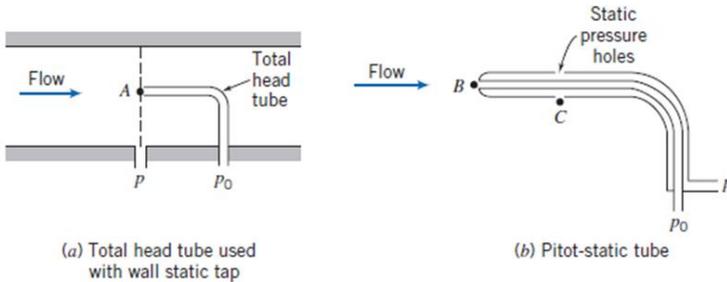
Untuk persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) 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.

2.3 Tekanan Statis, Tekanan Stagnasi dan Tekanan Dinamis

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



Gambar 2.7 Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis. ^[6]

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

$$\frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = \text{konstan} \quad (2.4)$$

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

$$P_o = P + \frac{U^2}{2} \rho \quad (2.5)$$

Tekanan dinamis merupakan selisih antara tekanan stagnasi dengan tekanan statis.

$$P_o - P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.6)$$

dimana:

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

2.4 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* adalah bilangan tidak berdimensi yang dapat mengklasifikasikan jenis aliran fluida. Pada umumnya jenis aliran fluida dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu laminar, transisi, dan turbulen. Dalam aplikasinya, aliran transisi jarang digunakan. Aliran fluida lebih sering diklasifikasikan menjadi 2 jenis aliran saja (laminar dan turbulen). Secara perumusan, bilangan *Reynolds* dapat ditulis sebagai berikut:

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} \quad (2.7)$$

dimana:

\bar{v} = Kecepatan fluida yang mengalir $\left(\frac{m}{s}\right)$

D = Diameter dalam pipa (m)

ν = Kekentalan kinematik fluida $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

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

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.8)$$

dimana:

D_h = Diameter hidrolis (m)

A = Luas penampang (m^2)

P = Keliling penampang (m)

2.5 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,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.9)$$

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*.

2.6 Head Loss

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

Salah satu penyebab *head losses* adalah konstruksi desain dari sistem pemipaan tersebut. Jika konstruksi memiliki percabangan yang lebih banyak maka akan memperbesar rugi alirannya, selain itu aliran yang semula dalam keadaan laminar pada saat melalui pipa lurus yang koefisien geseknya besar akan berubah menjadi aliran turbulen. Kondisi aliran turbulen inilah yang dapat merugikan dalam sistem pemipaan tersebut, seperti akan menimbulkan getaran dan juga pengelupasan dinding pipa. Selain itu akibat yang paling mendasar dengan adanya rugi-rugi aliran (*head losses*) ialah dapat menyebabkan besarnya energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan aliran fluida yang berdampak

meningkatnya penggunaan listrik pada mesin penggerak fluida seperti pompa. *Head losses* (rugi aliran) sering terjadi pada sistem pemipaan untuk seluruh perusahaan, industri rumah tangga, dan tempat lainnya yang menggunakan pipa sebagai distribusi aliran fluida.

2.6.1 *Head Loss Mayor*

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

a. Laminar

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

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{D} \quad (2.10)$$

Substitusi dari persamaan , didapatkan:

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{\rho D} = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2.11)$$

Dan koefisien gesekan (f) untuk aliran laminar adalah:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.12)$$

b. Turbulen

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

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.13)$$

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

2.6.2 Head Loss Minor

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

$$h_{lm} = K \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.14)$$

2.7 Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi merupakan bilangan untuk menentukan fluktuasi dari turbulensi dengan membandingkan *root mean square* dari fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (\bar{U}). Intensitas turbulensi dinyatakan dalam bentuk prosentase. Intensitas turbulensi dapat dinotasikan pada persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$IT = \frac{u'}{\bar{U}} \times 100\% \quad (2.15)$$

$$u' = \sqrt{\frac{\sum(\bar{U} - U_n)^2}{n - 1}}$$

dimana:

IT : Intensitas turbulensi

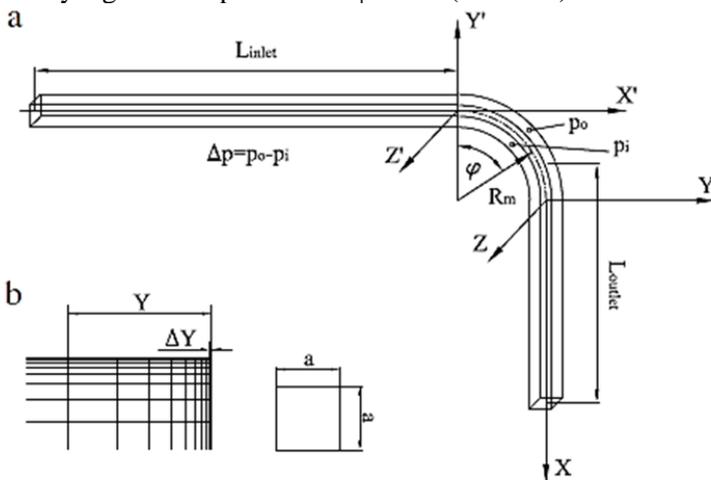
U_n : Kecepatan pada waktu tertentu (kecepatan lokal) (m/s)

\bar{U} : Kecepatan rata-rata (m/s)

u' : Standar deviasi fluktuasi kecepatan (m/s)

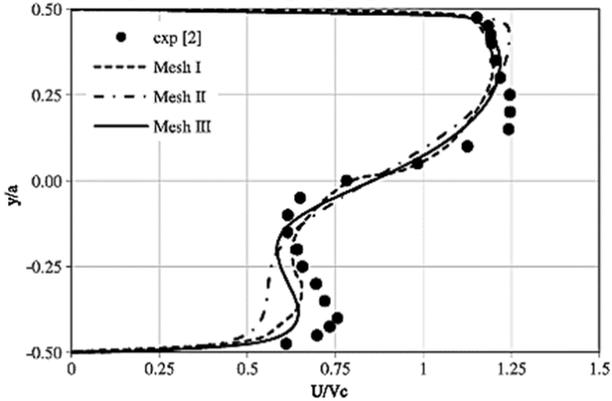
2.8 Penelitian Terdahulu

Rup dan Sarna [1] melakukan perbandingan penelitian yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct*. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada $Re = 40000$ yang memiliki ukuran geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $Dh = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20Dh = 1600$ mm. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$. Hasil yang diharapkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*. Kemudian didapatkan bahwa hasil simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada lokasi $\phi = 30^\circ$ dan 60° serta perbedaan profil kecepatan yang cukup signifikan pada lokasi $x/Dh = 1.0$ dan $z/Dh = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($V_k = 1034\ 775$). Selain itu, didapatkan koefisien tekanan maksimum di dinding elbow terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$).

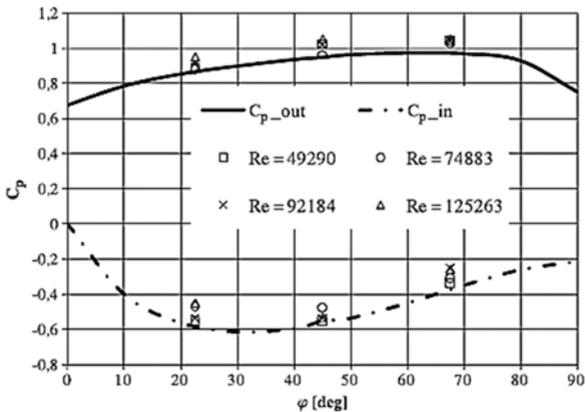


Gambar 2.8 a) Sekma pengambilan data pada *test section* b) Mesh pada *Volume*.^[1]

Hasil yang didapatkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*.



Gambar 2.9 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$. ^[1]



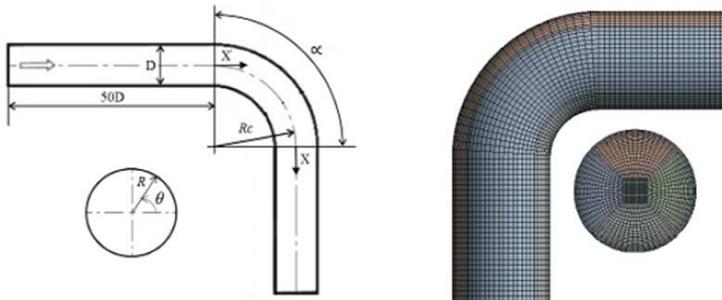
Gambar 2.10 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen. ^[1]

Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.11 yang menunjukkan profil kecepatan pada dengan lokasi $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil

eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($V_k = 1034\ 775$). Terjadi perbedaan kecepatan pada sisi *inner* dan sisi *outer* pada saluran setelah melewati *elbow*, hal itu dikarenakan adanya defisit momentum aliran pada sisi *inner* maupun *outer*, namun defisit momentum pada sisi *inner* jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sisi *outer*.

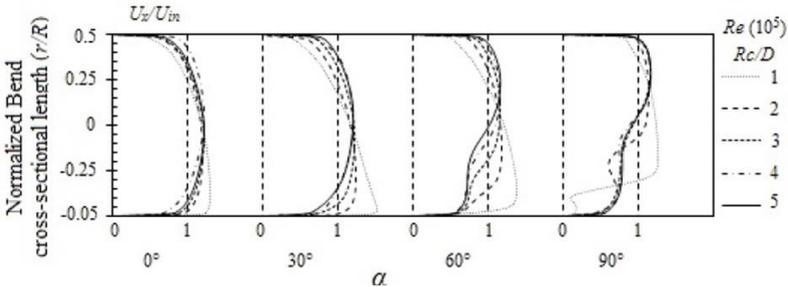
Gambar 2.10 memberikan informasi tentang distribusi koefisien tekanan pada *elbow* yang, dapat diamati bahwa koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$). Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar koefisien *losses* pada *elbow* tersebut.

Dutta dan Nandi [2] 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* ($R_c/D = 1$ sampai 5) dengan memiliki diameter inner yang sama yaitu 0,01 m serta menggunakan panjang *inlet* $50D$ dan panjang *outlet* $20D$, dimana R_c adalah radius kelengkungan dan D adalah diameter pipa serta menggunakan bilangan Re dari 1×10^5 sampai 10×10^5 .



Gambar 2.11 Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya. ^[2]

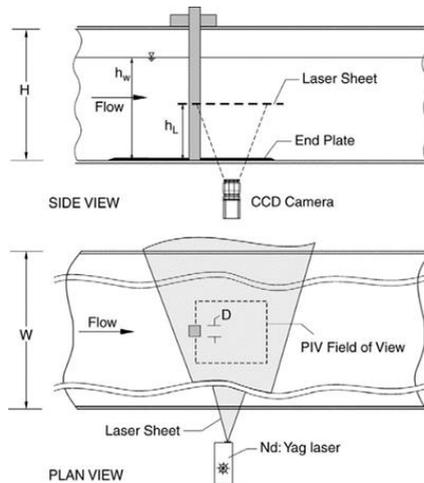
Dari penelitian ini didapatkan bahwa untuk nilai Re yang semakin tinggi, maka pengaruh kelengkungan akan menurun. Kecenderungan separasi aliran akan meningkat untuk lengkung dengan *curvature ratio* yang rendah serta kemampuan melawan *unsteady* dan *complex flow* akan meningkat untuk lengkung dengan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



Gambar 2.12 Velocity profile pada sudut $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, dan 90° dengan variasi *curvature ratio* ($R_c/D = 1 - 5$).^[2]

Gambar 2.12 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 gradient* 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.

Ozgoren [3] melakukan penelitian secara eksperimen dengan metode *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV) untuk mengetahui karakteristik aliran yang melewati *body circular cylinder* (CC), *square cylinder* (SC), dan 45° orientated *square cylinders* (OSC) dalam aliran seragam (*uniform flow*), observasi dilakukan pada daerah wake (*wake region*) secara *close-loop* pada saluran air, dengan lebar $W = 1000$ mm, panjang $L = 8000$ mm dan tinggi $H = 750$ mm. *body* SC berukuran $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ dan CC dengan diameter 20 mm.

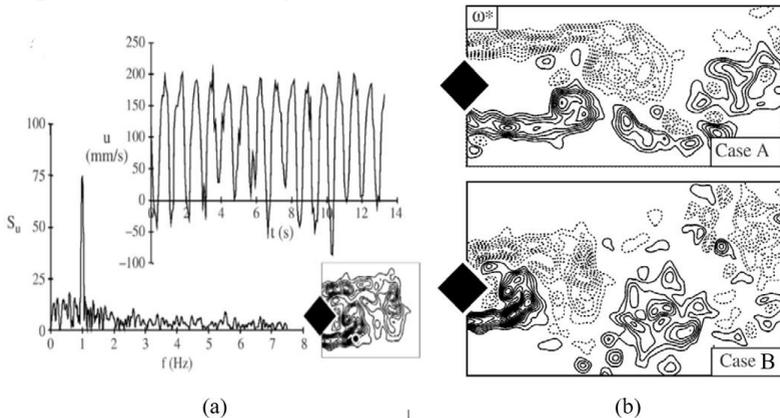


Gambar 2.13 Sekema pengambilan data dan definisi parameter untuk *square cylinder*.^[3]

Pada gambar 2.13, laser Nd: Yag digunakan untuk menghasilkan lapisan (*laser sheet*) dimana letaknya tegak lurus dengan sumbu *body cylinder*, dengan tebal sekitar 1,5 mm. *Laser sheet* terbentuk pada bidang horizontal setinggi $h_L = 330$ mm dari *end plate*. Dan sebuah camera CCD dengan resolusi 1024×1024 pixels digunakan untuk merekam profil kecepatan. Parameter karakteristik aliran ditentukan oleh besarnya *strouhal number*, yaitu bilangan tanpa dimensi yang menggambarkan mekanisme osilasi aliran pada daerah dekat wake bodi CC, SC dan OSC, dengan *Reynolds* 550 sampai 3400, semakin besar *strouhal number* maka aliran semakin berosilasi.

Dari penelitian ini didapatkan nilai frekuensi *vortex shedding* (f_s) yang terekam oleh DPIV di daerah dekat *wake bluff body*. *Strouhal number* untuk OSC adalah 0.165 pada *Reynolds* = 3400. Nilai puncak *vortex shedding frequency* untuk OSC adalah 1.05

pada *upper* dan *lower* daerah *wake* yang sama pada gambar 2.14 a. *Spectrum* (S_u) menghitung nilai puncak frekuensi *vortex shedding* OSC lebih besar dibandingkan dengan CC, yang diakibatkan dari tingkat fluktuasi alirannya.

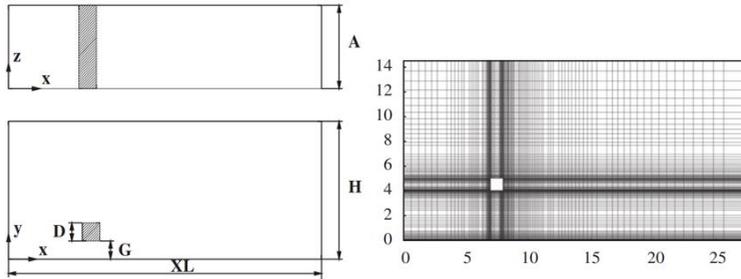


Gambar 2.14 (a) *Streamwise velocity* dan *Spectrum* analisis pada *Reynolds* = 3400 (b) *Vorticity* ω^* OSC case A ($Re = 500$) & case B ($Re = 3400$)^[3]

Gambar 2.14 (b) menunjukkan persilangan dan keacakan arah *vortex* yang terbentuk dari sisi atas dan bawah bodi silinder. Sisi atas adalah *vortex* negatif (*dashed lines*) berputar searah jarum jam dan sisi bawah adalah *vortex* positif (*solid lines*) berputar berlawanan dengan arah jarum jam melawan arah aliran dari sisi atas dan bawah bodi silinder. Pada OSC titik separasi aliran tertunda hingga ujung sisi atas dan bawah, separasi aliran tersebut membentuk *vortex* dan menutup luasan daerah *wake*. Karena silinder OSC memiliki frekuensi *vortex shedding* yang cukup besar maka panjang *vortex* nya juga semakin jauh.

Mahir [4] melakukan penelitian simulasi numerik untuk mengetahui efek dari struktur aliran pada daerah *wake* (*wake region*) dari sebuah silinder kotak (*square cylinder*) yang diletakkan dekat sebuah *plane wall* dengan mengaplikasikan metode *fully implicit finite-difference* pada persamaan *Navier-Stokes*. Rasio jarak antara silinder dengan dinding (*gap*) dan diameter silinder

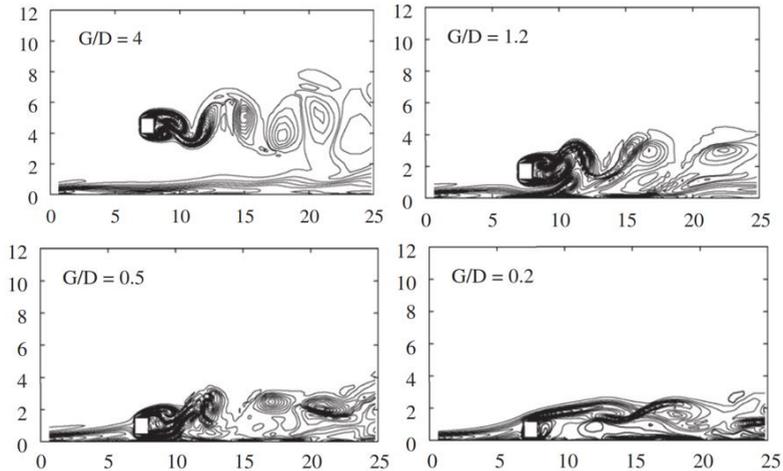
(G/D) divariasikan dari 0,2 sampai 4. Reynolds yang digunakan adalah 175, 185, dan 250. Jarak lateral *inflow* sepanjang $8D$ dan *outflow* $20D$. Variasi *gap* ini digunakan untuk memeriksa letak boundary dimana terdapat *vortex* dan *non-vortex* pada *downstream* silinder.



Gambar 2.15 Geometri penelitian dan pemodelan komputasinya.^[4]

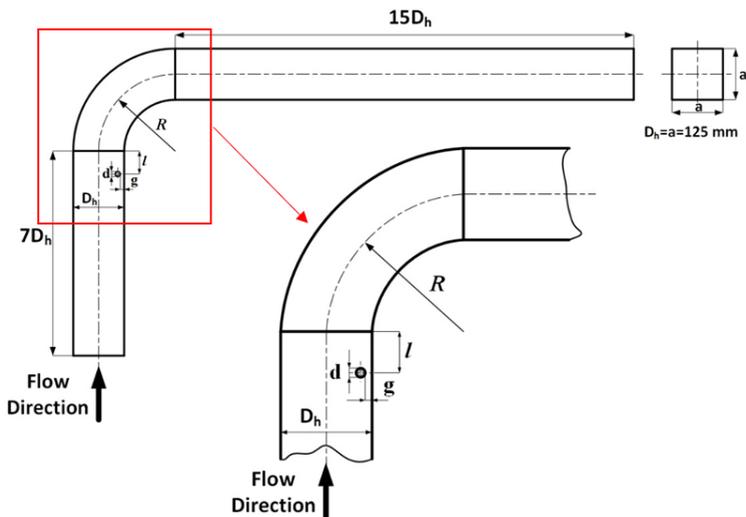
Dari penelitian ini didapatkan *vortex shedding* yang terbentuk di daerah *wake downstream* silinder pada $Reynolds = 250$, dimana panjang dari *vortex shedding* berkurang seiring berkurangnya rasio G/D . Gambar 2.16 menunjukkan untuk rasio $G/D = 4$ *vortex shedding* yang terbentuk tidak berinteraksi dengan *boundary layer* dari *plane wall*. Sedangkan pada rasio $G/D = 1,2$ tiga *shear layer* berinteraksi pada *downstream* dari silinder. *Vortex* negatif dan positif terpisah dari sisi atas dan bawah silinder, berinteraksi dengan *vortex* negatif dari dinding. Hasil dari interaksi ini menjadikan *vortex* negatif semakin kuat dan *vortex* positif menjadi melemah pada sisi *downstream* silinder. Pada $G/D = 0,5$ terdapat *shear layer* negatif yang bergulung secara periodik dari atas silinder dan pada waktu yang sama terdapat *shear layer* lemah positif dari sisi bawah silinder terseparasi dengan *shear layer* negatif dari dinding. *Shear layer* tersebut tidak menghasilkan *vortex street* yang mana digambarkan pada rasio besar ($G/D = 4$). Untuk rasio $G/D = 0,2$ negatif *shear layer* terseparasi dari sisi atas silinder hampir secara horizontal pada *wake region*, *shear layer* positif dan negatif masing – masing terseparasi pada sisi bawah

silinder dan dinding, *vortex shedding* yang terbentuk lebih sedikit karena merapat pada dinding.



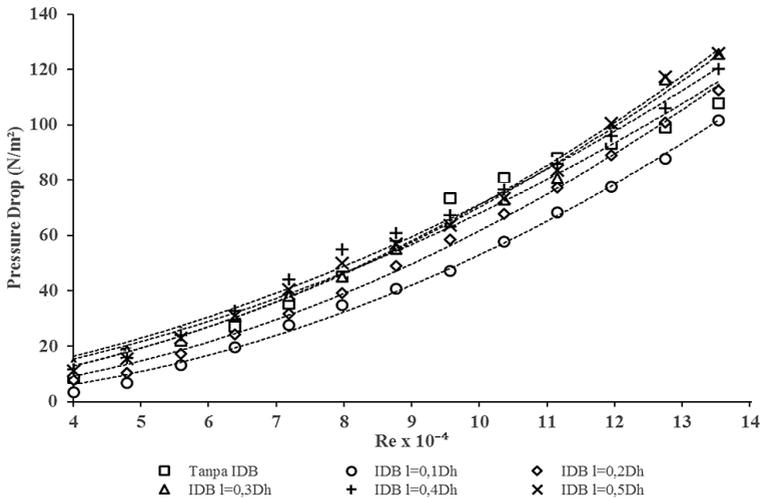
Gambar 2.16 Pengaruh jarak *gap* terhadap formasi *vortex* pada $Re = 250$.^[4]

Hardian [5] melakukan penelitian secara eksperimen aliran fluida pada *square duct* dan *square elbow 90°* yang melalui suatu bodi pengganggu berupa *Inlet Disturbance Body (IDB)*. Eksperimen ini dilakukan pada $Rc/Dh = 1.5$ dengan variasi peletakan *IDB* $l/Dh = 0.1$ sampai 0.5 . l merupakan jarak *longitudinal IDB* dari *inlet elbow*. Dh merupakan *diameter hydraulic square duct*. *Inlet Disturbance Body* yang digunakan berbentuk silinder dengan tinggi 125 mm dan berdiameter 12,5 mm. *Reynolds Number* yang digunakan untuk mendapatkan nilai *pressure drop* dan koefisien *loss minor elbow 90°* adalah $3,97 \times 10^4$ sampai $13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s), untuk mendapatkan nilai *Pressure Coefficient* pada *elbow 90°* adalah $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $13,5 \times 10^4$, sedangkan untuk mendapatkan profil kecepatan dan intensitas turbulensi digunakan kecepatan 11 m/s dengan *Reynolds Number* $8,74 \times 10^4$.



Gambar 2.17 Skema instalasi penelitian dan gambar peletakkan *IDB*. [5]

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

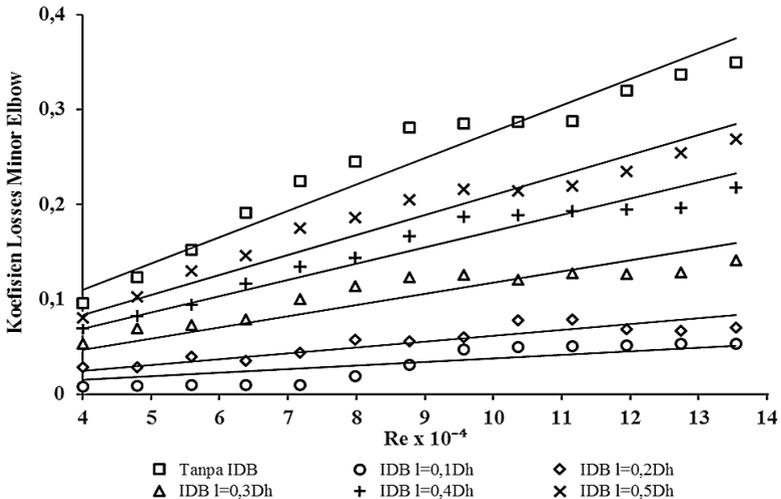


Gambar 2.18 *Pressure drop* pada *square duct* dengan *square elbow 90°* dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada $3,97 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$. [5]

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*. Pada jarak *inlet disturbance body* $0,1 D_h$ mempunyai *Trendline* grafik meningkat mulai dari *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$ sampai dengan *Reynolds Number* $13,5 \times 10^4$. *Trendline* grafik meningkat ini juga terjadi pada jarak $0,2 D_h$, $0,3 D_h$, $0,4 D_h$, dan $0,5 D_h$ mulai dari *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$ sampai dengan *Reynolds Number* $13,5 \times 10^4$. Dari seluruh variasi jarak *inlet disturbance body*, dapat dilihat bahwa pada jarak *inlet disturbance body* $0,1 D_h$ memiliki *pressure drop* paling rendah dengan persentase kenaikan *pressure drop* sebesar 23,57% pada setiap variasi *Reynolds Number*, sedangkan pada jarak *inlet disturbance body* $0,5 D_h$ memiliki *pressure drop* paling tinggi

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

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



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

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

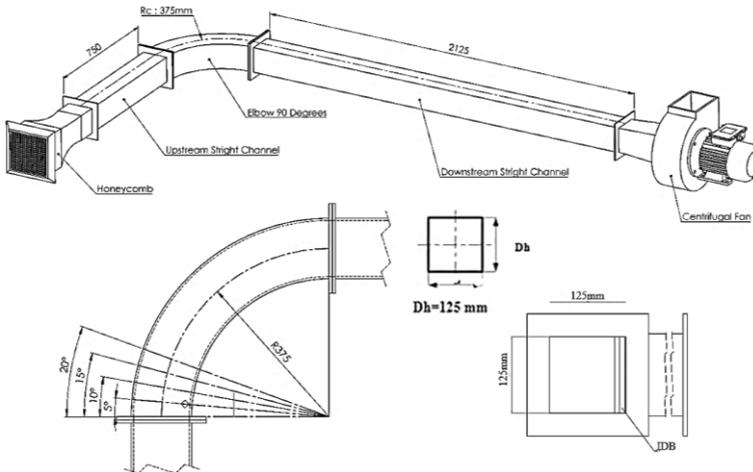
Metode penelitian yang digunakan, yaitu secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran yang melewati *elbow 90°* dengan rasio kelengkungan ($Rc/Dh = 3$) dan juga melewati *body* pengganggu berupa *Inlet Disturbance Body* yang divariasikan letaknya didalam *inner wall elbow* yaitu pada 5° , 10° , 15° , 20° dari *inlet elbow*. *Inlet Disturbance Body* yang digunakan berbentuk *square cylinder* yang diputar 45° (*Oriented Square Cylinder*) dengan tinggi 125 mm dan berdiameter hidrolis (Dh_{IDB}) 12,5 mm.

Klasifikasi bilangan *Reynolds* untuk setiap pengambilan data dapat dibedakan sebagai berikut:

- *Pressure Drop* dan *Coefficient Loss Minor elbow 90°* pada *Reynolds* $1,59 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$.
- *Pressure Coefficient* pada *elbow 90°* pada *Reynolds* $4,77 \times 10^4$; $6,36 \times 10^4$; dan $9,54 \times 10^4$.
- *Velocity Profile* dan intensitas turbulensi digunakan kecepatan 6 m/s dengan *Reynolds* $4,77 \times 10^4$.

3.1 Skema Penelitian

Skema penelitian ini menggunakan beberapa komponen yang terdiri dari *honeycomb*, *square duct (upstream & downstream)*, *square elbow 90°*, *centrifugal fan* dan *connector*. *Single inlet disturbance body*. Pada gambar 3.1 menunjukkan skema instalasi penelitian secara keseluruhan dari pandangan *isometric* dengan arah aliran udara masuk dari *inlet upstream square duct* dan dilengkapi dengan peletakkan *inlet disturbance body (IDB)* dipasang pada *inner wall elbow 90°* pada 5° , 10° , 15° , 20° dari *inlet elbow*.



Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian dan peletakkan IDB

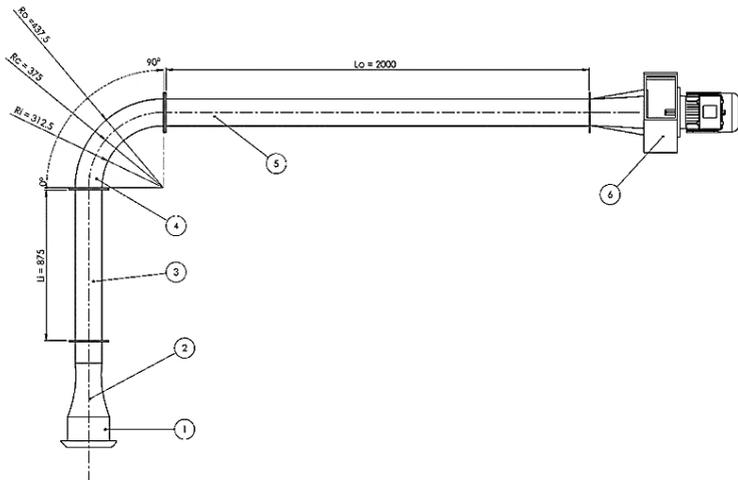
3.2 Peralatan Pendukung

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

3.2.1 Square Ducting

Penelitian menggunakan *square ducting* dan *square elbow 90°* ini dimaksudkan untuk dapat menguji benda dalam skala model. Hal ini disebabkan pengukuran dengan skala sebenarnya cukup sulit dan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Oleh sebab itu, dibuatlah *square ducting* dan *square elbow 90°* dengan pembuatan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasilnya cukup akurat dan memadai.

Square ducting yang digunakan dalam percobaan ini adalah jenis *open circuit*, dimana udara yang dialirkan dalam *ducting* langsung bebas dilepas ke udara bebas setelah melalui *work section*.



Gambar 3.2 Model uji penelitian

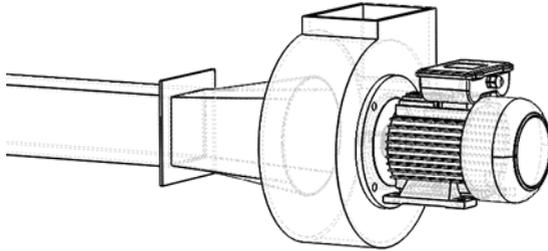
- Keterangan :
1. *Honeycomb*
 2. *Nozzle*
 3. *Upstream Straight Duct*
 4. *Square Elbow 90°*
 5. *Downstream Straight Duct*
 6. *Centrifugal Fan*

Spesifikasi *Square Ducting* :

- Bahan : Akrilik
- Tebal : 8 mm
- L_i (*upstream straight duct*) : 875 mm
- L_o (*downstream straight duct*) : 2000 mm
- R_c (*centerline elbow 90° radius*) : 375 mm
- R_i (*inner radius*) : 312,5 mm
- R_o (*outer radius*) : 437,5 mm
- D_h (*diameter hidrolik*) : 125 mm
- g (*gap IDB & inner wall elbow*) : 2,5 mm

3.2.2 *Centrifugal Fan*

Pada penelitian ini menggunakan satu buah *centrifugal fan* yang disambungkan dengan *inverter*. *Inverter* berfungsi sebagai pengatur kecepatan *fan* dengan pengaturan frekuensinya. Spesifikasi dari *centrifugal fan* sebagai berikut:

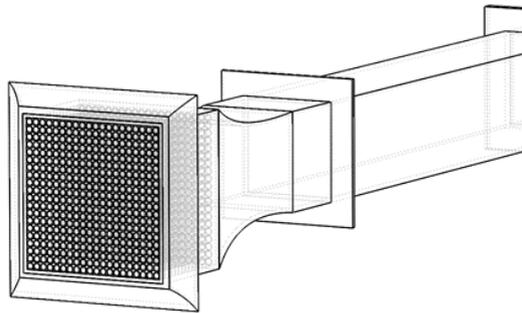


Gambar 3.3 *Centrifugal Fan*

- Merk : ElexMax Three-Phase Asynchronous Motor
- Type : VDC/4 – 225
- Voltage : 220 / 380 Voltage
- Frekuensi : 50 Hz
- Daya : 0,75 kW
- Fan Speed : 1440 rpm
- Air Volume : 2550 m³/h
- Berat : 8,7 kg

3.2.3. *Honey Comb, Screen dan Nozzle*

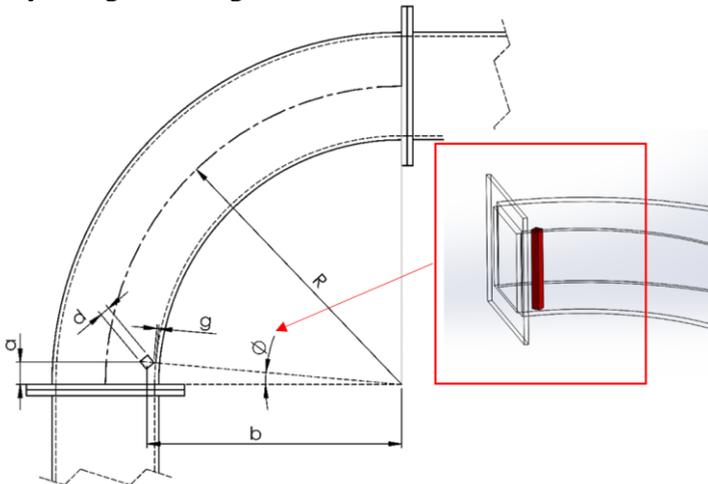
Nozzle berfungsi untuk menambah kecepatan aliran sebelum memasuki *test suction*. Didalam *nozzle* terdapat *screen* dan *honeycomb* yang berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati uniform dan mengurangi turbulensi aliran ketika memasuki instalasi *test suction*.



Gambar 3.4. *Honey Comb dan Nozzle*

3.2.4. *Inlet Disturbance Body*

Bodi pengganggu pada penelitian ini berbentuk bujur sangkar dengan ukuran $p \times l \times t = 12.5\text{mm} \times 12.5\text{ mm} \times 125\text{mm}$, yang diputar 45° . *Inlet Disturbance Body* ini divariasikan pada jarak 5° , 10° , 15° , dan 20° dari *inlet elbow*, dengan jarak gap antara *inner wall elbow* dan ujung *IDB* sebesar $2,5\text{mm}$ atau $0.2\text{ g/d}_{\text{sylinder}}$. Material *IDB* dari bahan acrylic yang dengan *roughness* yang sama nilainya dengan dinding *duct*.



Gambar 3.5 konfigurasi *Oriented Square Disturbance Body*

3.2.5. Alat Ukur

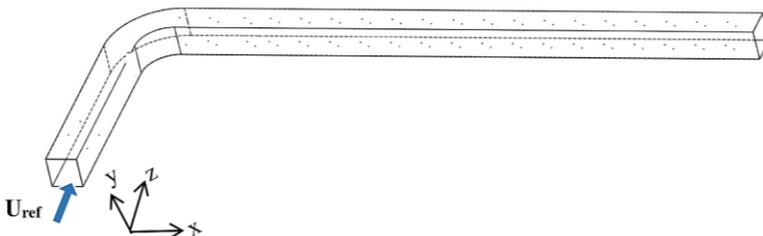
Pada spesimen ini dibutuhkan beberapa alat ukur untuk mendapatkan tekanan statis dan tekanan stagnasi, diantaranya adalah *wall-pressure tap*, *pitot static tube*, *tranducer* dan *manometer inclined*.

1. *Wall-pressure tap*

Wall-pressure tap yaitu lubang–lubang kecil berdiameter 1 mm yang terhubung pada manometer atau tranducer tekanan serta dipasang sepanjang kontur permukaan benda uji maupun saluran yang searah aliran dan tegak lurus terhadap permukaan.

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

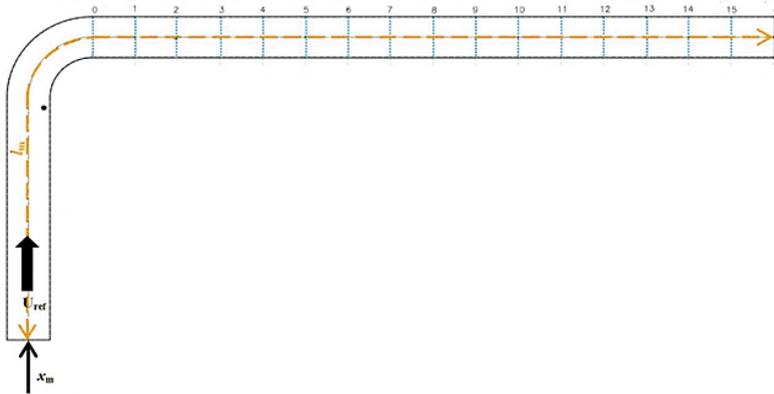


Gambar 3.6 Skema pemasangan *wall pressure tap* dan *pitot tube*

Posisi pemasangan *stagnation pitot tube* dan *wall pressure tap* pada benda uji secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.6. *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 937,5 mm dari *inlet upstream* sampai pada titik yang berjarak 2937,5 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*. Pada gambar 3.7 ditunjukkan beberapa lokasi yang akan diteliti untuk mendapatkan profil kecepatan.



Gambar 3.7 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan

3. Transducer Tekanan dan Data Aquisisi

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

1. Untuk mengukur profil kecepatan

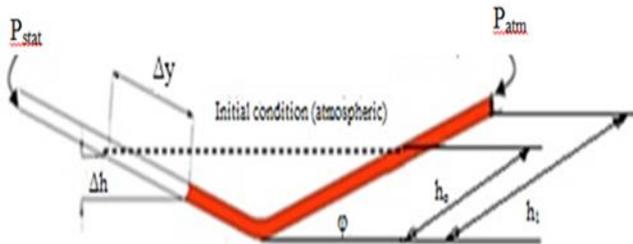
Model	: PX653 - 01D5L
Range	: $\pm 1''$ WC
Akurasi	: 0.25 % FS (Fullscale)
Output	: 1 – 5 VDC
Excitation	: 12 – 36 VDC
Ser.no.	: X14500102

2. Untuk mengukur *pressure drop*

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 3.8.



Gambar 3.8 *Inclined Manometer*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Kerosene* ($SG_{\text{kerosene}} = 0,827$)
- Kemiringan : 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*. Gambar 3.5 menjelaskan konfigurasi dari parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran sepanjang *downstream straight duct*.

- Δp : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m^2)
- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- μ : viskositas absolut fluida (kg/(m.s))
- U_{ref} : kecepatan *freestream* di *upstream straight duct* (m/s)
- u : kecepatan local (m/s)
- D_h : diameter hidrolis saluran (mm)
- R : *centerline elbow 90° radius* (mm)
- g : *gap cylinder disturbance* dari dinding *inner* (mm)
- a : jarak titik sumbu *IDB* dari *inlet elbow* (mm)
- b : jarak titik sumbu *IDB* dari *center radius* (mm)
- \emptyset : sudut antara titik sumbu *IDB* dengan *inlet elbow*
- y : aliran searah sumbu koordinat y
- z : aliran searah sumbu koordinat z
- x : aliran searah sumbu koordinat x

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

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

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

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

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

1. $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}$: koefisien tekanan
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*

3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{a}{D_h}$: perbandingan jarak antara titik sumbu *IDB* dari *inlet elbow* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{b}{D_h}$: perbandingan jarak antara titik sumbu *IDB* dari *center radius* dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap IDB* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
10. $\pi_{10} = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

- $\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10})$ (3.2)

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

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

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

Parameter a dengan b memiliki hubungan tangensial terhadap sudut \emptyset sehingga persamaannya menjadi,

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

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

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_3 (Re_{D_h}, \phi) \quad (3.6)$$

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

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

$$u = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, a, b, R, g, x, y, z,) \quad (3.7)$$

dimana u adalah kecepatan lokal (m/s)

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

1. $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}$: koefisien tekanan
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*
3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{a}{D_h}$: perbandingan jarak antara titik sumbu *IDB* dari *inlet elbow* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{b}{D_h}$: perbandingan jarak antara titik sumbu *IDB* dari *center radius* dengan diameter hidrolik

6. $\pi_6 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap IDB* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
10. $\pi_{10} = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

- $\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10})$ (3.8)

- $\frac{u}{U_{ref}} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right)$ (3.9)

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

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.10)$$

Parameter a dengan b memiliki hubungan tangensial terhadap sudut \emptyset sehingga persamaannya menjadi,

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{b}, \frac{x}{D_h}\right) = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \emptyset, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.11)$$

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

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_3\left(Re_{D_h}, \emptyset, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.12)$$

Untuk menghitung profil kecepatan dengan menggunakan *Reynolds number* konstan yaitu $4,77 \times 10^4$.

3.4 Langkah-Langkah Validasi

Ada beberapa langkah validasi yang perlu dilakukan sebelum pengambilan data, yaitu :

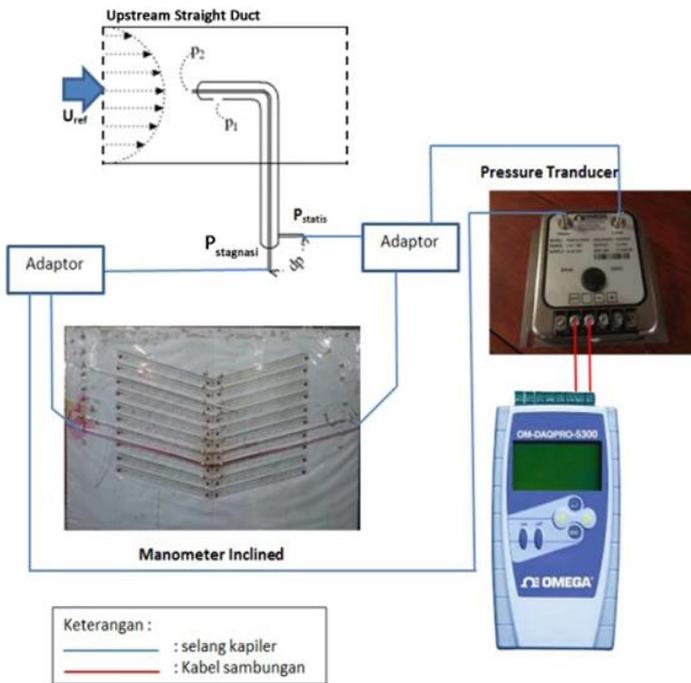
3.4.1 Alat yang digunakan

Peralatan yang dipergunakan pada proses kalibrasi :

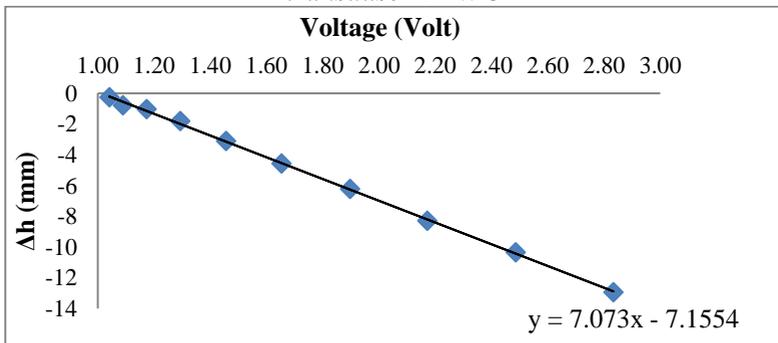
- *Inclined Manometer*
- *Pressure Transducer 1" WC*
- *Pressure Transducer 3" WC*
- *Data Aquisisi DAQ PRO 5300*
- *Pitot Static Tube*

3.4.2 Validasi Tekanan Dinamis

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



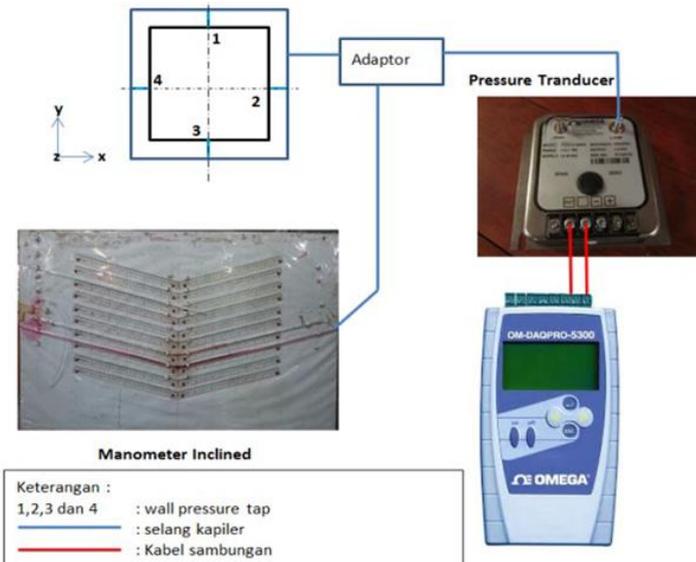
Gambar 3.9 Skema validasi tekanan dinamis dengan *pressure transduser 1" WC*



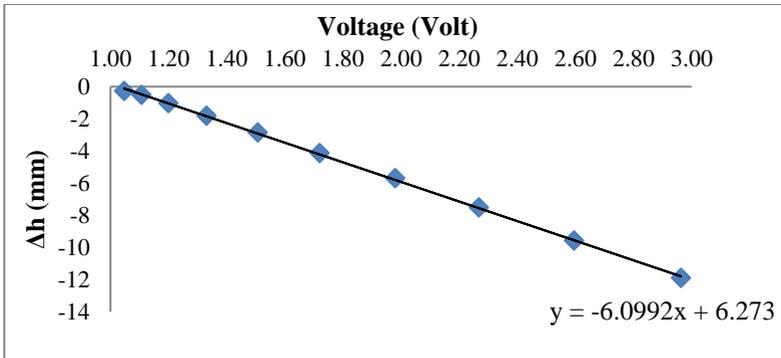
Gambar 3.10 Hasil validasi tekanan dinamis *pressure transduser 1" WC*

3.4.3 Validasi Tekanan Statis

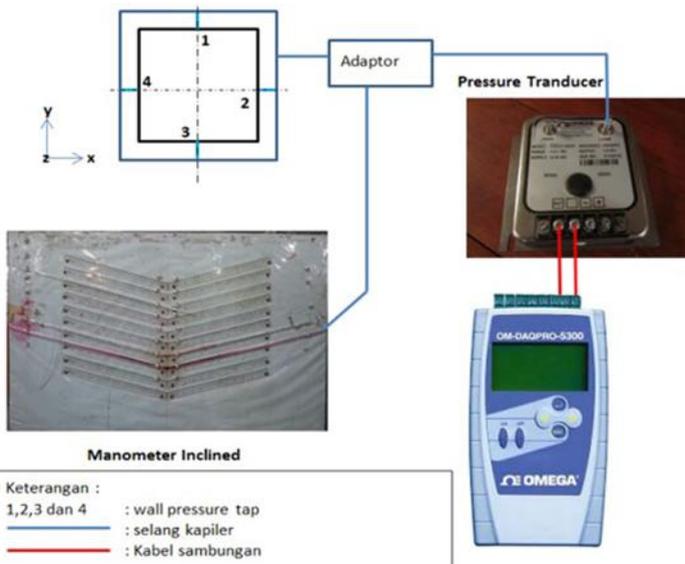
1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *inlet disturbance body*.
2. *Wall pressure tap* pada *inlet upstream* dihubungkan pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transduser 3" WC* untuk *pressure drop* dan *coefficient loss elbow* pada gambar 3.11 & 3.12
5. Diambil data *manometer* dan *pressure transduser 1" WC* untuk *pressure coefficient elbow (CP)* pada gambar 3.13 & 3.14
6. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data aquisisi didapatkan *Voltage (Volt)*.
7. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer vs voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



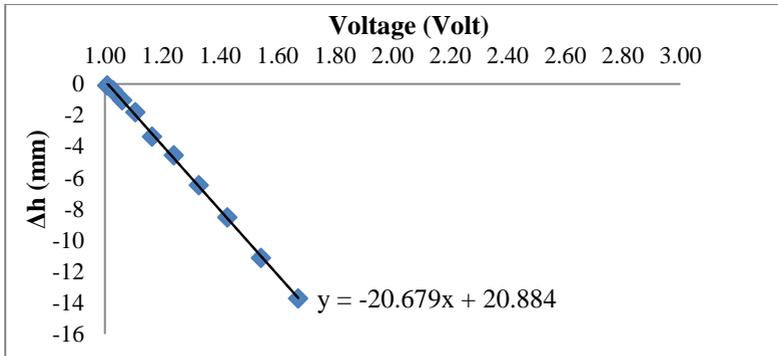
Gambar 3.11 Skema validasi tekanan statis dengan *pressure transduser 3" WC*



Gambar 3.12 Hasil validasi tekanan statis dengan *pressure transduser 3" WC*



Gambar 3.13 Skema validasi tekanan statis dengan *pressure transduser 1" WC*



Gambar 3.14 Hasil validasi tekanan statis dengan *pressure transduser 1" 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.*
- b) *Pitot tube* dipasang pada posisi yang ingin diukur.
- c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan menggunakan selang kapiler.
- d) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
- e) *Voltage* dari *pressure transducer* pada tekanan stagnasi pada dicatat.
- f) *Blower* dimatikan
- g) Langkah d sampai f diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.

2. Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:
 - a) *Test section* dipersiapkan.
 - b) *Wall pressure tap* dihubungkan ke *pressure transducer* dengan selang kapiler.
 - c) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - d) Data *voltage* dari *pressure transducer* dicatat.
 - e) Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* pada titik *section* selanjutnya.
 - f) Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi $15D_h$ dari *inlet downstream straight duct*.

3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif

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

- Diameter hidrolis (D_h) : 125 mm
- Panjang *downstream straight duct* : 2000 mm
- Panjang *upstream straight duct* : 875 mm
- Sudut *inclined manometer* (θ) : 15°
- *Specific Gravity kerosene* ($SG_{kerosene}$) : 0,827
- Percepatan Gravitasi (g) : $9,81 \text{ m/s}^2$
- Temperatur ruangan (T) : 28°C
- Massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{ud}) : $1,182 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas kinematis pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ν) : $1,59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Massa jenis air pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{H2O}) : $996,4 \text{ kg/m}^3$

1) Perhitungan untuk *Reynolds Number*

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynolds* yang didapat melalui persamaan 3.13 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada *Reynolds Number* $1,46 \times 10^4$.

$$Re_{Dh} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot Dh}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot Dh}{\nu} \quad (3.13)$$

dimana: ρ_{ud} : massa jenis udara pada 28°C (kg/m³)
 ν : viskositas kinematis udara pada T = 28°C (m²/s)
 μ : viskositas absolut udara pada T = 28°C
 U_{ref} : kecepatan freestream pada *upstream duct* (m/s)
 D_h : diameter hidrolis ducting (m)
 Re_{Dh} : *Reynolds number*

Fan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *centrifugal fan*. Untuk mendapatkan kecepatan awal (U_{ref}) 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 3.14 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 = SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta y \sin 15^\circ$$

$$U_{ref}^2 = \frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}$$

$$U_{ref} = \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}} \quad (3.15)$$

dimana : $P_{dinamis}$: ($P_{stagnasi} - P_{statis}$) tekanan dinamis diukur dengan *pitot tube* (N/m²)

$\rho_{kerosene}$: massa jenis *kerosene* pada 28°C (kg/m³)

ρ_{udara} : massa jenis udara pada 28°C (kg/m³)

g : percepatan gravitasi (m/s²)

Δh : perbedaan fluida pada manometer (m)

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

$SG_{kerosene}$: *Specific Gravity kerosene* pada 28°C

ρ_{H2O} : massa jenis air pada 28°C (kg/m³)

2) Perhitungan kecepatan lokal

Profil kecepatan diukur pada 15 test section sepanjang *downstream straight duct* dengan variasi jarak peletakkan *inlet disturbance body*. Perhitungan profil kecepatan pada setiap

section sepanjang *downstream straight duct* ditulis sesuai persamaan 3.16 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{udara}}} \quad (3.16)$$

dimana:

- p_o : tekanan stagnasi yang diukur dengan *stagnation pressure tube*
- p_s : tekanan statis sejajar dengan *stagnation pressure tube*
- ρ_{ud} : massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$
- $p_o - p_s$: tekanan dinamis

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

Koefisien losses elbow 90° adalah nilai konstanta yang yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah *elbow 90°* pada sebuah saluran udara. Eksperimen ini menggunakan *elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *inlet disturbance body*. Semakin besar rasio kelengkungan *elbow 90°* akan mengakibatkan koefisien losses elbow 90° pada saluran semakin kecil. Dengan ditambahkannya *IDB* berbentuk bujur sangkar (diputar 45°) didalam *inner wall elbow* diharapkan koefisien losses elbow bisa lebih kecil dibandingkan tanpa *IDB*. Pada eksperimen ini, koefisien losses elbow 90° didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* .

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

$$K_{elbow 90^\circ} = \frac{(P_{outlet elbow 90^\circ} - P_{inlet elbow 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.18)$$

dimana :

$P_{outlet\ elbow\ 90^\circ}$: Tekanan pada <i>outlet elbow 90°</i> (N/m ²)
$P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}$: Tekanan pada <i>inlet elbow 90°</i> (N/m ²)
\bar{v}^2	: Kecepatan udara masuk pada upstream (m/s)
ρ_{udara}	: massa jenis udara pada 28°C (kg/m ³)
$K_{elbow\ 90^\circ}$: <i>coefficient losses elbow 90°</i>

Koefisien losses elbow 90° pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number* $1,59 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,54 \times 10^4$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi jarak peletakan *inlet disturbance body* $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$.

4) Perhitungan *Pressure Drop* (Δp)

Pressure drop adalah selisih tekanan *inlet* pada *upstream straight duct* dan tekanan *outlet* pada *downstream straight duct* seperti pada gambar 3.15. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir sama. Perhitungan P_{inlet} dan P_{outlet} adalah sebagai berikut:

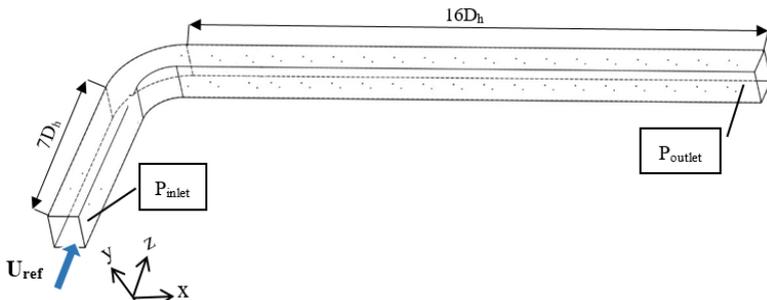
$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (3.19)$$

$$\Delta P = (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet})$$

$$\Delta P = (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet}) \quad (3.20)$$

dimana :

ΔP	: <i>Pressure Drop</i> (N/m ²)
P_{inlet}	: Tekanan <i>inlet</i> pada <i>upstream straight duct</i> (N/m ²)
P_{outlet}	: Tekanan <i>outlet</i> pada <i>downstream</i> (N/m ²)



Gambar 3.15 Lokasi perhitungan untuk *pressure drop*

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.

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (3.21)$$

$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (3.22)$$

dimana : C_p : *Pressure Coefficient*
 P_c : Tekanan lokal (N/m²)
 P_∞ : Tekanan *freestream* (N/m²)
 ρ : Massa jenis udara (kg/m³)
 V : Kecepatan udara (m/s)

3.6 Urutan Langkah Penelitian

Pada tabel 3.1 dijelaskan urutan langkah pengambilan data yang akan dilakukan. Urutan langkah pengambilan data adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Urutan Langkah Pengambilan Data

No.	Pressure Drop	Profil Kecepatan
1.	Peralatan disiapkan sesuai dengan instalasi penelitian	Peralatan disiapkan sesuai dengan instalasi penelitian
2.	<i>Inlet Disturbance Body</i> dipasang pada 5 ⁰ dari <i>inlet</i> pada <i>inner wall elbow 90°</i>	<i>Inlet Disturbance Body</i> dipasang pada 5 ⁰ dari <i>inlet</i> pada <i>inner wall elbow 90°</i>
3.	<i>Induced Draft Fan</i> dinyalakan	<i>Induced Draft Fan</i> dinyalakan
4.	Kecepatan <i>inlet</i> dari 2 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan setiap 1 m/s (Re_{Dh}) 1.59×10^4 sampai $9,54 \times 10^4$	Kecepatan pada <i>inlet</i> 6 m/s dengan <i>Reynolds Number</i> (Re_{Dh}) 4.77×10^4

5.	<i>Pressure Drop</i> dihitung dari pengukuran tekanan statis <i>wall pressure tap</i> pada posisi P_{inlet} dan P_{outlet}	.Profil kecepatan dihitung dari tekanan dinamis dengan <i>pitot tube</i> pada 15 <i>sections</i> sepanjang <i>downstream</i> dengan setiap <i>section</i> terdapat 17 titik pengambilan data
6.	Data diolah hingga didapatkan grafik <i>pressure drop vs Re_{Dh}</i>	Data diolah hingga didapatkan grafik profil kecepatan pada setiap <i>section</i>
7.	Langkah 2 sampai 6 diulangi dengan variasi jarak peletakkan <i>Inlet Disturbance Body</i> 5^0 ; 10^0 ; 15^0 ; dan 20^0	Langkah 2 sampai 6 diulangi dengan variasi jarak peletakkan <i>Inlet Disturbance Body</i> 5^0 ; 10^0 ; 15^0 ; dan 20^0

3.7 Gambar Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.2, yaitu DAQ PRO 5300, transduser 1" WR dan 3" WR, inverter, centrifugal fan, pitot static tube, manometer, dan inlet disturbance body.

Tabel 3.2 Peralatan penelitian

No	Nama Alat	Gambar
1	DAQ PRO 5300 0-24 mA; 0-10V max Input : 8 Rate : 100/sample Samples : 1000	

2	<p>Differential Pressure Transmitter</p> <p>Model: PX653- 01D5V // 03D5V Range : 1'' WC // 3'' WC Supply : 12-36 V Accuracy : per/spec Output : 1-5 VDC Ser. No. : X14500102 // X1145011</p>	
3	<p>Inverter</p> <p>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>	
4	<p>Centrifugal Fan</p> <p>Fan : type : VDC/4 – 225 0.75 kW; 1400 RPM 220 V; 50 Hz Motor : type : 71M4 – 4 B3 220/380 V; 50 Hz; 0.75 kW</p>	
5	<p>Pitot Static Tube</p>	

6	<p>Inclined Manometer Cairan : Kerosene SG = 0.827 Sudut (α) = 15°</p>	
7	<p>Inlet Disturbance Body Dimensi ; $l = 125$ mm $D_h = 12.5$ mm</p>	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini disampaikan analisa dan pembahasan data hasil eksperimen pengaruh interaksi aliran antara *Inlet Disturbance Body (IDB)* dan rasio kelengkungan *elbow* ($R/D_h = 3$) *square duct* dengan variasi letak *IDB*. Analisa dan pembahasan ini meliputi data *pressure drop* sepanjang saluran *duct*, koefisien *loss minor elbow 90°*, *pressure coefficient*, dan profil kecepatan sisi horizontal dan vertikal pada *downstream duct* dengan variasi *Reynolds Number*.

4.1 *Pressure Drop tanpa IDB dan Variasi Letak IDB (5°, 10°, 20°) Fungsi Reynolds Number*

Pengukuran *pressure drop* pada eksperimen ini dilakukan pada bilangan *Reynolds* $1,59 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s), terdapat empat titik pengambilan data yaitu pada sisi *upstream duct*, *inlet elbow*, *outlet elbow* dan *downstream duct* menggunakan *static wall pressure tab*. Dari ke – empat titik ini akan dibandingkan besar nilai *pressure drop* setiap variasi letak *IDB* dengan tanpa menggunakan *IDB*. *Pressure drop* ini terjadi karena adanya interaksi gaya gesek fluida terhadap dinding saluran (*friction loss*) dan terpisahnya aliran dari konturbodi saat melewati *elbow 90°* (*separation loss*). Adanya *IDB* ini secara garis besar dapat mengurangi terjadinya *pressure drop* pada variasi letak *IDB 10°* optimal dengan bilangan *Reynolds* rendah, sampai saat $Re = 9,54 \times 10^4$ grafiknya berhimpit dengan tanpa *IDB* gambar 4.1,

Hal ini terjadi karena *shear layer* atau *vortex* dari *IDB* hanya dapat mengisi defisit aliran (*blockage area*) pada *outlet elbow* dengan bilangan *Reynolds* tertentu, dengan meningkatnya bilangan *Reynolds vortex* dari *IDB* akan tersapu oleh kecepatan aliran menjauhi *outlet elbow*. Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds Number* maka akan semakin meningkat pula *pressure drop* yang terjadi pada masing-masing jarak peletakan *IDB*.

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 :

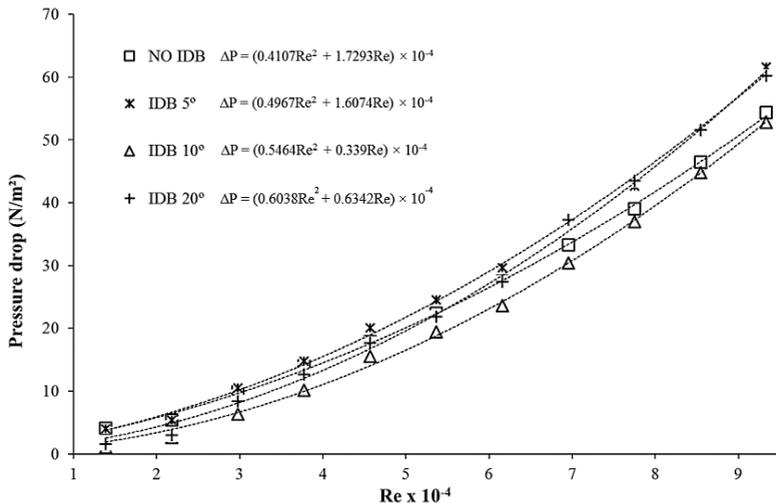
$$\frac{P_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{outlet}^2}{2} + gZ_{outlet} = \frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_{inlet}^2}{2} + gZ_{inlet} + h_{IT} \quad (4.1)$$

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

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

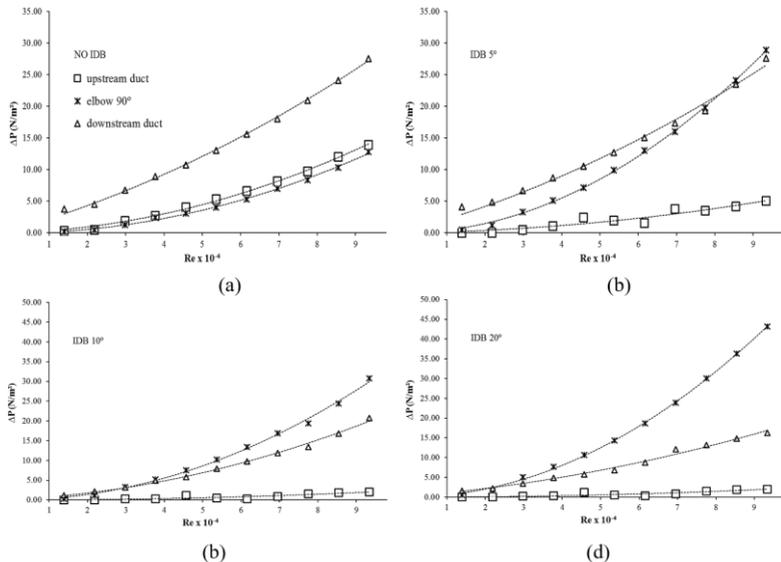
Tabel 4.1 *Pressure Drop* antara *upstream* dan *downstream duct*

ΔP (Pa)	$Re \times 10^{-4}$										
	1.59	2.38	3.18	3.97	4.77	5.56	6.36	7.15	7.95	8.74	9.54
NO IDB	4.07	5.43	9.89	14.06	17.83	22.37	27.55	33.24	38.99	46.45	54.33
IDB 5°	4.01	5.41	10.47	14.81	20.06	24.58	29.64	37.08	42.64	51.76	61.56
IDB 10°	1.07	2.64	6.37	10.18	15.48	19.43	23.63	30.44	36.99	44.79	52.81
IDB 15°	1.23	2.71	8.26	12.36	16.76	21.10	26.42	34.23	40.30	48.64	57.65
IDB 20°	1.55	3.01	8.39	12.65	17.66	21.89	27.43	37.31	43.45	51.59	60.20



Gambar 4.1 *Pressure drop* antara *upstream* dan *downstream duct* variasi letak IDB 5°, 10°, 20° dan tanpa IDB pada Reynolds Number $1,59 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,54 \times 10^4$

Dari grafik gambar 4.1 menunjukkan adanya *IDB* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan *IDB*, dimana nilai *pressure drop* akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya *Reynolds Number* pada setiap variasi letak *IDB*. Hal ini sesuai dengan persamaan 4.3, ketika kecepatan aliran yang melintasi saluran meningkat maka nilai *pressure drop* akan meningkat. Variasi letak *IDB* 10° merupakan posisi terbaik dalam menurunkan *pressure drop* pada bilangan *Reynolds* $1,59 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$. Untuk variasi letak *IDB* 15° dan 20° penurunan *pressure drop* optimal pada bilangan *Reynolds* $5,5 \times 10^4$, setelah melewati bilangan *Reynolds* tersebut *trendline IDB* mulai memotong *trendline* tanpa *IDB*. Hal ini terjadi karena *shear layer* pada letak variasi *IDB* tersebut sudah tidak optimal untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow*, sehingga *blockage area* pada *outlet elbow* tidak berkurang.



Gambar 4.2 *Pressure drop upstream duct* (\square), *elbow 90°* (\times), *downstream duct* (Δ). (a) tanpa *IDB*, dengan variasi (b) *IDB*

5°, (c) 10°, dan (d) 15° pada $Reynolds\ Number\ 1,59 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,54 \times 10^4$

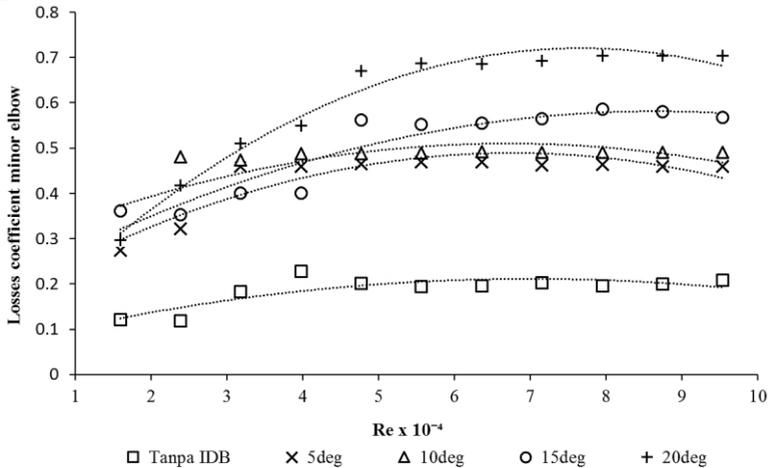
Gambar 4.2 menunjukkan nilai *pressure drop* pada masing – masing bagian dari *test section* yaitu pada antara *upstream duct*, *elbow*, dan *downstream duct*. Dari data ini dapat dilihat kontribusi terbesar dan terkecil terjadinya *pressure drop* sepanjang saluran (*test section*). Dimana untuk saluran tanpa bodi pengganggu (*IDB*) kontribusi *pressure drop* terbesar terjadi pada *downstream duct*. Sedangkan kontribusi *pressure drop* dengan variasi letak *IDB* masing – masing terbesar antara *elbow 90°*. Hal ini terjadi karena penambahan *IDB* menimbulkan kerugian gaya *drag* antara permukaan *IDB* dengan fluida searah aliran yang melewatinya. Adanya gaya *drag* tersebut ternyata masih cukup menguntungkan untuk memperbaiki aliran yang terseparasi pada *inner wall elbow* dan dapat mengurangi *blockage area* pada *outlet elbow*, terbukti pada letak variasi *IDB 10°* dapat mengurangi *pressure drop* dibandingkan dengan tanpa menggunakan *IDB*.

4.2 Koefisien Losses Elbow 90° Variasi Letak IDB (5°, 10°, 15°, 20°) Fungsi Reynolds Number

Adanya *inlet disturbance body (IDB)* yang diletakan pada *inner wall* sisi dalam *elbow 90°* memberikan pengaruh pada nilai koefisien *losses elbow* dibandingkan tanpa menggunakan *IDB*. Koefisien *losses elbow* itu sendiri adalah nilai konstanta tak berdimensi yang menentukan besar kecilnya *headloss minor* pada *elbow*. Koefisien *losses elbow* didapatkan dari pembacaan tekanan *static wall pressure tap* pada *inlet* sebelum *elbow* dan setelah *outlet elbow* pada bilangan *Reynolds* $1,59 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$ (kecepatan udara 2 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s).

Karakteristik koefisien *losses elbow* dengan penambahan *IDB* pada setiap masing – masing variasi peletakan munjukan nilai koefisien *losses elbow* yang lebih yang lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan *IDB*. Hal ini terjadi karena adanya kerugian gaya *drag* antara permukaan *IDB* dengan fluida yang mengalir melewatinya. Pada penelitian ini tidak membahas seberapa besar nilai koefisien *drag IDB*, namun memanfaatkan hasil *shear layer*

dari *IDB* untuk melawan momentum aliran pada sisi *inner wall elbow* yaitu *adverse pressure* sehingga dapat memperlebar *effective flow area* atau mengurangi *blockage area* pada sisi *outlet elbow*. Besar kenaikan koefisien *losses elbow* ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Koefisien *losses elbow 90°* antara tanpa *IDB* dan variasi letak *IDB 5°, 10°, 15°, 20°* pada *Reynolds Number* $1,59 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,54 \times 10^4$

Dari gambar 4.3 menunjukkan bahwa semakin meningkatnya bilangan *Reynolds* maka *trendline* cenderung naik pada semua variasi, sehingga dapat dikatakan kenaikan bilangan *Reynolds* akan meningkatkan pula nilai *koefisien losses elbow 90°*. Hal ini dapat disebabkan oleh *headloss minor* yang semakin besar, sesuai dengan perumusan sebagai berikut :

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

$$\frac{(P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ})}{\rho} = h_{elbow\ 90^\circ} \quad (4.5)$$

$$\frac{(P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ})}{\rho} = k_{elbow\ 90^\circ} \left(\frac{\bar{V}^2}{2} \right) \quad (4.6)$$

$$k_{elbow\ 90^\circ} = \frac{2 \cdot (P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ})}{\rho \cdot \bar{V}^2} \quad (4.7)$$

Pada variasi letak *IDB* 20° menunjukkan kenaikan koefisien *losses elbow* paling besar dibandingkan dengan tanpa *IDB* yaitu mencapai puncak sebesar 0,7 pada *Reynolds* $7,95 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$, kemudian pada variasi letak *IDB* 15° puncaknya sebesar 0,59 pada *Reynolds* $7,95 \times 10^4$, sedangkan pada variasi letak *IDB* 5° dan 10° *trendline* dari keduanya hampir berimpitan, menunjukkan nilai puncak dari koefisien *losses elbow* berturut – turut sebesar 0,46 dan 0,49 pada bilangan *Reynolds* $6,36 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$. Kenaikan nilai ini terjadi karena adanya penambahan *IDB* didalam *elbow* menimbulkan kerugian gaya *drag* antara permukaan *IDB* dengan fluida yang mengalir melewatinya. Tujuan dari meletakkan *IDB* tersebut adalah untuk memanfaatkan *shear layer* (aliran yang terseparasi) yang terbentuk dari *IDB*, sehingga terjadi kenaikan intensitas turbulensi yang cukup kuat dan memberikan momentum aliran pada sisi *inner elbow* untuk melawan *adverse pressure* sehingga dapat memperlebar *effective flow area* atau mengurangi *blockage area* pada sisi *outlet elbow*.

4.3 *Pressure Coefficient Elbow 90° Variasi Letak IDB (5°, 10°, 15°, 20°) Fungsi Reynolds Number*

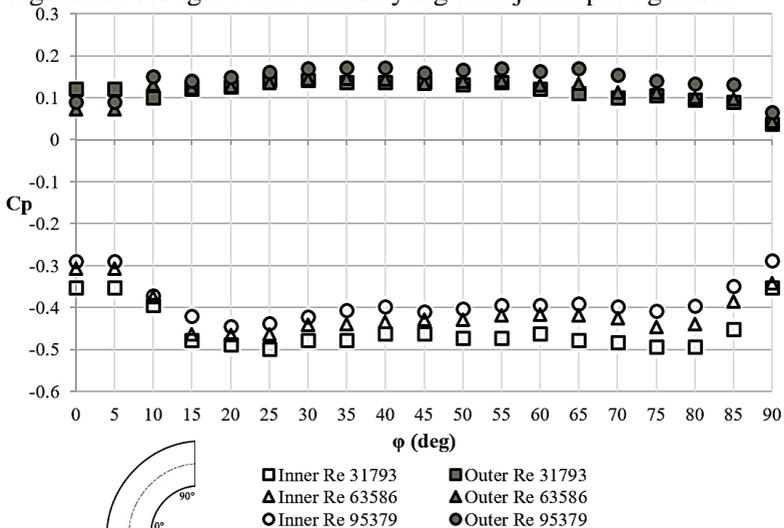
Pada sub bab ini akan dibahas tentang fenomena aliran didalam *elbow 90°* yang disajikan dalam grafik *pressure coefficient elbow 90°*. *Pressure Coefficient* adalah istilah yang digunakan untuk menentukan koefisien tekanan dari satu titik ke titik lain dalam saluran. *Pressure Coefficient* didapatkan dari data perbedaan *pressure tap freestream* dan *inner wall* yang terdapat pada sepanjang *inner wall elbow 90°* pada eksperimen ini terdapat 19 titik *pressure tap inner* dan *outer wall* dari 0° sampai 90° dengan jarak pemasangan antar *pressure tap* setiap kenaikan 5° . Nilai

Pressure Coefficient (C_p) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

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

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

Hasil pengukuran *pressure coefficient elbow 90°* untuk variasi *elbow* tanpa *IDB* dengan fungsi tiga bilangan *Reynolds* digunakan sebagai acuan analisa yang ditunjukkan pada gambar 4.4.

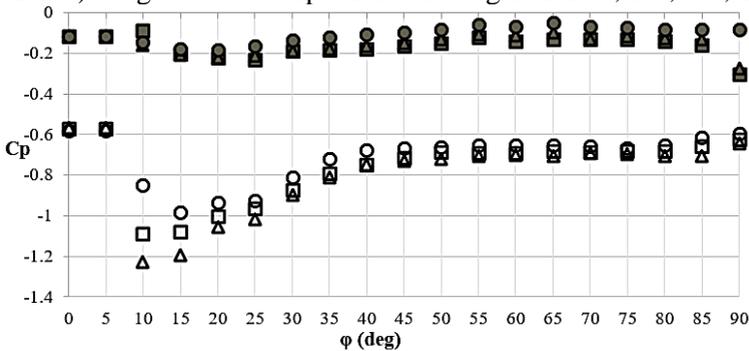


Gambar 4.4 *Pressure coefficient elbow 90°* tanpa *IDB* sebagai fungsi *Reynolds Number*

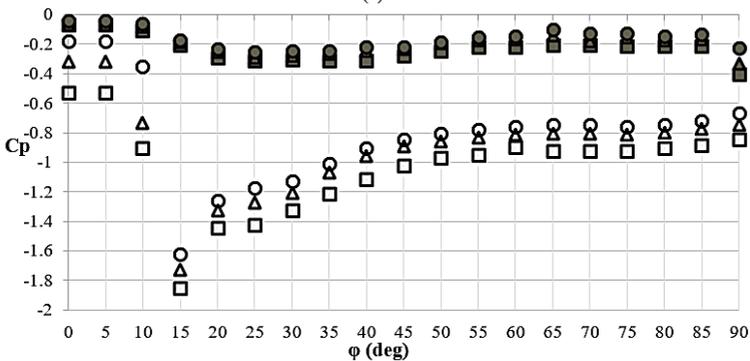
Berdasarkan gambar 4.4 ditunjukkan bahwa ketika aliran melewati sebuah *elbow* maka aliran tersebut akan mengalami fenomena seperti ketika aliran melewati *diffuser* dan *nozzle*. Ketika aliran melewati sisi *inner elbow* telah terjadi fenomena seperti pada *nozzle* pada sudut 0° sampai 20° , dimana pada sudut tersebut terjadi penurunan tekanan yang menandakan terjadinya kenaikan kecepatan. Namun, setelah aliran melewati sudut 75° sampai 90° terjadi kenaikan tekanan diikuti dengan penurunan

kecepatan seperti yang terjadi pada *diffuser*. Pada sisi *outer* dengan sudut 0° hingga 35° terjadi kenaikan tekanan, dengan kata lain pada sudut tersebut terjadi penurunan kecepatan. Sedangkan sudut 65° sampai 90° terjadi penurunan tekanan dimana pada kondisi tersebut juga terjadi kenaikan kecepatan. Dari data profil *trendline pressure coefficient* ini dapat dikatakan bagian yang paling menggambarkan perbedaan tekanan adalah pada sisi *inner elbow* hal ini sesuai dengan penelitian **Cheng** ^[9] bahwa separasi aliran paling dominan adalah pada bagian *inner wall elbow*.

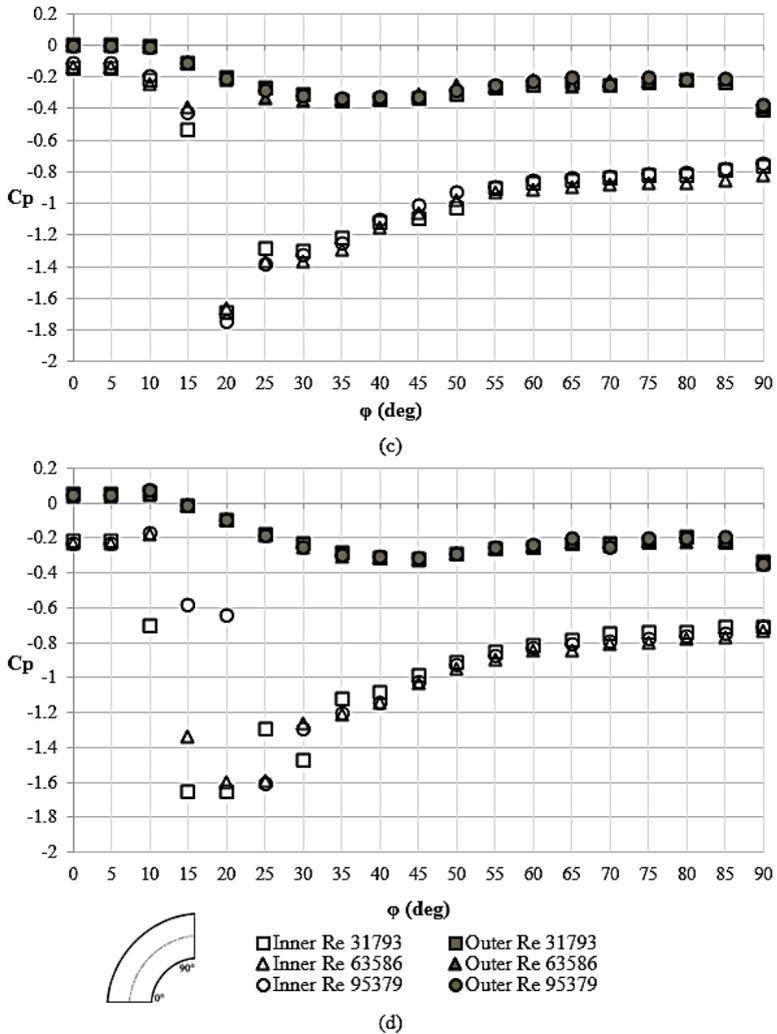
Pembahasan *trendline* grafik *pressure coefficient elbow 90°* variasi letak *IDB* menggunakan tiga bilangan *Reynolds* yang konstan yaitu $3,17 \times 10^4$ (kecepatan udara 4 m/s, *Reynolds* $6,35 \times 10^4$ (kecepatan udara 8 m/s), dan *Reynolds* $9,53 \times 10^4$ (kecepatan udara 12 m/s) dengan variasi tanpa *IDB* dan dengan *IDB* 5° , 10° , 15° , 20°



(a)



(b)



Gambar 4.5 *Pressure coefficient elbow 90° variasi (a) IDB 5°, (b) IDB 10°, (c) IDB 15°, dan (d) IDB 20° fungsi Reynolds Number*

Grafik gambar 4.5 menunjukkan adanya perubahan nilai *Pressure Coefficient* (C_p) disepanjang penampang melintang sisi

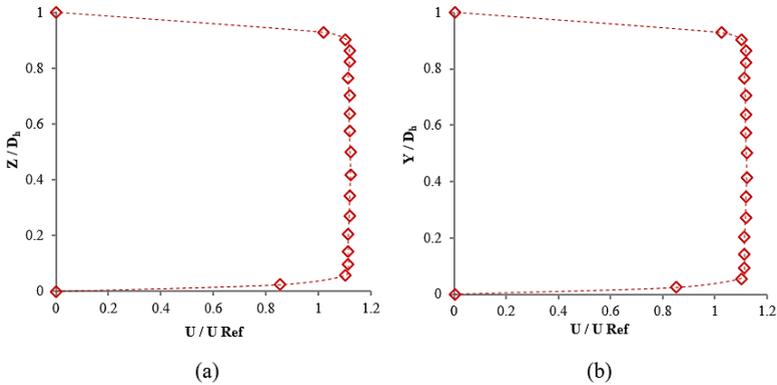
inner wall dari dinding kelengkungan *elbow* 90° . Kurva C_p pada *outer wall* pada semua variasi peletakan *IDB* tidak begitu mengalami perubahan pada setiap variasi *IDB*, dimana pada awal fluida memasuki *elbow* pada titik 0° sampai 10° menunjukkan tekanan yang konstan, kemudian mengalami penurunan nilai C_p yang mengindikasikan terjadinya kenaikan kecepatan aliran pada sisi *outer elbow* hingga titik 30° dan 35° , kemudian membentuk kurva yang mendekati konstan hingga titik 85° dan turun nilainya pada 90° mengindikasikan terjadi percepatan pada *outer* untuk semua variasi letak *IDB*.

Pada *inner elbow* menunjukkan perbedaan nilai C_p yang cukup signifikan pada setiap variasi letak *IDB* dan juga setiap bilangan *Reynolds*. Sehingga dapat dikatakan penambahan *IDB* akan berpengaruh terhadap fenomena aliran pada sisi *inner elbow*. Untuk variasi *IDB* 5° gambar 4.5(a) nilai C_p sesaat memasuki *elbow* pada titik 0° hingga 5° menunjukkan nilai konstan sebesar -0.58 titik ini dimana posisi fluida mengalami stagnasi dan *drag* pada sisi ujung *IDB*, kemudian fluida mulai berjalan melewati sisi bawah *IDB* sehingga terjadi penurunan tekanan dan mengalami percepatan aliran ditandai dengan turunnya nilai C_p .

Gambar 4.5 menunjukkan pada sisi *inner elbow* untuk masing – masing variasi letak *IDB*, percepatan aliran terjadi setiap 5° setelah titik dimana variasi *IDB* diletakan. Dimana pada variasi *IDB* 10° gambar 4.5(b) terdapat nilai C_p paling rendah pada bilangan *Reynolds* $3,17 \times 10^4$ sehingga pada titik itulah kecepatan aliran dipercepat paling besar, penurunan nilai C_p ini tidak berbanding lurus dengan kenaikan bilangan *Reynolds* ditunjukkan pada grafik untuk masing – masing variasi letak *IDB*. Sehingga dapat dikatakan penempatan *IDB* memiliki nilai puncak untuk mempercepat aliran pada sisi *inner elbow*. Adanya percepatan inilah yang mengakibatkan pada sisi *inner elbow* tidak terjadi fenomena *reatachment*, yaitu terjadinya tumbukan dari *shear layer* (aliran yang terseparasi oleh *IDB*) ke arah *inner wall elbow*. Namun demikian aliran yang cukup cepat pada sisi bawah *IDB* mampu memenuhi *deficit* aliran pada sisi *inner elbow* dibuktikan pada profil kecepatan sisi horizontal pada sub bab berikutnya.

4.4 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi *Upstream Duct* dan *Downstream Duct* $Re_{D_h} = 4,77 \times 10^4$

Profil kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}), dimana u adalah kecepatan lokal pada titik *section* tersebut yang didapatkan dari hasil perhitungan data yang didapat dari pengukuran menggunakan *pitot tube* dan U_{ref} merupakan kecepatan rata – rata masuk pada saluran *upstream* yang telah ditentukan, yaitu 6 m/s . Berikut ini merupakan perbandingan profil kecepatan saluran *upstream* yang diukur secara horizontal dan vertikal. Profil kecepatan sisi *upstream straight duct* digunakan sebagai acuan untuk menentukan gambaran proses *recovery* aliran pada profil kecepatan daerah *downstream duct* baik sisi horizontal maupun vertikal pada *section* yang telah ditentukan. Pada gambar 4.6.(a) menunjukkan bentuk profil kecepatan aliran pada sisi *upstream duct* dalam grafik profil kecepatan pada bidang horizontal, sedangkan gambar 4.6(b) menunjukkan bentuk profil kecepatan aliran bidang vertikal. Grafik profil kecepatan ini terdiri dari perbandingan z/D_h pada ordinat horizontal atau y/D_h pada ordinat vertikal dan u/u_{ref} pada absis. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h = 0$ dan $y/D_h = 0$ merupakan posisi yang searah dengan sisi *inner upstream straight duct*, sedangkan $z/D_h = 1$ dan $y/D_h = 1$ merupakan posisi yang searah dengan sisi *outer upstream straight duct*. Pengukuran profil kecepatan dilakukan pada nilai Re $4,77 \times 10^4$ atau setara dengan 6 m/s , baik pada bidang horizontal maupun vertikal.

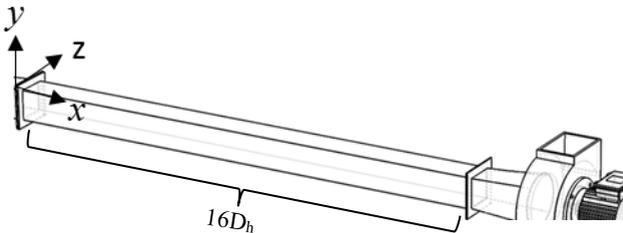


Gambar 4.6 Grafik profil kecepatan (a) bidang horizontal (b) bidang vertikal sisi *upstream duct*

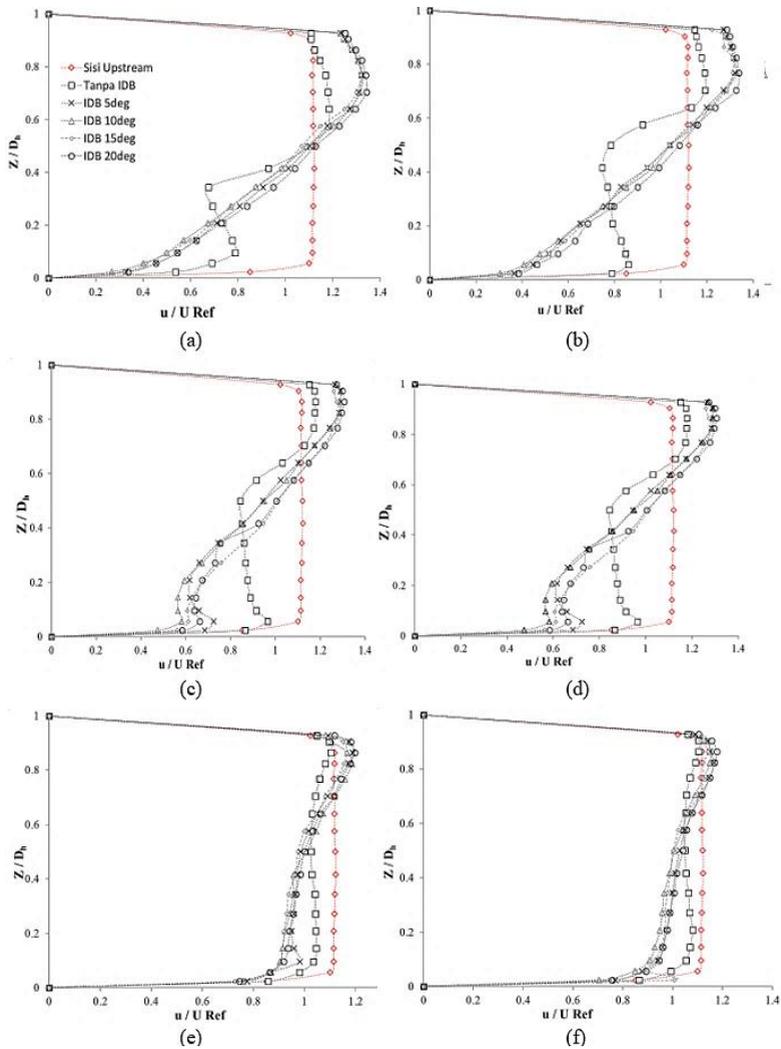
4.4.1 Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada Sisi

Downstream Duct $Re_{Dh} = 4,77 \times 10^4$

Profil kecepatan bidang horizontal pada sisi *downstream duct* terdiri dari $x/D_h=0$, $x/D_h=1$, $x/D_h=5$, $x/D_h=8$, $x/D_h=11$, $x/D_h=12$ dan $x/D_h=13$. Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari *inner wall* sampai *outer wall*. Variasi *IDB* yang digunakan, yaitu tanpa *IDB*, 5° , 10° , 15° dan 20° . Pengambilan data dilakukan pada $Re\ 4,77 \times 10^4$. Pada setiap *section*, aliran *freestream* digunakan sebagai acuan aliran sudah melalui proses *recovery*.



Gambar 4.7 Gambar sekema pengambilan profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal pada masing-masing posisi *cross-section*



Gambar 4.8 Grafik profil kecepatan bidang horizontal pada cross-section (a) $x/D_h=0$ sec 1; (b) $x/D_h=1$ sec 2; (c) $x/D_h=5$ sec 4; (d) $x/D_h=8$ sec 9; (e) $x/D_h=11$ sec 12; (f) $x/D_h=13$ sec 14

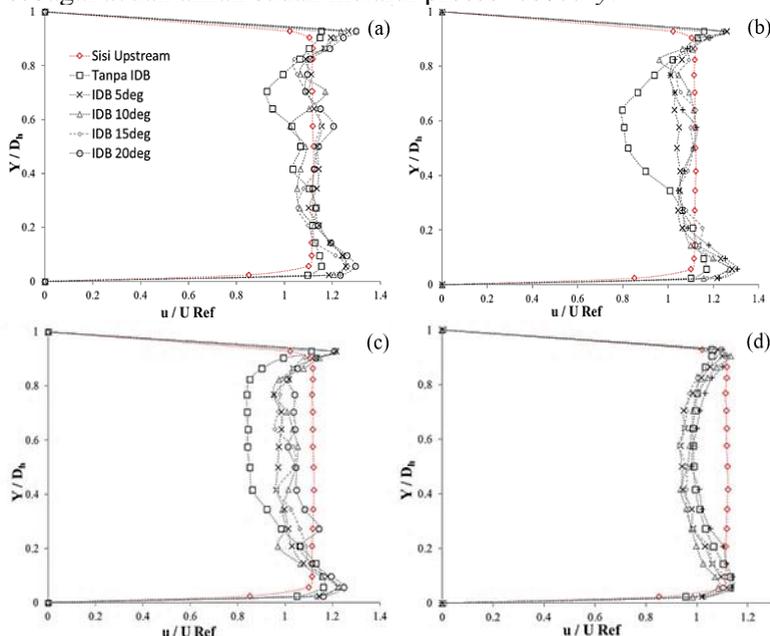
Pada gambar 4.8 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan pada bidang horizontal disepanjang *downstream duct*, dimana distribusi profil kecepatan mulai terlihat beragam ketika melewati *outlet elbow 90°*, dimana terjadi perbedaan signifikan antara kecepatan sisi *inner* dan *outer*. Saat aliran telah melewati *elbow 90°*, sisi *inner* tergambar lebih lambat atau terjadi *deficit* aliran, hal ini terjadi karena pada sisi *inner elbow* mulai mengalami separasi aliran. Perbedaan tekanan karena kelengkungan *radius elbow 90°* juga mempengaruhi nilai kecepatan aliran. Pada sisi *outer* memiliki tekanan yang lebih besar sehingga menyebabkan aliran tangensial yang mengarah ke *inner wall*. Hal tersebut dapat menyebabkan *blockage effect* dan terlihat pada gambar 4.8(a) dimana kecepatan aliran terbesar di daerah $Z/D_h = 1$ sampai 0.6. Kemudian perlambatan paling besar terjadi pada variasi tanpa *IDB* $Z/D_h = 0.38$ karena aliran lebih awal terseparasi. Penambahan *IDB* dapat menunda separasi aliran karena momentum aliran lebih kuat melawan *advers pressure* dan pengaruh terbesar ditunjukkan oleh variasi letak *IDB 10°*. Pada $x/D_h=1$ menunjukkan distribusi kecepatan aliran yang berubah signifikan hingga $x/D_h=11$ aliran sudah sepenuhnya berkembang.

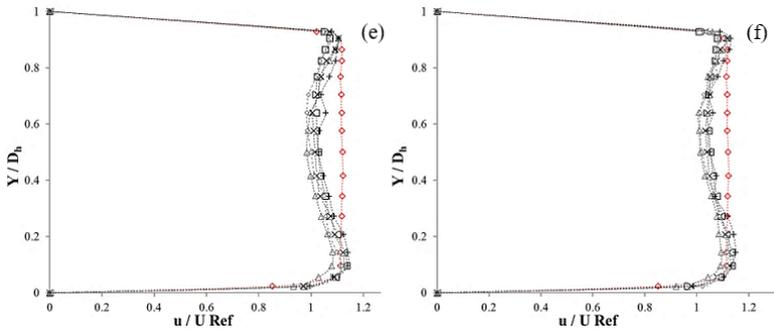
Penambahan *IDB* pada masing – masing variasi ini dirasa masih kurang optimal untuk memperbaiki *blockage area* disisi *outer elbow* karena hasil dari *shear layer IDB* kurang begitu kuat melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow*, tetapi malah menguatkan pada sisi *outer elbow* ditunjukkan pada bentuk profil kecepatan yang semakin cepat pada sisi *outer elbow*, selain itu juga hasil dari intensitas turbulensi yang dihasilkan oleh *IDB* tidak cukup besar (dibahas pada sub bab berikutnya). Karena pengaruh *blockage effect*, sebagian aliran juga mengarah ke *outer wall* sehingga menambah kecepatan pada sisi *outer*. Aliran sekunder yang awalnya dominan terjadi pada sisi *inner* kemudian bergerak ke sisi *outer* menyebabkan pengaruh *backflow* semakin kuat. Hal tersebut berlanjut terjadi pada $x/D_h=0$, $x/D_h=1$, $x/D_h=2$, dan $x/D_h=5$ dimana pada sisi *inner* kecepatan terbesar pada variasi tanpa *IDB*. Setelah melewati $x/D_h=5$, profil kecepatan mengalami proses *recovery* dimana efek dari *backflow* dan *blockage* mulai hilang. Pada $x/D_h=8$, pada sisi *inner* kecepatan antar variasi letak *IDB*

sudah sampir menyerupai profil kecepatan tanpa *IDB*. Pada $x/D_h=12$, dan $x/D_h=13$ aliran mulai *uniform* seperti yang ditunjukkan oleh profil kecepatan *freestream*. Tetapi efek dari *backflow* masih terlihat tipis di area mendekati sisi *outer wall*. Pada sisi *inner* juga terlihat mempunyai kecepatan yang sedikit lebih cepat karena proses *recovery* aliran berawal dari sisi mendekati *inner wall*.

4.4.2 Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada Sisi *Downstream* Duct $Re_{D_h}=4,77 \times 10^4$

Profil kecepatan bidang vertikal pada sisi *downstream duct* terdiri dari $x/D_h=0$, $x/D_h=1$, $x/D_h=5$, $x/D_h=8$, $x/D_h=11$, $x/D_h=12$ dan $x/D_h=13$. Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari *inner wall* sampai *outer wall*. Variasi *IDB* yang digunakan, yaitu tanpa *IDB*, 5° , 10° , 15° dan 20° . Pengambilan data dilakukan pada $Re_{D_h}=4,77 \times 10^4$. Pada setiap *section*, aliran *freestream* digunakan sebagai acuan aliran sudah melalui proses *recovery*.





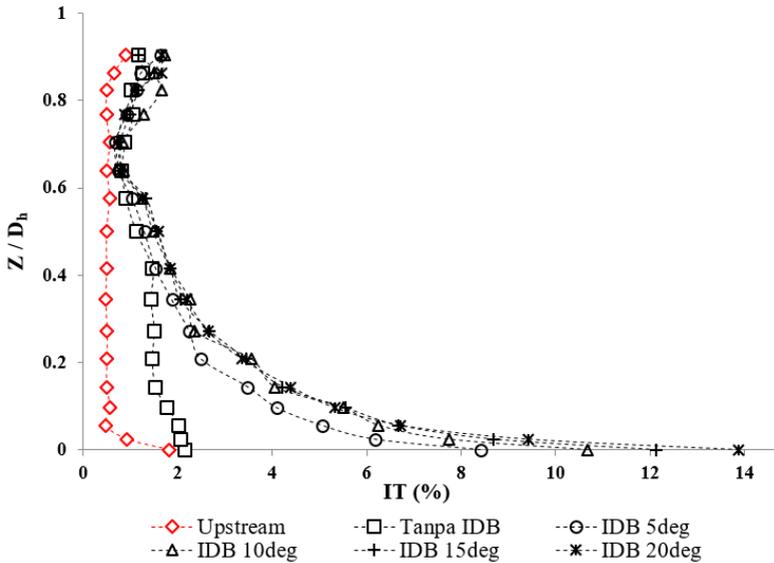
Gambar 4.9 Grafik profil kecepatan bidang vertikal pada *cross-section* (a) $x/D_h=0$ sec 1; (b) $x/D_h=1$ sec 2; (c) $x/D_h=5$ sec 4; (d) $x/D_h=8$ sec 9; (e) $x/D_h=11$ sec 12; (f) $x/D_h=13$ sec 14

Pada gambar 4.9 menggambarkan detail bentuk profil kecepatan pada bidang vertikal masing – masing *section* dijelaskan sebagai berikut : saat meninggalkan *outlet elbow 90°*, profil kecepatan telah mengalami perkembangan distribusi kecepatan dibandingkan pada daerah *inlet upstream duct* sebelum melewati *elbow 90°* seperti pada gambar 4.9 (a) terjadi kecepatan yang lebih besar baik pada sisi *upper* maupun sisi *lower* jika daripada kecepatan pada sisi *inlet upstream duct*. Terdapat perbedaan pada *section 2* yaitu gambar 4.9 (b) dimana terjadi *backflow* pada sekitar sisi *upper* hingga sisi *centerline* pada variasi tanpa *IDB*. Hal tersebut terjadi karena adanya *secondary flow* sebagai akibat aliran melalui *fitting elbow 90°*. Pada *section* ini, aliran yang melalui saluran tanpa menggunakan *IDB* mengalami *backflow* yang kuat jika dibandingkan aliran pada saluran yang menggunakan *IDB*, fenomena seperti dapat diartikan bahwa penambahan *IDB* sebagai bodi pengganggu pada saluran lebih efektif untuk mengurangi *blockage area* dibandingkan saluran tanpa *inlet disturbance body*. Hal yang sama juga didapati pada daerah *section 4* dan *section 5* dimana *secondary flow* pada *section* ini terlihat merambat ke daerah sisi *lower*, baik pada saluran tanpa menggunakan *IDB* maupun saluran menggunakan *IDB* dengan variasi letak *IDB* terjadi peningkatan intensitas *backflow* yang semakin kuat, hal tersebut dapat diamati pada gambar 4.9 (c) dan gambar 4.9 (d).

Namun sesaat memasuki $x/D_h = 5$, aliran sudah terlihat mengalami *recovery* aliran. *Recovery* aliran bertambah semakin baik pada *section 9* atau $x/D_h = 10$. Dimana bentuk dari profil kecepatan setelah *section 9* untuk semua variasi letak *IDB* dan tanpa *IDB*, profil kecepataannya sudah dapat dikatakan identik. Selanjutnya pada jarak $x/D_h = 11$ dan $x/D_h = 13$ gambar 4.9 (e) & (f) setelah melalui *outlet elbow 90°* semua aliran tersebut mendekati profil kecepatan yang normal yaitu seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11. Namun pada sisi *lower*, sedikit terjadi kecepatan yang masih tinggi melebihi kecepatan pada sisi *inlet upstream duct*, fenomena ini terjadi pada aliran baik yang melalui saluran tanpa menggunakan *IDB* maupun menggunakan *IDB*.

4.5 Perbandingan Intensitas Turbulensi Variasi Letak *IDB* ($5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) dengan Tanpa *IDB* pada $Re_{Dh} : 4,77 \times 10^4$

Pada sub bab ini menjelaskan gambaran umum distribusi *turbulent intensity* pada bidang horizontal beserta kontur yang mewakili besar intensitas turbulensi pada posisi $x/D_h = 0$ setelah *outlet elbow 90°*. Pada gambar 4.10 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi setelah melewati *elbow 90°* berupa grafik *turbulent intensity* pada bidang horizontal. *Turbulent intensity* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya intensitas turbulensi ditunjukkan oleh persentase perbandingan $\frac{u'}{U_{avg}} \times 100\%$ pada ordinat. Sumbu vertikal pada grafik ini menunjukkan besar *turbulent intensity* pada setiap variasi *IDB* yang ditunjukkan oleh sumbu horizontal, pada grafik plot *trendline* menunjukkan empat titik pada jarak $Z/D_h = 0.024$ ($Z = 3$ mm) posisi ini adalah titik pertama pengambilan data dimana permukaan pitot tube menempel pada dinding $Z = 0$; $Z/D_h = 0.056$ ($Z = 7$ mm) kemudian $Z/D_h = 0.344$ dan $Z/D_h = 0.928$ jarak pitot mendekat dengan *outer wall duct*. Untuk lebih detail, maka dijelaskan dalam grafik perbandingan antara tanpa *IDB* dengan variasi letak *IDB* $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ dan 20° . seperti pada gambar 4.10.

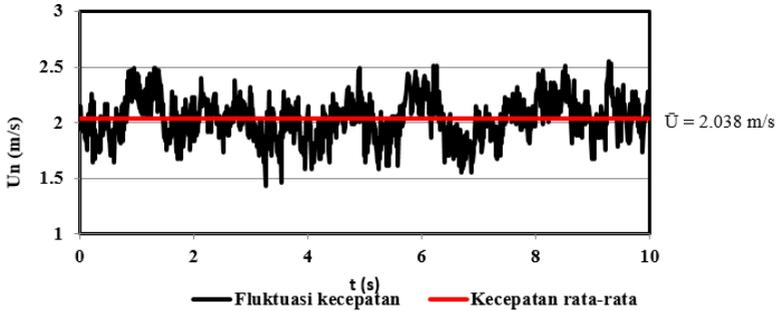


Gambar 4.10 Grafik *turbulent intensity* pada posisi $x/D_h=0$ setelah *outlet elbow* 90°

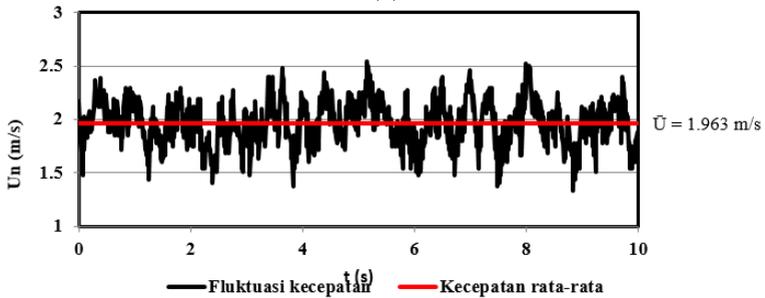
Untuk memperoleh nilai intensitas turbulensi digunakan metode pengambilan data secara berulang pada setiap titik, atau dapat difenisikan sebagai perbandingan antara akar rata-rata dari fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (u_{avg}). Intensitas turbulensi 1% atau kurang dikategorikan rendah, sedangkan 10% atau lebih dikategorikan tinggi. Jika semakin tinggi fluktuasi kecepatan pada suatu titik pada selang waktu tertentu, maka nilai intensitas turbulensi yang didapatkan juga akan semakin tinggi, hal tersebut seperti persamaan berikut :

$$IT = \frac{u'}{\bar{u}} \times 100\% \quad (4.10)$$

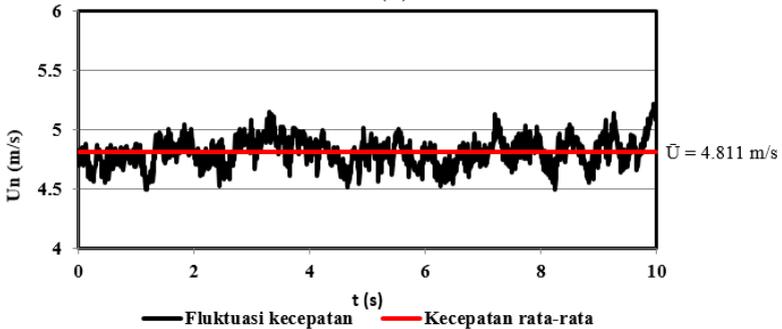
$$u' = \sqrt{\frac{\sum(\bar{u} - u_n)^2}{n-1}} \quad (4.11)$$



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.11 Grafik fluktuasi kecepatan bidang horizontal di daerah $x/D_h = 0$ dan $z/D_h = 0,056$ pada saluran menggunakan *IDB* dengan variasi letak (a) 5° ; (b) 10° dan (c) saluran tanpa menggunakan *IDB*.

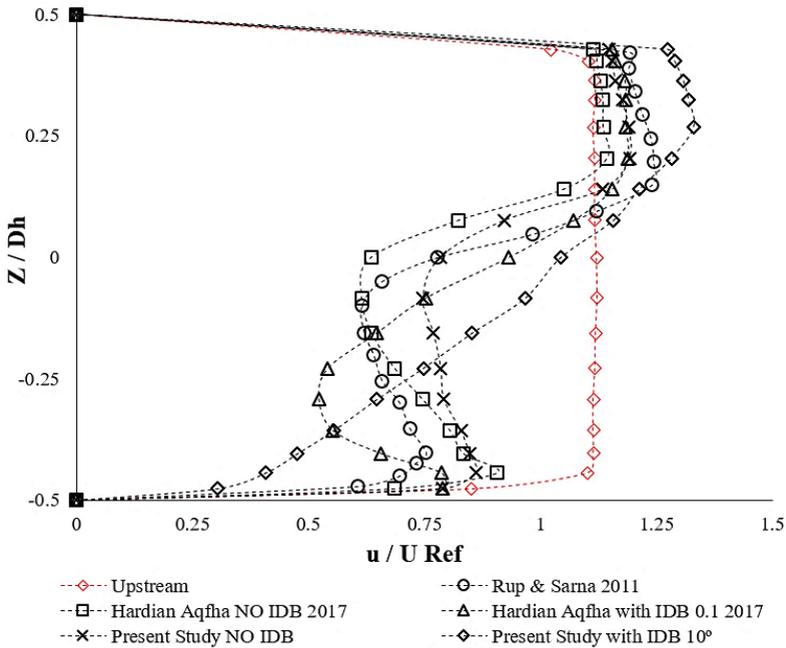
Pada eksperimen digunakan alat *DAQ PRO* sebagai alat bantu pengambilan data intensitas turbulensi pada titik – titik tertentu di daerah $x/D_h = 1$ bidang horizontal setelah melewati *elbow 90°*, dimana dari pengambilan data tersebut didapatkan grafik fluktuasi kecepatan dalam selang waktu tertentu, seperti yang terlihat pada gambar 4.11. Gambar 4.11 (a) merupakan grafik fluktuasi kecepatan bidang horizontal di daerah $x/D_h = 1$ dan $z/D_h = 0,056$ pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* variasi letak $10°$. Dari perhitungan didapatkan bahwa pada daerah tersebut memiliki nilai u' sebesar 0,209681, u_{avg} sebesar 1,963 m/s, dan intensitas turbulensi sebesar 10,6%. Sedangkan pada gambar 4.11 (b) merupakan grafik fluktuasi kecepatan bidang horizontal di daerah $x/D_h = 1$ dan $z/D_h = 0,056$ pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Dari perhitungan juga didapatkan bahwa pada daerah tersebut memiliki nilai u' sebesar 0,121627, u_{avg} sebesar 4.8115 m/s, dan intensitas turbulensi sebesar 2.527%.

Dilihat pada gambar 4.10, didapatkan bahwa intensitas turbulensi pada daerah *outer* dan *centerline* baik pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* maupun saluran dengan variasi letak *IDB 5°, 10°, 15°* dan $20°$ memiliki nilai intensitas turbulensi yang cenderung sama atau tidak mempunyai selisih yang begitu besar. Namun berbeda pada daerah *inner* terjadi perbedaan intensitas turbulensi yang signifikan antar variasi, dimana pada $z/D_h = 0,024$ dan $z/D_h = 0,056$ daerah *inner* terdapat intensitas yang paling tinggi jika dibandingkan dengan posisi titik pengukuran yang lain. Intensitas turbulensi tertinggi pada titik tersebut terjadi pada saluran dengan menggunakan *inlet disturbance body* dengan letak $20°$ yaitu sebesar 14%. Sedangkan intensitas turbulensi terendah terjadi pada saluran dengan menggunakan *inlet disturbance body* dengan letak $5°$ yaitu sebesar 8,32%, dengan kata lain semakin menjauhi jarak peletakan *IDB* dengan *inlet elbow* maka intensitas turbulensinya akan semakin besar. Hal ini memperkuat hipotesa awal pada eksperimen ini bahwa dengan memberikan sebuah *inlet disturbance body* pada sisi *inner upstream duct* dapat membuat intensitas turbulensi yang kuat dari *shear layer*, dimana turbulensi dari akan menambahkan

momentum aliran untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner wall* pada saluran, sehingga akan mengurangi *blockage area* pada sisi *inner wall*.

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

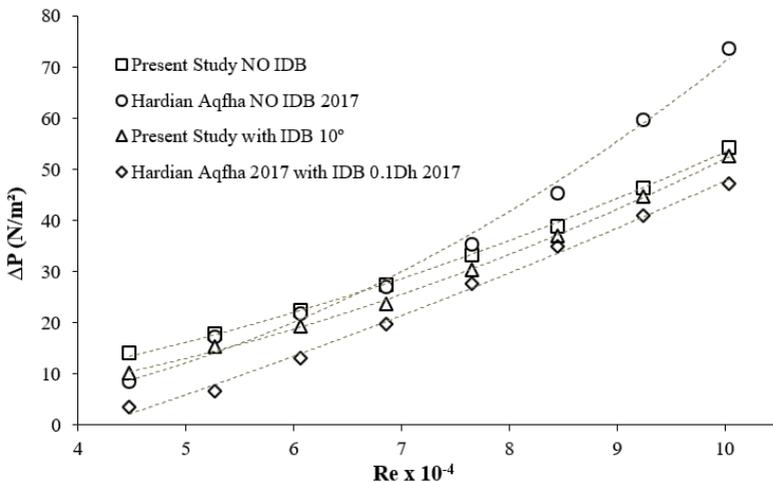
Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang perbedaan hasil eksperimen dengan hasil pada penelitian terdahulu yang mempunyai topik dan tujuan yang sama dalam pelaksanaan penelitiannya. Seperti pada sub bab sebelumnya, bawasannya pada sub bab ini akan diberikan distribusi profil kecepatan hasil eksperimen yang dibandingkan dengan distribusi profil kecepatan terdahulu pada posisi yang sama yaitu $x/D_h = 1$ dan juga membandingkan nilai *pressure drop* antara *upstream* dan *downstream*. Pada gambar 4.12 akan ditunjukkan mengenai perbedaan distribusi profil kecepatan antar hasil eksperimen, dan gambar 4.13 akan ditunjukkan mengenai perbedaan nilai *pressure drop*. Sebagai perbandingan hasil penelitian, digunakan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Rup dan Sarna dimana pada penelitian yang dilakukannya memiliki tujuan yang sama yaitu untuk melihat karakteristik aliran yang melewati *square duct* dengan *elbow 90°*, kemudian penelitian dari Hardian Aqfha yang menggunakan media *test section* yang sama. Penelitian Rup dan Sarna menggunakan *square duct* dengan diameter hidrolis (D_h) sebesar 80 mm, rasio kelengkungan *elbow 90°* (R/D_h) sebesar 2, dan panjang *upstream* sepanjang $20D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $20D_h$, sedangkan pada penelitian Hardian Aqfha menggunakan diameter hidrolis (D_h) sebesar 125 mm, rasio kelengkungan *elbow 90°* (R/D_h) sebesar 1,5 dan panjang *upstream* sepanjang $7D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $15D_h$, *IDB* yang digunakan adalah sirkular silinder dengan diameter 12,5 mm divariasikan letaknya $l/D_h = 0.1$.



Gambar 4.12 Grafik *velocity profile* bidang horizontal pada posisi $x/D_h = 1$ masing – masing data dan penelitian terdahulu

Dapat dilihat pada gambar 4.12 bahwa terlihat bentuk distribusi kecepatan dari masing – masing variasi kelengkungan *elbow*, dimana menunjukkan profil yang identik antara hasil eksperimen Hardian Aqfha, Rup dan Sarna dengan hasil penelitian kali ini. Pada sisi *outer wall*, terjadi percepatan pada masing – masing distribusi profil kecepatan, sedangkan pada sisi *inner wall* terlihat terjadi defisit momentum yang lebih kecil pada rasio *elbow* yang besar, sehingga *blockage* area berkurang pada sisi *inner wall* saat rasio kelengkungan *elbow* semakin besar. Kecepatan aliran paling tinggi pada daerah *outer wall* terjadi pada profil kecepatan variasi *IDB 10°* dengan rasio kelengkungan *elbow* $R_c/D_h=3$, kemudian diikuti penelitian yang dilakukan oleh Rup dan Sarna, sedangkan kecepatan aliran paling tinggi pada daerah *inner wall* terjadi pada $R_c/D_h=1.5$ variasi tanpa *IDB* yang dilakukan oleh

Hardian Aqfha. Perbedaan distribusi profil kecepatan yang terlihat disebabkan oleh dimensi instalasi penelitian dan properti fluida yang digunakan di dalam saluran pada masing – masing penelitian. Untuk properti fluida pada eksperimen ini, pengukuran profil kecepatan menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $4,74 \times 10^4$, sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Rup dan Sarna menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $4,00 \times 10^4$ dan penelitian yang dilakukan oleh Hardian Aqfha menggunakan bilangan *Reynolds* sebesar $8,74 \times 10^4$.



Gambar 4.13 *Pressure drop* saluran antara hasil eksperimen dan penelitian terdahulu oleh Aqfha Hardian

Gambar 4.13 membuktikan dasar teori yang digunakan dan juga membuktikan dari penelitian Dutta dan Nandi bahwa semakin besar rasio kelengkungan *elbow 90°* maka koefisien losses pada *elbow* akan semakin berkurang, pada penelitiannya dibuktikan dari nilai *pressure drop* yang semakin kecil jika rasio kelengkungan *elbow* semakin besar. Pada penelitian Hardian Aqfha menggunakan rasio kelengkungan $R_c/D_h=1.5$, dan dengan properti *test section* yang sama yaitu panjang *upstream* sepanjang $7D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $15D_h$. Dalam penelitian ini menggunakan rasio kelengkungan *elbow* $R_c/D_h=3$. Terlihat pada

gambar 4.13 dimana *pressure drop* yang dihasilkan oleh rasio *elbow* 3 lebih rendah dibandingkan dengan rasio *elbow* 1.5 masing – masing tanpa *IDB* seiring kenaikan bilangan *Reynolds*. Sedangkan dengan penambahan *IDB* pada 10° didalam *elbow* untuk variasi rasio 3, dirasa masih kurang efektif untuk menurunkan *pressure drop*, dimana telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Penambahan *IDB* pada variasi rasio *elbow* kecil seperti yang dilakukan oleh Hardian Aqfha bisa dikatakan efektif dalam menurunkan *pressure drop*.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian yang telah dibahas pada bab analisa dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Adanya *IDB* sebagai bodi pengganggu dapat menurunkan nilai *pressure drop* dibandingkan dengan tanpa menggunakan *IDB*, dimana variasi letak *IDB* 10° merupakan posisi optimal dalam menurunkan *pressure drop* pada bilangan *Reynolds* $1,59 \times 10^4$ sampai $9,54 \times 10^4$. kontribusi terbesar dalam penurunan *pressure drop* variasi ini terletak pada sisi *downstream duct*.
2. Karakteristik koefisien *losses elbow* dengan penambahan *IDB* didalam *elbow* pada masing – masing variasi munjukan nilai koefisien *losses elbow* yang lebih yang lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan *IDB*. Namun adanya *IDB* ini mengahasilkan *shear layer* (aliran yang terseparasi), sehingga terjadi kenaikan intensitas turbulensi yang cukup kuat dan memberikan momentum aliran pada sisi *inner elbow* untuk melawan *adverse pressure* dan memperlebar *effective flow area* atau mengurangi *blockage area* pada sisi *outlet elbow*.
3. Grafik C_p menunjukan fenomena aliran ketika memasuki *elbow*, dimana pada variasi tanpa menggunakan *IDB* terjadi percepatan aliran pada saat memasuki sisi *inner wall elbow*, dan mengalami perlambatan saat memasuki sisi *inner end wall elbow*. Untuk masing – masing variasi letak *IDB*, percepatan aliran terjadi setiap 5° setelah titik dimana variasi *IDB* diletakan. Adanya percepatan inilah yang mampu memperbaiki *deficit* aliran pada sisi *outlet elbow* dibuktikan pada profil kecepatan sisi horizontal.

4. Profil kecepatan sisi horizontal $x/D_h = 0$ variasi tanpa *IDB* menunjukkan adanya *deficit* aliran pada *centerline* sampai mendekati *inner wall elbow*, pada variasi dengan menggunakan *IDB deficit* aliran tersebut dapat diperbaiki pada daerah *centerline*, namun tidak teratasi pada *inner wall elbow* dan menambah agitasi pada sisi *outer elbow*, terbukti dari rata – rata kecepatan pada daerah *outer* dan *centerline* masing – masing variasi letak *IDB* yang lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan *IDB*, sehingga profil kecepatan pada *outer elbow* variasi letak *IDB* lebih cepat dari pada tanpa menggunakan *IDB*.

5.2 Saran

Saran yang diperlukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Penempatan *IDB* pada eksperimen ini dirasa masih kurang efektif untuk memperbaiki aliran akibat digunakannya *fitting elbow* untuk semua variasi. Terbukti dari hasil pengukuran intensitas turbulensi pada sisi *inner elbow* yang tidak cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow*, sehingga masih terjadi *deficit* pada sisi *inner elbow*.
2. Diperlukan adanya kajian eksperimen dengan variasi penempatan *IDB* pada *outer elbow*, dengan *single inlet disturbance body* agar dapat dibandingkan hasil *shear layer* dari *IDB* pada *outer elbow* mampu melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow*.
3. Untuk mendapatkan keakuratan data kuantitatif dan kualitatif yang baik dan akurat pada saat pengambilan data diperlukan peralatan yang berkualitas baik dan akurat. Sehingga pembaruan dan perawatan peralatan harus dilakukan.
4. Kondisi ruangan yang stabil harus dikontrol agar data yang diperoleh baik.

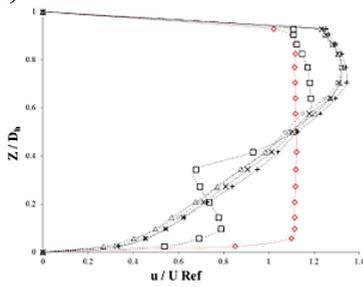
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

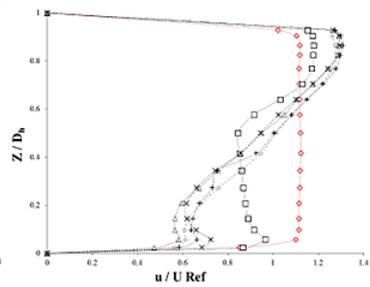
- [1] Rup, K., sarna, P., 2011. **Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow**, Flow Measurement and Instrumentation 2011; 22: 383-391
- [2] Dutta, Prasun & Nandi, Nityananda., 2016. **Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio On Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends**, Mechanic and Mechanical Engineering 2015; vol.19, no. 1: 5-16.
- [3] Ozgoren, Muammer., 2006. **Flow Structure in the downstream of Square and Circular Cylinders**, Flow Measurement and Instrumentation 2006; 17: 225-235.
- [4] Mahir, Necati., 2009. **Three – dimensional Flow Around A Square Cylinder Near A Wall**, Ocean Engineering 2009; 36: 357-367.
- [5] Hardian, Aqfha., 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Jarak Inlet Disturbance Body terhadap Aliran melalui Square Duct dengan Elbow 90°**. Tugas Akhir, Teknik Mesin ITS Surabaya.
- [6] ASHRAE Contributors., 2001. **The 2001 ASHRAE Handbook**. 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329.
- [7] Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics**, 8th Edition. New York : John Wiley & Sons Inc.
- [8] R. Munson., F. Young., Donald and H. Okiishi, Theodore. 2002. **Fundamentals of Fluid Mechanic**, 4th edition. New York: John Wiley & Sons Inc.
- [9] D.S Miller., 1990. **Internal Flow System**. BHRA (Information Service): 2nd edition.
- [10] Cheng, D.Y., 1994. **Laminar Flow Elbow System and Method**, U.s. Patent Documents, No. 5,323,661.
- [11] Nakayama Y., dan Boucher R.F., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics**. Oxford: Butterworth-Heinemann

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

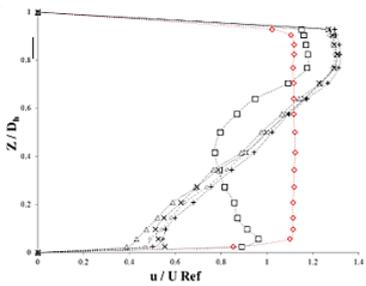
Lampiran 1. Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada $Re_{Dh}=4,77 \times 10^4$



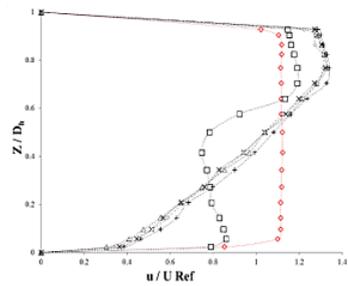
Section 1



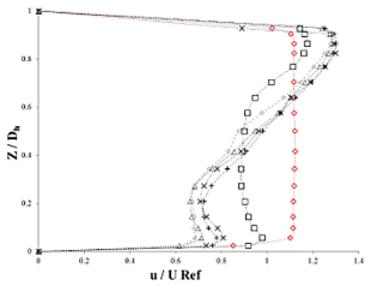
Section 2



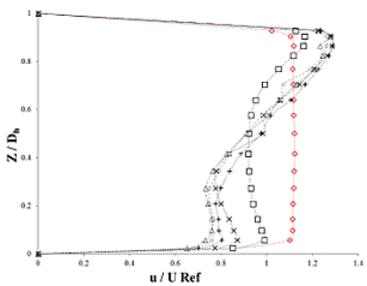
Section 3



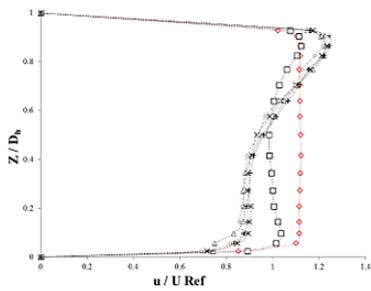
Section 4



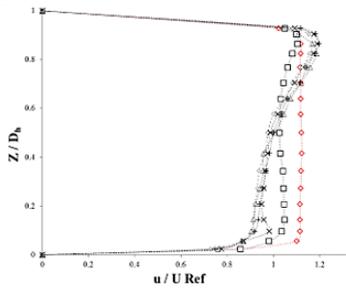
Section 5



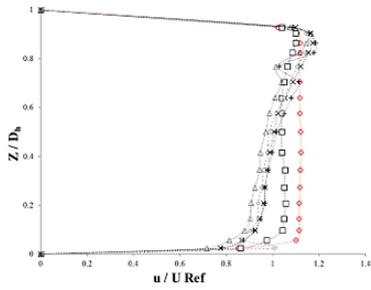
Section 6



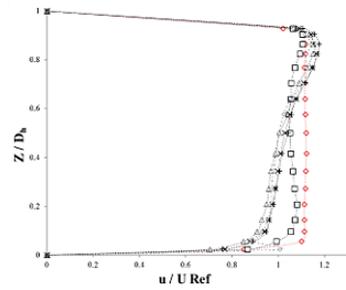
Section 9



Section 12



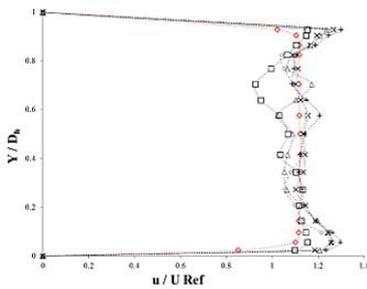
Section 13



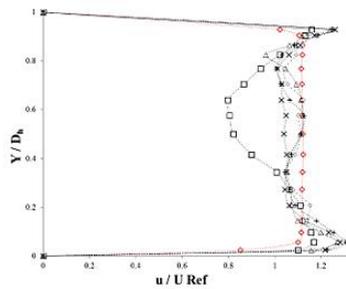
Section 14

--◇-- Sisi Upstream --□-- Tanpa IDB --X-- IDB 5deg --△-- IDB 10deg --◇-- IDB 15deg --+-- IDB 20deg

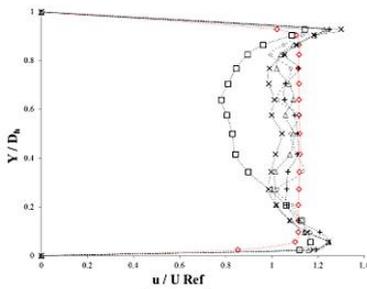
Lampiran 2. Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada $Re_{Dh}=4,77 \times 10^4$



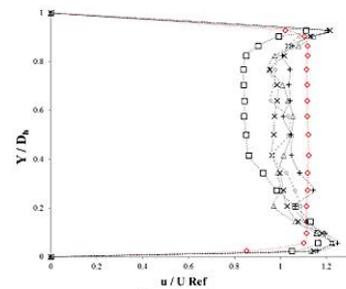
Section 1



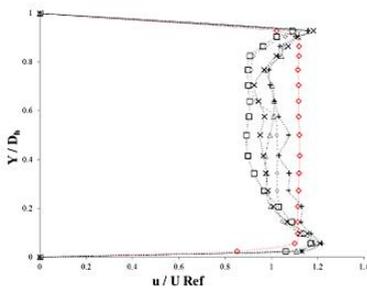
Section 2



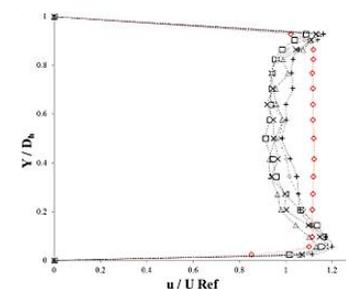
Section 3



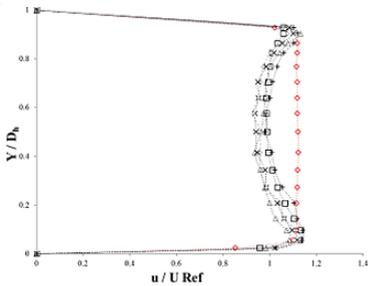
Section 4



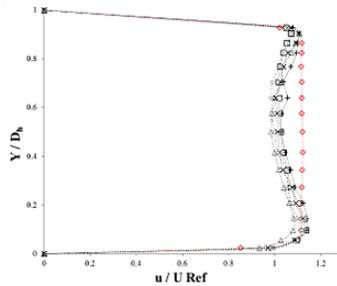
Section 5



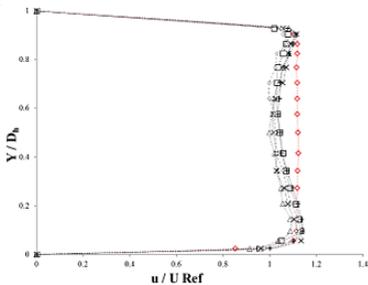
Section 6



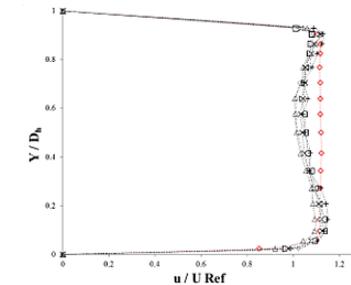
Section 9



Section 12



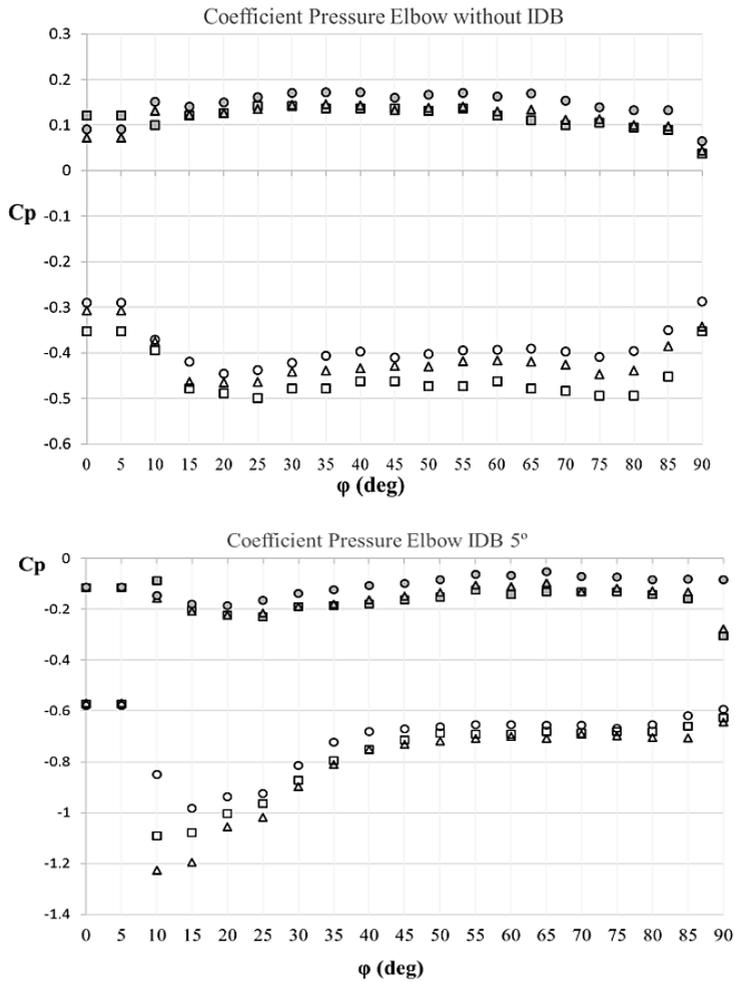
Section 13

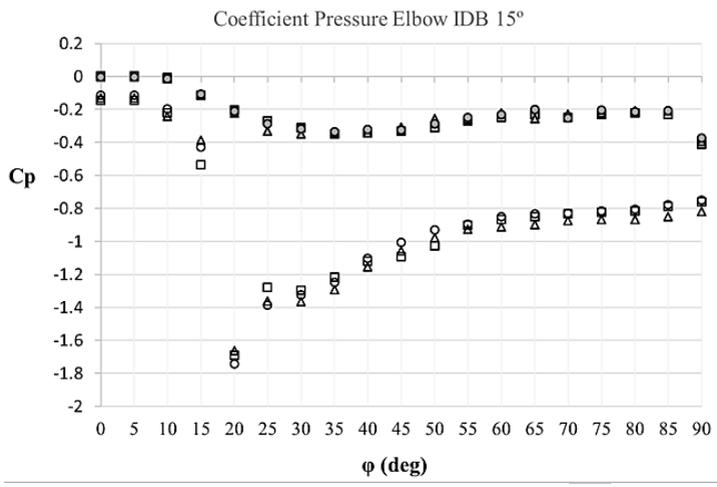
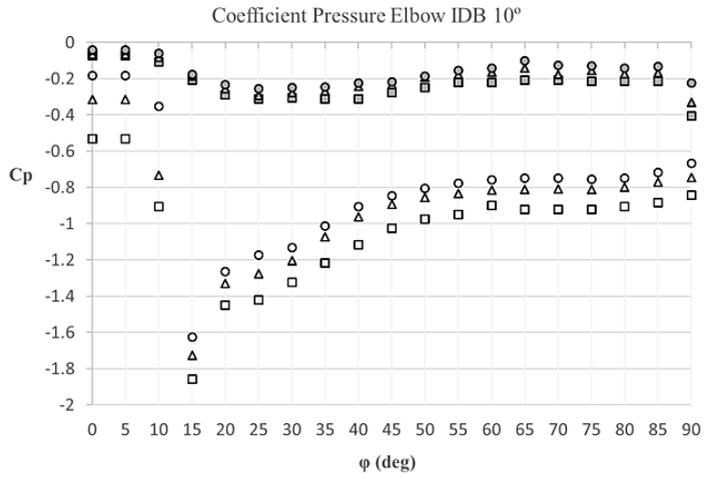


Section 14

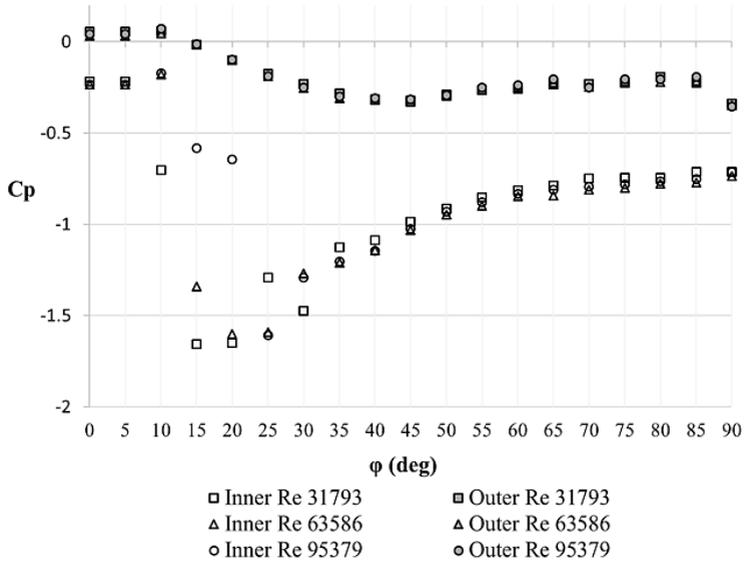
--◇-- Sisi Upstream
 --□-- Tanpa IDB
 --X-- IDB 5deg
 --▲-- IDB 10deg
 --◇-- IDB 15deg
 --+-- IDB 20deg

Lampiran 3. Pressure Coefficient Elbow 90° pada $Re_{Dh} = 3,18 \times 10^4$; $6,35 \times 10^4$; dan $9,54 \times 10^4$





Coefficient Pressure Elbow IDB 20°



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap **Sonny Aditya Luqman Hakim** dilahirkan di Bojonegoro, 04 November 1993, merupakan anak ke-dua dari dua bersaudara pasangan Bapak (Alm.) Siyadi dan Ibu Siti Kayatun, yang beralamat di Desa Margoagung RT.05 RW.01, Kecamatan Sumberrejo, Kabupaten Bojonegoro. Riwayat pendidikan formal pertama adalah SDN Margoagung 1 Bojonegoro, SMPN 2 Bojonegoro, dan SMAN 1 Bojonegoro Kemudian penulis lulus dan diterima di Jurusan D-3 Teknik Mesin Produksi Kerjasama ITS-DISNAKERTRANSDUK Prov. Jawa Timur melalui seleksi ujian masuk D-3 pada tahun 2012 dan terdaftar dengan Nomor Registrasi Pokok (NRP) 2112039014. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan Nomor Registrasi Pokok (NRP) 2115105037.

Penulis dikenal aktif mengikuti kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa ITS pada tahun 2012 sampai 2014 dan memenangkan dua medali perunggu pada PIMNAS ke-28 di universitas Haluoleo. Penulis sempat merasakan magang di PT. Holcim Indonesia Tbk. Tuban Plant sebagai Maintenance di *Mechanical Section Department*, Spesifikasi di *Tuban 1 Area*, Selain itu, penulis juga berperan aktif di Organisasi Forum Komunikasi M3NER-ITS 2011-2014 sebagai Ketua Departemen Kesejahteraan Mahasiswa, untuk informasi lebih lanjut dapat menghubungi penulis melalui pesan elektronik pada,

sonnyaditya45@gmail.com atau sonny12@mhs.me.its.ac.id

“Halaman ini sengaja dikosongkan”