



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN *DOUBLE GUIDE VANE* PADA VARIASI SUDUT BUKAAN DAMPER**

ANDREW JAYA NAZAR  
NRP 2114 105 019

Dosen Pembimbing  
Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

PROGRAM SARJANA  
LABORATORIUM MEKANIKA DAN MESIN-MESIN FLUIDA  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2016



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW THROUGH  
SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90° WITH  
DOUBLE GUIDE VANE IN VARIATION OF  
OPENING ANGLE OF DAMPER**

**ANDREW JAYA NAZAR  
NRP 2114 105 019**

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

**BACHELOR DEGREE PROGRAM  
MACHINERY AND FLUID MECHANIC LABORATORY  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

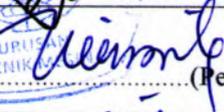
### STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN *DOUBLE GUIDE VANE* PADA VARIASI SUDUT BUKAAN *DAMPER*

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

**ANDREW JAYA NAZAR**  
NRP. 2114 105 019

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir :	
1. <u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT</u> (NIP. 197104051997021001)	 .....(Pembimbing)
2. <u>Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D</u> (NIP. 1964122819900031002)	 .....(Penguji I)
3. <u>Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT</u> (NIP. 196202161995121001)	 .....(Penguji II)
4. <u>Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., Ph.D</u> (NIP. 19751206200511002)	 .....(Penguji III)

# **STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN *DOUBLE GUIDE VANE* PADA VARIASI SUDUT BUKAAN *DAMPER***

**Nama Mahasiswa** : Andrew Jaya Nazar  
**NRP** : 2114 105 019  
**Jurusan** : Teknik Mesin  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

## **ABSTRAK**

Instalasi saluran udara tidak hanya berupa pipa lurus, tetapi juga terdapat *fitting*/aksesoris perpipaan misalnya *elbow 90°* dan *damper*. Aksesoris perpipaan ini berfungsi agar saluran udara dapat terpasang sesuai dengan kebutuhan. Namun, penggunaan aksesoris perpipaan ini menyebabkan bertambahnya *pressure drop* akibat adanya *friction loss* dan *separation loss*. Pemasangan *guide vane* pada *elbow 90°* diharapkan dapat mengurangi *pressure drop* karena dapat mengurangi terjadinya *secondary flow*, namun hal ini dapat menambah kerugian akibat gaya gesek. Saat ini penghematan energi menjadi sorotan terutama dalam dunia industri. Penurunan *pressure drop* pada belokan perpipaan sangat diharapkan, agar dapat menghemat energi lebih. Untuk itu perlu dilakukan usaha agar dapat menurunkan *pressure drop* yang terjadi.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan benda uji saluran udara yang terdiri dari: *upstream duct (straight duct)*, *square elbow 90°* dengan  $r/D_h=1,5$  dan dilengkapi *double guide vane*, *damper*, *downstream duct (straight duct)*, dan *induced fan*. Pengukuran parameter yang dibutuhkan dilakukan dengan menggunakan: *pitot tube*, *inclined manometer*, *pressure transducer*. Pengujian dilakukan dengan variasi sudut *damper*  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  yang diputar secara CCW dengan  $Re=7,87 \times 10^4$  untuk mendapatkan profil kecepatan bidang vertikal dan horzontal, sedangkan untuk mengetahui *pressure drop* yang

terjadi dilakukan pada beberapa variasi nilai  $Re$  yang berbeda, yaitu  $3,99 \times 10^4$ ;  $4,73 \times 10^4$ ;  $5,52 \times 10^4$ ;  $6,3 \times 10^4$ ;  $7,09 \times 10^4$ ;  $7,87 \times 10^4$ ;  $8,67 \times 10^4$ ;  $9,46 \times 10^4$ .

Dari eksperimen ini diperoleh bahwa profil kecepatan pada masing-masing variasi sudut bukaan *damper* sudah mendekati keadaan *recovery* aliran pada akhir *section* baik dari bidang vertikal maupun horizontal. *Pressure drop* yang terjadi semakin naik seiring dengan bertambahnya nilai bilangan Reynolds dan sudut bukaan *damper*. Nilai konstanta *damper* semakin naik dari bukaan sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ .

***Kata Kunci : elbow 90° dengan double guide vane; damper; karakteristik aliran setelah elbow***

# **EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90° WITH DOUBLE GUIDE VANE IN VARIATION OF OPENING ANGLE OF DAMPER**

**Name of Student** : Andrew Jaya Nazar  
**NRP** : 2114 105 019  
**Departement** : Mechanical Engineering  
**Academic Advisor** : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

Installation of air ducts not only in the form of a straight pipe, but also there is a piping accessories, eg 90 ° elbow and damper. Piping accessories function so that the air ducts can be installed as needed. However, the use of this piping accessories will increase the pressure drop due to friction loss and separation loss. Installation guide vane at 90o elbow is expected to reduce pressure drop because it can reduce the occurrence of secondary flow, but it can add to losses due to friction forces. Currently the energy savings in the spotlight, especially in the industrial world. Decreasing pressure drop in the piping bends are highly desirable, in order to conserve more energy. It is necessary for businesses to be able to lower the pressure drop that occurs.

This research was done experimentally with the test object air duct consisting of: upstream duct (straight duct), square elbow 90 ° with  $r / Dh = 1,5$  and include double guide vane, damper, downstream duct (straight duct), and induced fan , Measurement parameters are required to do by using: pitot tube, inclined manometer, pressure transducer. Testing was done by varying the angle damper 0°, 10°, 20°, 30° rotated CCW by  $Re = 7,87 \times 10^4$  to get vertical and horizontal plane velocity profile, while to know the pressure drop that occurs is done in several different variations of Re values, are  $3,99 \times 10^4$ ;  $4,73 \times 10^4$ ;  $5,52 \times 10^4$ ;  $6,3 \times 10^4$ ;  $7,09 \times 10^4$ ;  $7,87 \times 10^4$ ;  $8,67 \times 10^4$ ;  $9,46 \times 10^4$ .

From these experiments showed that the velocity profile at each variation damper opening angle is approaching a state of recovery flow at end section of the field either vertically or horizontally. Pressure drop is happening farther up along with increasing the value of the Reynolds number and opening angle of the damper. Constant value of damper are increasingly rising on the opening angle of 0 ° to 30 °.

***Key words*** : *elbow 90° with double guide vane, damper, flow characteristics through elbow*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Penelitian .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Terowongan Angin ( <i>Wind Tunnel</i> ) .....	7
2.1.1 Rangkaian Terbuka .....	7
2.1.2 Rangkaian Tertutup .....	8
2.2 Persamaan Euler Dalam Koordinat Streamline.....	9
2.3 Lapisan Batas ( <i>Boundary Layer</i> ).....	10
2.4 Karakteristik Aliran Fluida di Dalam Pipa.....	11
2.4.1 Aliran Laminer.....	11
2.4.2 Aliran Turbulen.....	11
2.4.3 Aliran Berkembang Penuh .....	12
2.5 <i>Head Loss</i> .....	14
2.5.1 <i>Head Loss Mayor</i> .....	15
2.4.2 <i>Head Loss Minor</i> .....	16
2.6 Tekanan.....	17
2.7 <i>Coefficient Pressure</i> .....	18
2.8 Penelitian Terdahulu .....	19
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Skema Penelitian .....	23
3.2 Peralatan Pendukung .....	24

3.2.1	<i>Square Duct</i> .....	24
3.2.2	<i>Centrifugal Fan</i> .....	26
3.2.3	<i>Nozzle dan Honey Comb</i> .....	26
3.2.4	<i>Damper</i> .....	27
3.2.5	Alat ukur .....	28
3.3	Analisis Dimensi Parameter-Parameter yang Dianalisis.....	31
3.3.1	Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Koefisien Tekanan pada Square Ducting .....	32
3.3.2	Analisis Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada Square Duct .....	33
3.4	Langkah-Langkah Validasi .....	34
3.4.1	Alat yang digunakan .....	34
3.4.2	Validasi Tekanan Dinamis .....	34
3.4.3	Validasi Tekanan Dinding.....	36
3.5	Prosedur Pengambilan Data .....	38
3.5.1	Pengambilan Data Kuantitatif .....	38
3.5.2	Pengolahan Data Kuantitatif .....	38
3.4.3	Validasi Tekanan Dinding.....	39
3.6	Urutan Langkah Penelitian.....	44
3.6.1	<i>Flowchart</i> Penelitian .....	44
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya <i>Damper 0°</i> Dengan Tanpa <i>Damper</i> Saat $Re = 7,87 \times 10^4$ .....	47
4.2	Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya <i>Damper 10°</i> Dengan Tanpa <i>Damper</i> Saat $Re = 7,87 \times 10^4$ .....	47
4.3	Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya <i>Damper 20°</i> Dengan Tanpa <i>Damper</i> Saat $Re = 7,87 \times 10^4$ .....	55
4.4	Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya <i>Damper 30°</i> Dengan Tanpa <i>Damper</i> Saat $Re = 7,87 \times 10^4$ .....	59
4.5	Pressure Drop pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square</i>	

<i>Elbow 90° Fungsi Bilangan Reynolds dengan Variasi Sudut Bukaannya Damper 0°, 10°, 20°, 30°</i> .....	64
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	69
5.2 Saran.....	70
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	71
<b>LAMPIRAN</b> .....	72

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Wind Tunnel Rangkaian Terbuka .....	7
<b>Gambar 2.2</b>	Wind Tunnel Rangkaian Tertutup.....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline .....	9
<b>Gambar 2.4</b>	Jenis aliran dalam pipa.....	11
<b>Gambar 2.5</b>	Fully Developed Flow.....	13
<b>Gambar 2.6</b>	Pengukuran Tekanan Statis .....	17
<b>Gambar 2.7</b>	Distribusi tekanan pada curved pipe .....	19
<b>Gambar 2.8</b>	Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada downstream elbow.....	20
<b>Gambar 2.9</b>	Secondary flow at corner rectangular elbow 90° ...	21
<b>Gambar 2.10</b>	Distribusi profil kecepatan section elbow 90° tanpa dan dengan dua guide vanes .....	21
<b>Gambar 3.1</b>	Skema instalasi penelitian .....	24
<b>Gambar 3.2</b>	Sketsa Square Ducting (Pandangan Atas).....	24
<b>Gambar 3.3</b>	Instalasi Penelitian .....	25
<b>Gambar 3.4</b>	Centrifugal blower dan Inverter .....	26
<b>Gambar 3.5</b>	<i>Nozzle dan Honey Comb</i> .....	27
<b>Gambar 3.6</b>	<i>Damper</i> .....	27
<b>Gambar 3.7</b>	<i>Pitot Static Tube</i> .....	28
<b>Gambar 3.8</b>	Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan.....	29
<b>Gambar 3.9</b>	DAQ PRO 5300 dan Differential Pressure Transmitter .....	29
<b>Gambar 3.10</b>	<i>Inclined Manometer</i> .....	30
<b>Gambar 3.11</b>	Validasi Tekanan Dinamis .....	35
<b>Gambar 3.12</b>	Validasi Tekanan Dinamis dengan Sudut Buka <i>Damper 10°</i> .....	36
<b>Gambar 3.13</b>	Validasi Tekanan Statis.....	37
<b>Gambar 3.14</b>	Validasi Tekanan Statis dengan Sudut Buka <i>Damper 10°</i> .....	38
<b>Gambar 3.15</b>	<i>Flowchart</i> penelitian .....	45
<b>Gambar 4.1</b>	Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada <i>downstream</i> tanpa <i>damper</i> dan sudut <i>damper 0°</i> ...	49

**Gambar 4.2** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 0°.... 50

**Gambar 4.3** Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 10° . 53

**Gambar 4.4** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 10°.. 54

**Gambar 4.5** Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 20° . 57

**Gambar 4.6** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 20°.. 58

**Gambar 4.7** Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 30° . 62

**Gambar 4.8** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 30°.. 63

**Gambar 4.9** Bilangan tak berdimensi  $\frac{\Delta P}{\rho \cdot U_{ref}^2}$  dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  dan variasi sudut bukaan *damper* 0°, 10°, 20° dan 30° serta tanpa *damper*..... 65

**Gambar 4.10** Moody Diagram ..... 66

**Gambar 4.11** k *Damper* untuk masing-masing bukaan sudut ..... 67

**Gambar 4.12** k *elbow* dengan *double guide vane* pada variasi sudut bukaan *damper* ..... 68

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Pengaruh penambahan guide vane terhadap pressure drop.....	22
<b>Tabel 3.1</b>	Lokasi perhitungan profil kecepatan.....	28
<b>Tabel 3.2</b>	Urutan langkah penelitian.....	44
<b>Tabel 3.3</b>	Jadwal pelaksanaan penelitian.....	46
<b>Tabel 4.1</b>	Tabel Pressure Drop tiap sudut bukaan damper .....	64

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pembangunan gedung-gedung bertingkat bertambah banyak dari masa ke masa, misalnya gedung pusat perbelanjaan dan apartemen. Setiap ruangan pasti membutuhkan energi untuk kenyamanan orang yang menempatinnya. **Shi-Ming Deng dan John Burnett 1998** melakukan penelitian tentang rata-rata penggunaan energy di 16 hotel di Hong Kong. Dari penelitian tersebut, didapatkan bahwa konsumsi energi pada gedung-gedung ini digunakan antara lain 32% untuk sistem tata udara, 28% untuk non-electrical, 23% untuk kebutuhan khusus penyewa misalnya untuk dapur, 12% untuk sistem tata cahaya, dan 5% untuk sistem transportasi gedung (lift atau escalator). Data di atas mengatakan bahwa energi yang menyumbang cukup besar adalah sistem tata udara, karena membutuhkan daya yang cukup besar untuk mensirkulasikan udara dingin ke setiap ruangan pada gedung bertingkat. Untuk menyalurkan udara membutuhkan energi dan setiap saluran memiliki kerugian energi. Jika mampu mengatasi kerugian ini maka akan menguntungkan dari segi energi maupun finansial.

Instalasi saluran udara yang dilewati fluida terdiri dari pipa lurus dan *fitting* perpipaan, misalnya *elbow* 90° dan *damper*. *Elbow* digunakan untuk membelokkan arah aliran agar instalasi terpasang sesuai kebutuhan dan *damper* dapat digunakan untuk proses *throttling*. Namun pemasangan *fitting* perpipaan ini dapat menyebabkan *pressure drop* yang lebih besar 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*. Karena *fitting* perpipaan ini, maka daya yang dibutuhkan untuk mengalirkan fluida menjadi meningkat. Dalam dunia industri hal seperti ini

dapat menyebabkan kerugian dari segi energi dan finansial. Untuk itu pengurangan *pressure drop* menjadi hal yang penting karena saat ini dunia industri fokus pada penghematan energi dan pencarian alternatif.

Aliran di dalam *elbow*  $90^\circ$  mengalami separasi pada sisi *inner* dan *outer wall*. Separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient*, sehingga sebagian aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya dan akan membentuk *vortex* yang dapat mengurangi energi aliran. Sedangkan terbentuknya aliran sekunder (*secondary flow*) di dalam *rectangular elbow*  $90^\circ$  merupakan akibat dari adanya gerakan pemisahan aliran dari *outer wall* menuju *inner wall*. Pada *elbow*  $90^\circ$ , distribusi tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar daripada sisi *inner wall*, hal ini memungkinkan partikel fluida bergerak dari *outer wall* menuju *inner wall*. Efek yang ditimbulkan oleh adanya aliran sekunder ini adalah terjadinya penyumbatan aliran (*blockage effect*).

Salah satu usaha untuk mengurangi kerugian aliran di dalam *elbow* adalah dengan menambahkan sudu pengarah (*guide vane*). Hal ini bertujuan untuk mengurangi *separation loss* yang terjadi karena *guide vane* dapat membuat aliran lebih mampu mengikuti kontur permukaan, dan diharapkan dapat mengurangi terbentuknya *secondary flow*. Namun di sisi lain penambahan *guide vane* dapat meningkatkan *friction loss* sehingga *pressure drop* belum tentu berkurang. Hal ini telah dikaji dalam penelitian secara eksperimen yang dilakukan oleh **Sutardi dkk (2010)** tentang pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* pada instalasi yang menggunakan *elbow*. *Elbow* yang digunakan adalah *rectangular elbow*  $90^\circ$  dengan 4 variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane*, satu *guide vane*, dua *guide vanes*, dan tiga *guide vanes*. Jarak pada setiap jumlah *guide vane* yang digunakan sama atau linier terhadap sisi dekat *inner wall* sampai *outer wall*. *Re* aliran yang melalui *elbow* divariasikan menjadi  $2,1 \times 10^4$ ,  $8,4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^4$ . Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk  $Re$   $2,1 \times 10^4$ , penambahan *guide vane*

dapat dikatakan menguntungkan karena dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi, tetapi pada saat  $Re$  dinaikkan pada  $8,4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^4$ , penambahan *guide vane* justru merugikan karena meningkatkan *pressure drop* dibandingkan tidak menggunakan *guide vane*.

Kajian serupa dilakukan dalam penelitian **Iswati (2009)** yang dilakukan secara numerik dan eksperimen tentang pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* aliran di dalam *rectangular elbow*  $90^\circ$  dengan Reynolds  $2,1 \times 10^5$  untuk mengetahui penurunan tekanan di sepanjang sisi output dan input *rectangular elbow*  $90^\circ$ . Desain jarak *guide vane* yang digunakan adalah sama atau linier dari posisi dekat *inner wall* hingga *outer wall*. *Guide vane* dibuat dengan sisi yang berbentuk *rounded* dengan harapan untuk mengurangi terjadinya separasi ketika fluida kontak dengan *guide vane* saat memasuki *rectangular elbow*  $90^\circ$ . Variabel yang divariasikan adalah *rounded leading edge guide vane* dengan satu nilai Reynolds number untuk mengetahui pengaruhnya terhadap penurunan tekanan. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa pengaruh penambahan dua *guide vanes* justru meningkatkan penurunan tekanan aliran, karena perbedaan  $C_p$  antara *outer wall* dengan *inner wall* yang semakin besar.

**Danbon dan Sollic (2000)** melakukan penelitian secara eksperimen tentang elbow  $90^\circ$  yang ditambahkan sebuah damper yang berupa *butterfly valve* setelahnya. Hasil pengujian mengatakan adanya perbedaan profil kecepatan antara saluran yang memakai *damper* dan tidak. Penelitian yang dilakukan oleh **Putra (2016)** yang dilakukan secara numerik juga mengatakan bahwa variasi sudut bukaan *damper* sangat mempengaruhi *recovery* aliran pasca melewati elbow  $90^\circ$ .

## 1.2. Rumusan Masalah

Dengan bertambahnya *guide vane* dalam elbow ternyata tidak menjamin berkurangnya *pressure drop* yang terjadi, karena hal tersebut mengakibatkan berkurangnya *separation loss* tetapi bertambahnya *friction loss*. Hasil penelitian sebelumnya

menjelaskan bahwa semakin bertambahnya bilangan Reynolds, maka akan meningkatnya *pressure drop*. Maka hipotesis awal penelitian ini adalah dengan dipasangnya *double guide vanes*, cenderung meningkatkan *pressure drop*. Namun dengan dipasangnya *damper* setelah *elbow*, akan terjadi perubahan profil kecepatan dan dapat mempengaruhi *pressure drop* yang terjadi. Untuk mengamati hal tersebut maka dirumuskanlah :

1. Bagaimana *pressure loss* instalasi saluran udara, koefisien *loss minor elbow 90°* dengan *double guide vane* dan koefisien *loss minor damper*?
2. Bagaimana profil kecepatan pada *upstream* dan *downstream duct* (posisi bidang horizontal dan vertikal)?

### 1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sehingga pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar dari tujuan awal. Maka dari itu, penelitian ini terbatas pada asumsi:

1. Fluida kerja adalah udara dengan sifat *incompressible*, *viscous* dan *steady*.
2. Perpindahan panas akibat gesekan diabaikan.
3. Kekasaran dinding diabaikan.
4. Aliran yang melintasi saluran udara memiliki lapis batas turbulen.
5. Studi eksperimen menggunakan bilangan Reynolds pada saluran *upstream* sebesar  $Re_{Dh}=7,88 \times 10^4$  untuk mengukur profil kecepatan dan intensitas turbulensi, serta dengan jarak bilangan Reynolds  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  untuk mengukur *pressure drop*.
6. Temperatur fluida diasumsikan konstan.

### 1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini yaitu guna mengetahui karakteristik aliran yang melalui suatu gangguan (*damper*) yang diletakkan pada jarak  $x/D_h=2$  dari saluran *outlet elbow 90°* yang

dilengkapi dengan *double guide vanes* pada saluran *downstream* namun tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui *pressure loss* instalasi saluran udara, koefisien *loss minor elbow 90°* dengan *double guide vane* dan koefisien *loss minor damper*.

Mengetahui profil kecepatan pada *upstream* dan *downstream duct* (posisi bidang horizontal dan vertikal).

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut :

1. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* instalasi saluran udara, koefisien *loss minor elbow 90°* dengan *double guide vane*, dan koefisien *loss minor volume damper* pada variasi sudut pembukaan *damper*.
2. Memberikan gambaran tentang perbedaan profil kecepatan aliran yang melewati suatu saluran berpenampang *square* yang dipasang *damper* pada saluran *downstream straight* dengan saluran yang tidak dipasang *damper*.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

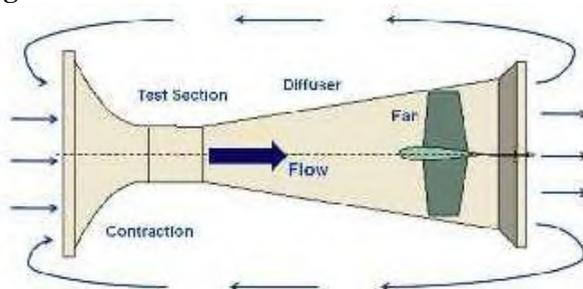
Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan serta dilengkapi pula dengan referensi mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang mendukung.

### 2.1 Terowongan Angin (*Wind Tunnel*)

*Wind tunnel* adalah alat yang digunakan dalam penelitian aerodinamisa untuk mempelajari karakteristik aliran udara. *Wind tunnel* digunakan untuk mensimulasikan keadaan sebenarnya pada suatu benda yang berada dalam pengaruh gaya-gaya aerodinamisa dalam bidang aeronautika, untuk menganalisis kinerja mekanika terbang (*flight mechanic*) dari suatu benda terbang (*aerial vehicle*). *Wind tunnel* juga banyak digunakan dalam pengujian berbagai kondisi benda dalam aliran udara seperti konstruksi gedung pencakar langit, lingkungan perkotaan dan lain-lain (Hanifah, 2015).

Berdasarkan jalur rangkaiannya *wind tunnel* dibagi dalam dua rangkaian, yaitu rangkaian terbuka (*open circuit wind tunnel*) dan rangkaian tertutup (*closed circuit wind tunnel*).

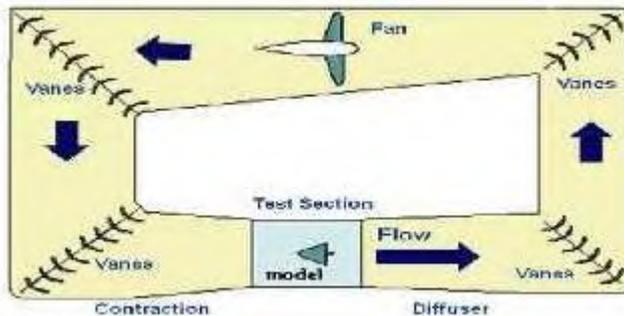
#### 2.1.1 Rangkaian Terbuka



**Gambar 2.1 Wind Tunnel Rangkaian Terbuka (Hanifah, 2015)**

Tipe rangkaian terbuka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 adalah tipe dimana udara mengalir lurus dari sisi masuk hingga ke sisi luar, dan udara yang masuk wind tunnel akan terbuang keluar lingkungan. Ada beberapa keuntungan wind tunnel tipe terbuka, diantaranya adalah biaya konstruksi yang relatif murah daripada tipe tertutup, bisa menggunakan motor bakar jika desain wind tunnel tersebut meletakkan motornya pada bagian dalam terowongan karena pada tipe terbuka ini bisa divisualisasikan pengujian aliran udara dengan asap, dan bebas dari kotoran yang ikut masuk dari sisi masuk karena tipe terbuka maka kotoran tersebut akan terbawa keluar lingkungan. Sedangkan kekurangannya adalah operasinya sangat dipengaruhi kondisi cuaca, jika pengujian dilakukan di luar ruangan dengan cuaca hujan, maka pengoperasian wind tunnel dihentikan arena sisi masuk dan sisi keluar terbuka akan memudahkan air masuk dalam wind tunnel dan dapat menyebabkan kerusakan beberapa komponen wind tunnel, dan yang kedua adalah masalah kebisingan. Jika wind tunnel dioperasikan dalam suatu ruangan, maka akan menimbulkan gangguan pendengaran pada operator jika pengoperasiannya terlalu lama.

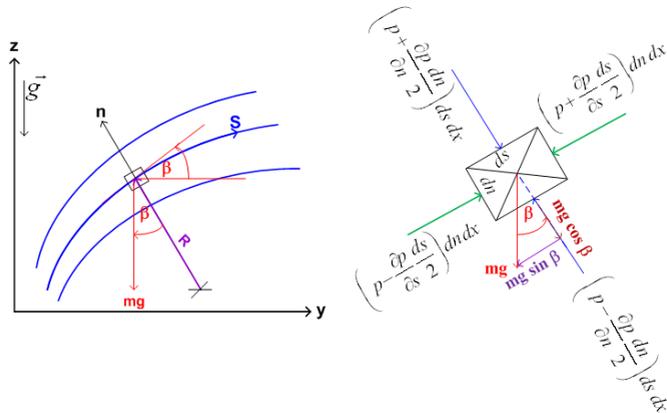
### 2.1.2 Rangkaian Tertutup



**Gambar 2.2 Wind Tunnel Rangkaian Tertutup (Hanifah, 2015)**

Tipe rangkaian tertutup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 adalah tipe dimana udara mengalir secara kontinu dalam wind tunnel, artinya udara yang masuk akan terus mengalir selama pengoperasian wind tunnel dan udara tidak terbuang keluar lingkungan. Ada beberapa keuntungan wind tunnel tipe rangkaian tertutup, diantaranya adalah yang pertama operasinya tidak dipengaruhi cuaca karena tiap sisinya tertutup, dan yang kedua adalah tidak terlalu bising jika dibandingkan tipe rangkaian terbuka, karena suara yang dihasilkan udara dan motor teredam oleh dinding wind tunnel yang tertutup. Sedangkan kekurangannya adalah yang pertama masalah biaya konstruksinya, relatif lebih mahal dari pada wind tunnel rangkaian terbuka, dan yang kedua adalah jika desain tersebut menggunakan motor bakar, maka dibutuhkan saluran tambahan sebagai saluran gas buang dari motor bakar.

## 2.2 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*



**Gambar 2.3 Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline (Fox dan Mc. Donald, 1998)**

Persamaan Euler digunakan untuk menggambarkan sebuah aliran fluida dalam kondisi stabil sepanjang streamwise ( $s$ )

dimana untuk mempermudah pembacaan persamaan euler ini dapat diperhatikan gambar di atas dengan  $yz$  merupakan koordinat arah aliran.

Untuk aliran steady dimana  $R$  adalah radius lengkungan streamline. Oleh karena itu persamaan euler normalnya pada streamline dengan kondisi aliran steady didapatkan rumus :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{v^2}{R} \quad (2.1)$$

Sedangkan untuk aliran tunak pada bidang horizontal persamaan euler dapat dirumuskan:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{v^2}{R} \quad (2.2)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa tekanan meningkat ke arah keluar dari pusat kelengkungan dari arus. Di daerah-daerah dimana arus lurus jari-jari kelengkungan  $R$  adalah tak terbatas dan tidak ada variasi tekanan normal terhadap arus.

### 2.3 Lapisan Batas (*Boundary Layer*)

Lapisan batas (*boundary layer*) adalah lapisan tipis pada permukaan padat (*solid surface*) tempat fluida mengalir dimana pengaruh viskositas relatif besar. Pada lapisan batas, efek viskositas masih terjadi atau gradien kecepatan pada arah vertikal masih terjadi. Di atas *boundary layer* fluida mengalir dengan kecepatan seragam sebesar  $U_{\infty}$ . *Boundary layer* merupakan keadaan yang dinyatakan sebagai lapisan dimana kecepatan aliran fluida sebesar  $0,99 U_{\infty}$ .

Aliran sekunder dan separasi merupakan fenomena fisis yang sering muncul ditemukan dalam aliran fluida. *Secondary flow* merupakan bentuk aliran yang arahnya orthogonal terhadap arah aliran utama. Munculnya *secondary flow* disebabkan karena adanya interaksi fisis antara lapisan batas (*boundary layer*) dan *pressure gradient* pada permukaan dinding-dinding yang berdekatan. Keberadaan aliran ini menyebabkan instabilitas pada aliran utama (*primary flow*). Sedangkan, separasi merupakan terangkatnya *boundary layer* meninggalkan permukaan karena

aliran mengalami defisit momentum dan losses kinetic energy akibat adverse pressure gradient.

## 2.4 Karakteristik Aliran Fluida di Dalam Pipa

Fluida yang mengalir dalam suatu ruang yang dibatasi dinding yang padat akan memiliki karakteristik aliran, yaitu aliran laminar atau aliran turbulen. Karakteristik struktur aliran internal (dalam pipa) sangat tergantung dari kecepatan rata-rata aliran dalam pipa, densitas, viskositas dan diameter pipa.

### 2.4.1 Aliran Laminar

Aliran laminar didefinisikan sebagai fluida yang bergerak secara halus dan lancar dengan kecepatan relatif rendah. Aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan – lapisan dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Dalam aliran laminar ini viskositas berfungsi untuk meredam kecenderungan terjadinya gerakan relatif antara lapisan. Aliran laminar memiliki bilangan Reynolds yang kurang dari 2300.

### 2.4.2 Aliran Turbulen

Aliran turbulen merupakan aliran dimana pergerakan aliran dari partikel–partikel fluida sangat tidak menentu. Aliran turbulen memiliki bilangan Reynolds lebih dari 4000. Dalam hal ini turbulensi yang terjadi dapat membangkitkan tegangan geser yang merata di seluruh aliran fluida.



**Gambar 2.4 Jenis aliran dalam pipa (Munson, 2002)**

Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang akan menentukan jenis dari aliran berdasarkan kecepatan aliran yang melalui diameter tertentu dibanding dengan kekentalannya, sehingga dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.3)$$

Dimana :  $V$  = Kecepatan fluida yang mengalir  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$D$  = Diameter dalam pipa (m)

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

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

$$Dh = \frac{4A}{P} \quad (2.4)$$

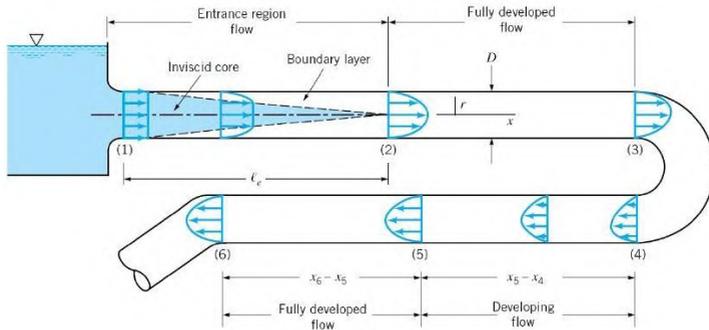
Dimana :  $D_h$  = Diameter hidrolis (m)

$A$  = Luas penampang ( $m^2$ )

$P$  = Keliling penampang (m)

### 2.4.3 Aliran Berkembang Penuh (Fully Developed Flow)

Setiap fluida yang mengalir dalam sebuah pipa harus memasuki pipa pada suatu lokasi. Daerah aliran di dekat lokasi fluida memasuki pipa disebut sebagai daerah masuk (Entrance Region). Daerah tersebut sekitar beberapa kali permulaan dari sebuah pipa yang dihubungkan pada sebuah tangki atau bagian awal dari saluran duct udara panas yang berasal dari sebuah tangki seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut.



**Gambar 2.5 Fully Developed Flow (Munson, 2002)**

Fluida biasanya memasuki pipa dengan profil kecepatan yang hampir seragam pada bagian (1). Selagi fluida bergerak melewati pipa, efek viskos menyebabkannya tetap menempel pada dinding pipa (kondisi lapisan batas tanpa-slip). Hal ini berlaku baik jika fluidanya adalah udara yang relatif inviscial maupun minyak yang kental. Jadi, sebuah lapisan batas (boundary layer) dimana efek viskos menjadi penting dihasilkan di sepanjang dinding pipa. Sehingga profil kecepatan awal berubah menurut jarak  $x$  sepanjang pipa, sampai fluidanya mencapai ujung akhir dari panjang daerah masuk, bagian (2), dimana setelah di luar itu profil kecepatan tidak berubah lagi menurut  $x$ . Lapisan batas telah berkembang ketebalannya sehingga mengisi pipa sepenuhnya. Efek viskos sangat penting di dalam lapisan batas. Sedangkan efek viskos fluida di luar lapisan batas (dalam inti inviscid) dapat diabaikan.

Panjang pipa antara awal dan titik di mana aliran mulai berkembang penuh disebut Entrance Length. Dilambangkan oleh  $L_e$ , *Entrance Length* merupakan fungsi bilangan Reynolds dari aliran tersebut. Secara umum,

untuk aliran laminar  $Re < 2300$  maka  $L_e = 138 D$

untuk aliran turbulen  $Re > 4000$  maka  $L_e = 25$  sampai  $40 D$

Aliran antara (2) dan (3) disebut aliran berkembang penuh (*fully developed flow*). Selanjutnya aliran tersebut terganggu oleh belokan, katup dll. Di luar gangguan tersebut aliran secara bertahap mulai kembali ke karakternya berkembang penuhnya. Di daerah inilah gradien tekanan dan gaya geser menyeimbangkan satu sama lain dan aliran terus dengan profil kecepatan konstan. Gradien tekanan tersebut tetap konstan.

Di daerah masuk (*Entrance Region*) fluida melambat. Dengan demikian, daerah tersebut ada keseimbangan antara gaya inersia, gaya tekan dan gaya geser. Dan gradien tekanannya tidak konstan.

## 2.5 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.

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

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \sum H_{LT} \quad (2.5)$$

Dimana : P = Tekanan statis (Pa)

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

z = Ketinggian fluida (m)

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

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

$H_{LT}$  = Head loss total (m)

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

$$\sum H_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (2.6)$$

*Head losses* atau rugi-rugi aliran terbagi menjadi dua bagian, yaitu Head loss mayor dan minor.

### 2.5.1 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 horizontal, maka penurunan tekanan dapat dihitung secara analitis, yaitu:

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{v}}{D} \quad (2.7)$$

Substitusi dari persamaan , didapatkan:

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{v}}{\rho D} = \left( \frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (2.8)$$

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

Dan koefisien gesekan ( f ) untuk aliran laminar adalah:

$$f = \frac{64}{Re}$$

b. Turbulen

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

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.9)$$

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

### 2.5.2 Head Loss Minor

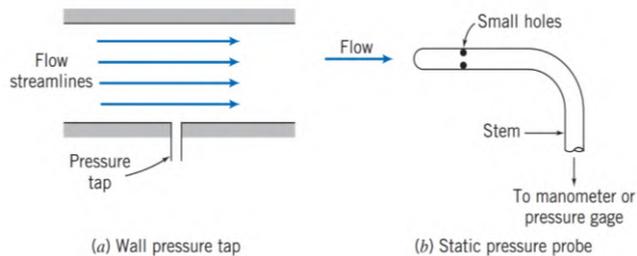
Head losses minor (rugi minor) adalah besar nilai kehilangan energi aliran fluida di dalam pipa yang disebabkan oleh perubahan luas penampang jalan aliran, entrance, fitting, dan lain sebagainya. Rugi minor adalah rugi yang disebabkan gangguan lokal seperti pada perubahan penampang, adanya katub, belokan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

$$h_{lm} = K \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.10)$$

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

## 2.6 Tekanan

Tekanan statik atau tekanan termodinamis pada persamaan Bernoulli adalah tekanan fluida yang diukur oleh alat yang bergerak bersama dengan fluida. Kondisi ini sangat sulit diwujudkan. Namun dengan kenyataan bahwa tidak ada variasi tekanan pada arah penampang tegak lurus aliran, maka tekanan statik dapat diukur dengan membuat lubang kecil pada dinding aliran sedemikian rupa sehingga sumbu tegak lurus dinding aliran (wall pressure tap). Cara lain adalah dengan memasang probe atau tabung pitot pada aliran fluida jauh dari dinding aliran. Pengukuran tekanan statis dilakukan oleh lubang kecil di bagian bawah dinding tabung.



**Gambar 2.6.** Pengukuran Tekanan Statis (Fox dan Mc. Donald, 1998)

Tekanan Stagnasi adalah tekanan fluida yang diukur pada aliran fluida yang diperlambat sampai diam,  $V = 0$  dengan kondisi aliran tanpa gesekan. Pengukuran tekanan stagnasi pada tabung pitot diukur oleh lubang kecil di mulut tabung yang akan tepat tegak lurus terhadap garis arus dari aliran. Untuk aliran tak mampu mampat dapat diterapkan persamaan Bernoulli pada kondisi tanpa perubahan ketinggian.

Tekanan dinamis yaitu tekanan akibat kecepatan fluida, yakni selisih antara tekanan statik dengan tekanan stagnasi. maka pengukuran tekanan statis dan tekanan stagnasi dengan tabung

pitot dapat juga sekaligus mengukur tekanan dinamisnya. Penerapan yang lain dari persamaan ini adalah perubahan tekanandinamis menjadi kecepatan fluida dengan kondisi aliran tak mampu mampat. Dengan demikian tabung pitot dapat juga dipergunakan sebagai alat ukur kapasitas aliran. Untuk menghitung tekanan yang terjadi dapat menggunakan persamaan Bernoulli dengan mengabaikan diferensial elevasi, yaitu:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{konstan} \quad (2.11)$$

Bila tekanan statis  $p$  pada suatu titik dalam suatu aliran dimana kecepatannya adalah  $V$ , maka tekanan stagnasi  $p_o$ , dimana kecepatan stagnasi  $V_o$  adalah nol, maka :

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2.12)$$

dimana  $V_o = 0$ , sehingga :

$$\frac{p_o}{\rho} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2.13)$$

atau,

$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.14)$$

dimana:  $P_o$  = Tekanan Stagnasi (Pa)

$P$  = Tekanan Statis (Pa)

$\frac{1}{2} \rho V^2$  = Tekanan Dinamis (Pa)

## 2.7 Coefficient Pressure

Distribusi tekanan yang terjadi pada kontur benda dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi yang disebut koefisien tekanan. Koefisien tekanan ( $C_p$ ) adalah selisih antara tekanan lokal dan tekanan freestream dibagi dengan tekanan dinamis.

$$C_p = \frac{p_c - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.15)$$

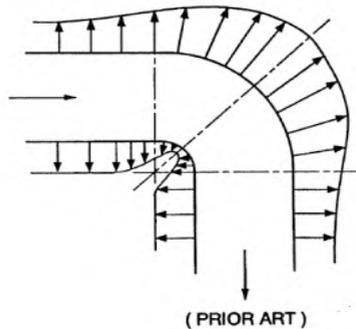
Dimana:  $p_c$  = tekanan statik pada kontur  $\left(\frac{kg}{m s^2}\right)$

$p_\infty$  = tekanan statik pada freestream  $\left(\frac{kg}{m s^2}\right)$

$\frac{1}{2} \rho U^2$  = tekanan dinamis aliran bebas  $\left(\frac{kg}{m s^2}\right)$

## 2.8 Penelitian Terdahulu

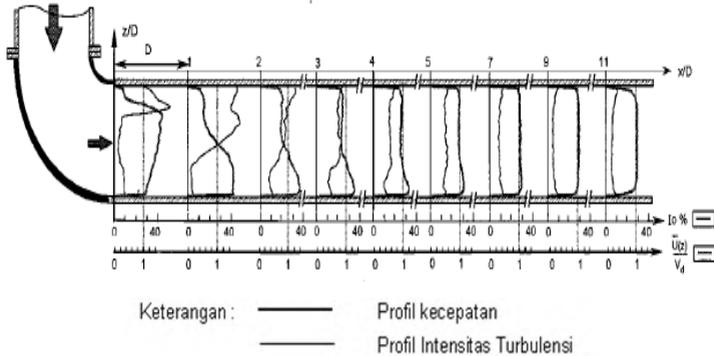
**Cheng (1994)** melakukan penelitian tentang distribusi tekanan di sepanjang sisi *inner wall* dan *outer wall elbow*  $90^\circ$ . Pada gambar 2.7 di bawah, terlihat bahwa sisi *inner wall* serta *outer wall* terjadi kenaikan tekanan (*adverse pressure gradient*)



**Gambar 2.7** Distribusi tekanan pada curved pipe (Cheng, 1994)

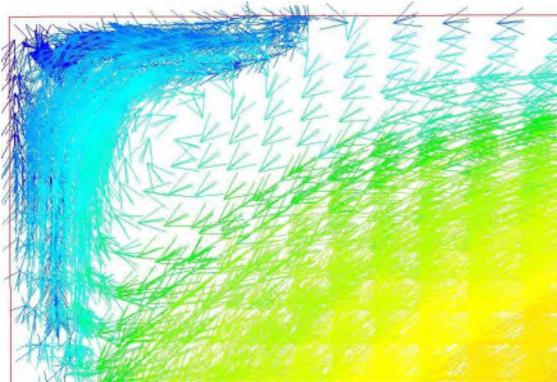
Penelitian selanjutnya dilakukan **Danbon dan Sollicc (2006)** mengenai profil kecepatan pada daerah downstream *circular elbow*  $90^\circ$ . Dari hasil penelitian terdapat perbedaan distribusi tekanan dan kecepatan, dimana *outer wall* memiliki nilai yang lebih besar dibanding *outer wall*. Ini menyebabkan partikel fluida yang bergerak dari *outer wall* ke *inner wall* dapat menghambat laju aliran fluida. Hal ini menyebabkan terjadinya

aliran sekunder (*secondary flow*) yang dapat menyebabkan penurunan tekanan (*pressure drop*). Profil kecepatan aliran setelah melewati *elbow* dapat dilihat pada gambar berikut.



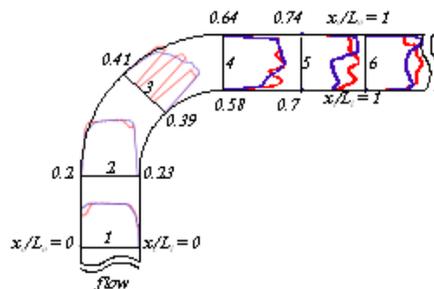
**Gambar 2.8 Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada downstream elbow (Danbon dan Sollic, 2006)**

Penelitian tentang *secondary flow* pernah dilakukan oleh **Hakim (2008)** dengan menambah dua *guide vane* pada *rectangular elbow 90°* yang ditunjukkan pada gambar 2.9 di bawah. Pada dasarnya penambahan *guide vane* dapat memecah aliran sekunder pada sisi *inner* dan *outer* akan tetapi dengan bertambah *guide vane* cenderung akan memperbesar terjadinya aliran sekunder pada sisi *corner* dan mengikis momentum karena akumulasi *adverse pressure gradient* dan gesekan pada dinding atas dan bawah sehingga partikel aliran pada *leading edge end wall guide vane* akan terseparasi sebelum menumbuk dinding *guide vane*.



**Gambar 2.9 Secondary flow at corner rectangular elbow  $90^\circ$  (Hakim, 2008)**

**Iswati (2009)** melakukan penelitian secara eksperimen tentang profil kecepatan setelah melewati elbow  $90^\circ$  sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.10. Dengan penambahan dua guide vane profil kecepatan pada sisi outlet elbow belum sepenuhnya bisa menjadi uniform. Diperlukan jarak tertentu agar profil aliran menjadi uniform kembali. Penambahan guide vane membuat profil kecepatan saat melintasi elbow sesaat uniform, namun setelah menuju outlet elbow keberadaan guide vane juga memberi efek terhadap karakteristik aliran.



**Gambar 2.10 Distribusi profil kecepatan section elbow  $90^\circ$  tanpa dan dengan dua guide vanes (Iswati, 2009)**

**Sutardi dkk (2010)** melakukan penelitian secara eksperimen pada sebuah elbow. Elbow yang digunakan berbentuk *rounded* dan *rectangular* dengan 4 variasi pemasangan guide vane yaitu tanpa guide vane, satu guide vane, dua guide vane, dan tiga guide vane. *Re* aliran yang melalui elbow divariasikan menjadi  $2.1 \times 10^4$ ,  $8.4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^4$ . Hasil yang didapat dari eksperimen adalah, pada *Re* terkecil sebesar  $2.1 \times 10^4$ , penambahan guide vane mengurangi pressure drop. Hal tersebut berbanding terbalik dengan variasi *Re* aliran  $8.4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^4$  dimana terjadi peningkatan pressure drop pada setiap penambahan guide vane. Fakta tersebut terlihat pada gambar 2.11. Selain itu, penambahan guide vane pada setiap variasi *Re* juga berhasil mengurangi turbulansi aliran. Kesimpulan tersebut diambil dengan memperhatikan fenomena pada data *C<sub>p</sub>* sepanjang inner dan outer elbow serta profil kecepatan pada bagian downstream elbow. Perbandingan data kuantitatif pengaruh penambahan guide vane terhadap pressure drop dapat dijelaskan pada tabel 2.1 sebagai berikut:

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

$Re, Dh$	Number of Guide Vanes	$\Delta p$ (N/m <sup>2</sup> )	$\Delta p$ (%)
21000	0	4.01	-
	1	2.67	-33.42%
	2	2.73	-31.92%
	3	2.71	-32.42%
84000	0	36.07	-
	1	37.40	3.69%
	2	51.12	41.72%
	3	74.59	106.79%
120000	0	79.11	-
	1	88.66	12.07%
	2	118.22	49.44%
	3	-	-

## **BAB III**

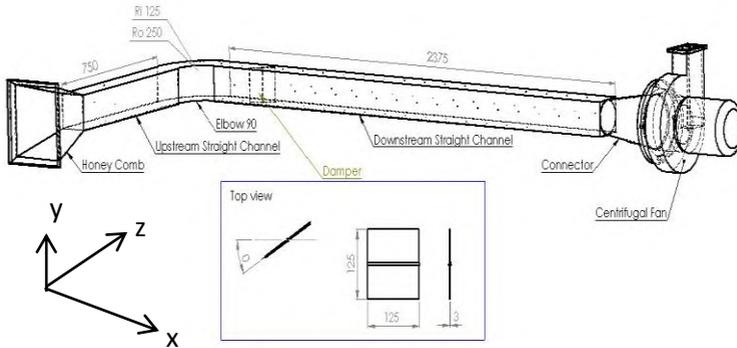
### **METODE PENELITIAN**

Pada bab ini membahas metodologi penelitian meliputi instalasi dan *test section* penelitian, peralatan pendukung penelitian, analisa dimensi, prosedur pengambilan data, serta langkah-langkah dalam pengelolaan data. Metode penelitian yang digunakan, yaitu metode penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square duct* dengan variasi sudut bukaan *damper*  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$  yang diletakkan pada daerah *downstream* pada outlet *elbow*  $90^\circ$   $x/D_h=2$  dengan besar bilangan Reynolds pada sisi *upstream* sebesar  $7,98 \times 10^4$ . *Elbow* yang digunakan dipasang *double guide vanes* di dalamnya.

Data karakteristik aliran yang berupa profil kecepatan aliran diukur pada 16 *section* di daerah *downstream* pada  $Re=7,98 \times 10^4$  dengan variasi bukaan *damper* seperti yang telah disebutkan di atas. Sedangkan untuk *pressure drop* didapatkan dengan cara memvariasikan bukaan *damper* dan bilangan Reynolds dengan cara menaikkan kecepatan inlet secara bertingkat dengan penambahan sebesar 1 m/s dari 5 m/s hingga 12 m/s, atau dari bilangan Reynolds sebesar  $3,99 \times 10^4$  hingga  $9,58 \times 10^4$ .

#### **3.1 Skema Penelitian**

Instansi penelitian berupa benda uji (*test section*) dan peralatan pendukung seperti *nozzle*, *elbow*, *difuser*, *induced fan* dan *connector*. *Damper* dipasang pada saluran *downstream* dengan jarak  $x = 2D_h$  dari outlet *elbow*  $90^\circ$  dengan variasi pembukaan  $\theta = 0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$  (berputar secara *counterclockwise*). Skema instalasi penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.1.

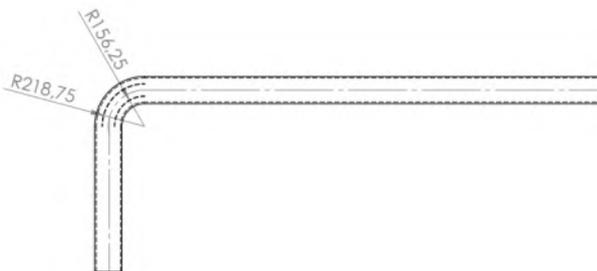


**Gambar 3.1** Skema instalasi penelitian

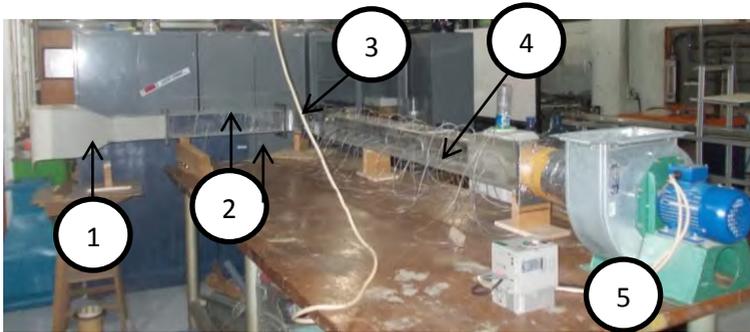
## 3.2 Peralatan Pendukung

### 3.2.1 Square Duct

Penelitian menggunakan *square duct* 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 duct* dan *square elbow 90°* dengan pembuatan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasilnya cukup akurat dan memadai.



**Gambar 3.2** Sketsa *Square Ducting* (Pandangan Atas)



**Gambar 3.3** Instalasi Penelitian

- Keterangan :
1. Nozzle
  2. Saluran Upstream
  3. Square elbow  $90^\circ$  dengan double guide vanes
  4. Saluran Downstream
  5. Centrifugal Fan

Spesifikasi Square Ducting :

- *Bentuk Penampang*: Square duct dengan elbow  $90^\circ$
- *Bahan* : Akrilik
- *Tebal* : 8 mm
- $L_m$  (panjang total garis tengah streamline elbow  $90^\circ$ ): 2973,125 mm
- $l_i$  (panjang total inner searah streamline elbow  $90^\circ$ ) : 3169,375 mm
- $l_o$  (panjang total outer searah streamline elbow  $90^\circ$ ) : 3267,5 mm
- $L_i$  (upstream straight channel) : 750 mm
- $L_o$  (downstream straight channel) : 2125 mm
- $r_m$  (centerline elbow  $90^\circ$  radius) : 187,5 mm
- $r_i$  (inner radius) : 125 mm
- $r_o$  (outer radius) : 250 mm
- $r_{g_1}$  (radius guide vane pertama) : 156,25 mm
- $r_{g_2}$  (radius guide vane kedua) : 218,75 mm

- $a$  (tinggi *damper*) : 125 mm
- $b$  (lebar *damper*) : 125 mm
- $D_h$  (diamater hidrolik) : 125 mm
- $x$  (jarak dari outlet elbow 90° dengan *damper*): 250 mm
- $\alpha$  (variasi bukaan *damper*) : 0°, 10°, 20°, 30°

### 3.2.2. Centrifugal Fan

Pada penelitian ini digunakan 1 buah *centrifugal fan* (gambar 3.4) dengan spesifikasi sebagai berikut:



**Gambar 3.4 (a) Centrifugal blower, (b) Inverter**

- Merk : ElexMax Three-Phase Asynchronous Motor
- Type : 71M4 – 4 B3
- No : 0221
- Voltage : 220 / 380 Voltage
- Frekuensi : 50 Hz
- Daya : 0,75 KW
- Putaran : 1350 RPM
- Berat : 8,7 kg

### 3.2.3. Nozzle dan Honey Comb

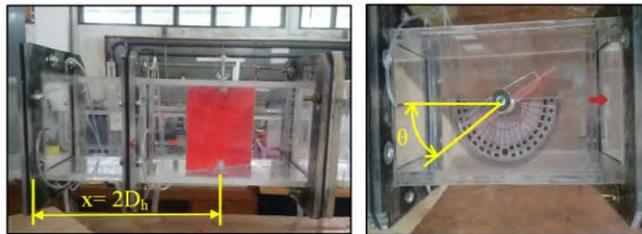
*Nozzle* berfungsi untuk menambah kecepatan aliran sebelum memasuki *test suction*. Didalam *nozzle* terdapat *honeycomb* yang berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati uniform dan mengurangi turbulensi aliran ketika memasuki instalasi *test suction*.



**Gambar 3.5** *Nozzle dan Honey Comb*

### 3.2.4. Damper

Dalam eksperimen ini, instalasi saluran udara dipasang bodi pengganggu berupa *butterfly valve* yang terletak pada jarak  $x/D = 2$  sesudah outlet *elbow*  $90^\circ$ . Bentuk damper adalah *square* yang menyesuaikan dengan dimensi hidrolis ( $D_h$ ).



**Gambar 3.6** *Damper*

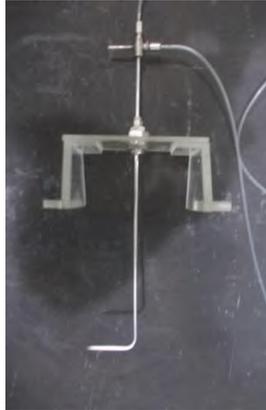
### 3.2.5. Alat Ukur

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

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

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

## 2. Pitot Static Tube



**Gambar 3.7 Pitot Static Tube**

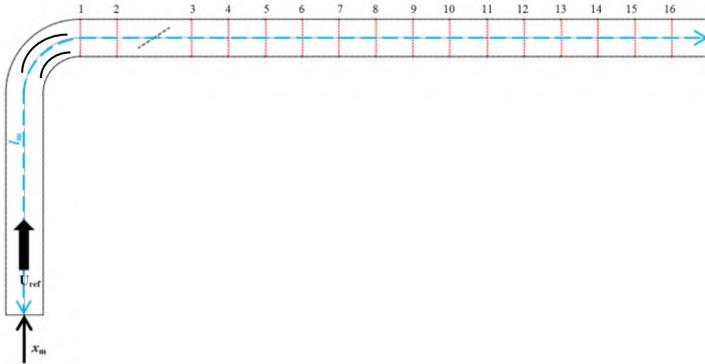
Alat ini berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis sekaligus tekanan stagnasi aliran fluida yang terdapat pada saluran maupun yang terletak dibelakang benda uji. Pergeseran titik pengukuran secara horizontal pada setiap *cross section* yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran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

*Wall pressure tap* dipasang sepanjang saluran *downstream* mulai dari *outlet elbow 90°* pada setiap dinding saluran yang disusun secara paralel pada masing-masing *test section* yang berjarak 125 mm (kecuali pada titik posisi damper). Berikut ini merupakan tabel dan gambar untuk memperjelas posisi pengambilan profil kecepatan.

**Tabel 3.1** Lokasi perhitungan profil kecepatan

Section	$x_m$ (mm)	$x_m/l_m$		Section	$x_m$ (mm)	$x_m/l_m$
1	937,5	0,31		9	2062,5	0,67
2	1062,5	0,35		10	2187,5	0,71
3	1312,5	0,43		11	2312,5	0,76
4	1437,5	0,47		12	2437,5	0,80
5	1562,5	0,51		13	2562,5	0,84
6	1687,5	0,55		14	2687,5	0,88

7	1812,5	0,59		15	2812,5	0,92
8	1937,5	0,63		16	2937,5	0,96



**Gambar 3.8** Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan

### 3. Transducer Tekanan dan Data Akuisisi



(a)



(b)

**Gambar 3.9 (a) DAQ PRO 5300, (b) Differential Pressure Transmitter**

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

- 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*, koefisien losses elbow 90° dan koefisien losses damper

Model	: PX653 - 03D5V
Range	: ± 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  $\Delta h$ . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10.



**Gambar 3.10** *Inclined Manometer*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Kerosene* (SG = 0,827)

- Kemiringan :  $15^\circ$

### 3.3 Analisis Dimensi Parameter-Parameter yang Dianalisis

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

- $\Delta p$  : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi ( $\text{N/m}^2$ )
- $\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  : viskositas absolut fluida ( $\text{kg/(m.s)}$ )
- $U_{ref}$  : kecepatan *freestream* di *inlet upstream straight channel* (m/s)
- $u$  : kecepatan local (m/s)
- $a$  : tinggi *damper* (m)
- $b$  : lebar *damper* (m)
- $r_m$  : mean radius *elbow*  $90^\circ$  (m)
- $r_i$  : *inner radius elbow*  $90^\circ$  (m)
- $r_o$  : *outer radius elbow*  $90^\circ$  (m)
- $r_{g_1}$  : radius *guide vane* pertama (m)
- $r_{g_2}$  : radius *guide vane* kedua (m)
- $l_i$  : panjang total *inner* searah *streamline elbow*  $90^\circ$  (m)
- $l_o$  : panjang total *outer* searah *streamline elbow*  $90^\circ$  (m)
- $D_h$  : diameter hidrolis saluran (m)
- $L_i$  : panjang *upstream straight channel* (m)
- $L_o$  : panjang *downstream straight channel* (m)
- $x$  : sumbu koordinat x instalasi (m)
- $y$  : sumbu koordinat y instalasi (m)
- $z$  : sumbu koordinat z instalasi (m)
- $\theta$  : sudut bukaan *damper*

### 3.3.1 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Koefisien Tekanan pada Square Ducting

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

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_{ref}, a, b, r_m, r_i, r_o, r_{g_1}, r_{g_2}, x_i, x_o, l_i, l_o, L_i, L_o, D_h, x, y, z, \theta) \quad (3.1)$$

Dipilih *repeating parameter* ( $m=r=3$ ) dari parameter berdimensi , yaitu  $\rho, U_{ref}$  dan  $D_h$ . Dari analisa dimensi akan diperoleh 17 grup tak berdimensi ( $n-m=15$ ) pada *dependent variable*  $\Delta p$  dengan menggunakan *Buckingham Pi-theorema*, maka diperoleh 17 grup tak dimensi yaitu:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}; \Pi_2 = \frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}; \Pi_3 = \frac{r_m}{D_h}; \Pi_4 = \frac{r_i}{D_h}; \Pi_5 = \frac{r_o}{D_h}; \Pi_6 = \frac{r_{g_1}}{D_h}; \\ \Pi_7 &= \frac{r_{g_2}}{D_h}; \Pi_8 = \frac{l_i}{D_h}; \Pi_9 = \frac{l_o}{D_h}; \Pi_{10} = \frac{L_i}{D_h}; \Pi_{11} = \frac{L_o}{D_h}; \Pi_{12} = \frac{a}{D_h}; \Pi_{13} = \frac{b}{D_h}; \\ \Pi_{14} &= \frac{x}{D_h}; \Pi_{15} = \frac{y}{D_h}; \Pi_{16} = \frac{z}{D_h}; \Pi_{17} = \theta \end{aligned}$$

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\bullet \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}, \Pi_{14}, \Pi_{15}, \Pi_{16}, \Pi_{17}) \quad (3.2)$$

$$\bullet \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_1 \left( \frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}, \frac{r_m}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta \right) \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini variabel berikut bernilai konstan  $\frac{r_m}{D_h}$

,  $\frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}$  dan  $\frac{z}{D_h}$ , sehingga:

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

Dan untuk koefisien pressure ( $C_p$ ) pada *square duct* adalah sebagai berikut :

$$C_p = f_2 \left( \frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}, \theta \right) \quad (3.5)$$

### 3.3.2 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada Square Duct

*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 :

$$u = f(\rho, \mu, U_{ref}, a, b, r_m, r_i, r_o, r_{g_1}, r_{g_2}, x_i, x_o, l_i, l_o, L_i, L_o, D_h, x, y, z, \theta) \quad (3.6)$$

Dipilih *repeating parameter* ( $m=r=3$ ) dari parameter berdimensi , yaitu  $\rho, U_{ref}$  dan  $D_h$ . Dari analisa dimensi akan diperoleh 17 grup tak berdimensi ( $n-m = 15$ ) *dependent variable*  $u$  sebagai dengan menggunakan *Buckingham Pi-theorema*, maka diperoleh 17 grup tak dimensi yaitu : Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}; \Pi_2 = \frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}; \Pi_3 = \frac{r_m}{D_h}; \Pi_4 = \frac{r_i}{D_h}; \Pi_5 = \frac{r_o}{D_h}; \Pi_6 = \frac{r_{g_1}}{D_h}; \\ \Pi_7 &= \frac{r_{g_2}}{D_h}; \Pi_8 = \frac{l_i}{D_h}; \Pi_9 = \frac{l_o}{D_h}; \Pi_{10} = \frac{L_i}{D_h}; \Pi_{11} = \frac{L_o}{D_h}; \Pi_{12} = \frac{a}{D_h}; \Pi_{13} = \frac{b}{D_h}; \\ \Pi_{14} &= \frac{x}{D_h}; \Pi_{15} = \frac{y}{D_h}; \Pi_{16} = \frac{z}{D_h}; \Pi_{17} = \theta \end{aligned}$$

$$\bullet \Pi_1 = f_i(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}, \Pi_{14}, \Pi_{15}, \Pi_{16}, \Pi_{17}) \quad (3.7)$$

$$\bullet \frac{u}{U_{ref}} = f_3 \left( \frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}, \frac{r_m}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta \right) \quad (3.8)$$

Pada penelitian ini variabel bernilai konstan  $\frac{r_m}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r_{g_1}}{D_h}, \frac{r_{g_2}}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}$  dan  $\frac{x}{D_h}$ , sehingga:

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_3 \left( \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta \right) \quad (3.9)$$

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

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_4 \left( \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta \right) \quad (3.10)$$

### 3.4 Langkah-Langkah Validasi

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

#### 3.4.1 Alat yang digunakan

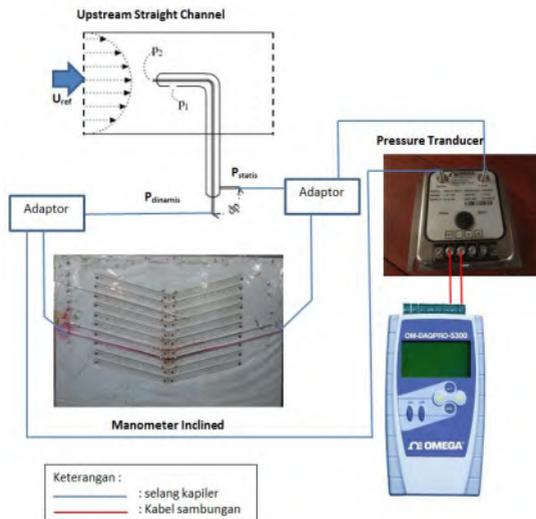
**Peralatan yang dipergunakan pada proses kalibrasi:**

- Manometer
- Pressure Transducer
- Data Aquisisi DAQ PRO 5300
- Pitot Tube

#### 3.4.2 Validasi Tekanan Dinamis

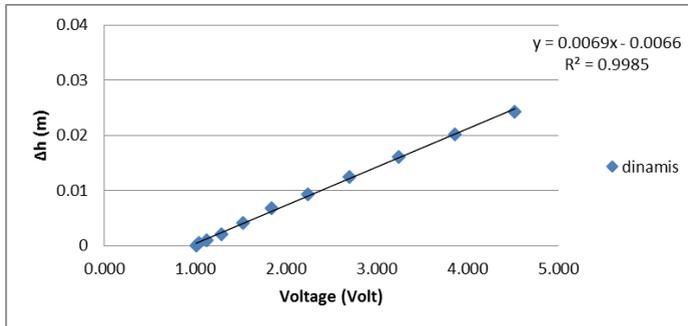
Berikut ini merupakan langkah untuk melakukan kalibrasi untuk mengukur tekanan dinamis:

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* dengan pembukaan sudut damper  $0^\circ$ .
2. *Pitot static tube* dipasang pada dinding yang tersambung pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer* untuk tekanan dinamik.
5. Dari *manometer* didapatkan  $\Delta h$  (mm) dan dari data aquisisi didapatkan *Voltage (Volt)*
6. Data-data tersebut dibuat grafik  $\Delta h$  *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



**Gambar 3.11 Validasi Tekanan Dinamis**

Setelah melakukan validasi, maka akan didapat grafik perbedaan ketinggian fungsi tegangan listrik seperti pada Gambar 3.12. Perbedaan tekanan tersebut digunakan untuk menghitung tekanan dinamis yang terjadi lalu menghitung kecepatan lokal dari tekanan dinamis tersebut sehingga dengan menggunakan pressure transducer yang dapat mengukur tekanan dengan output data berupa voltage, dapat diketahui kecepatan lokal yang terjadi.

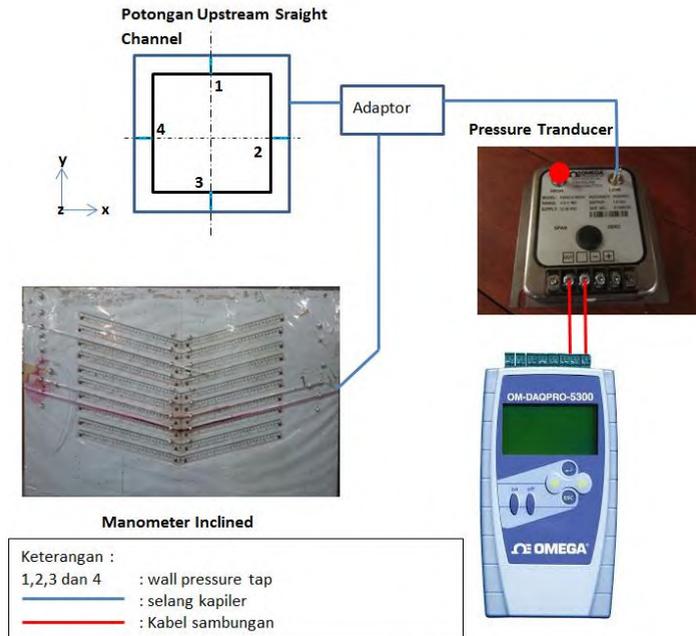


**Gambar 3.12 Validasi Tekanan Dinamis dengan Sudut Bukan Dampar 10°**

### 3.4.3 Validasi Tekanan Dinding

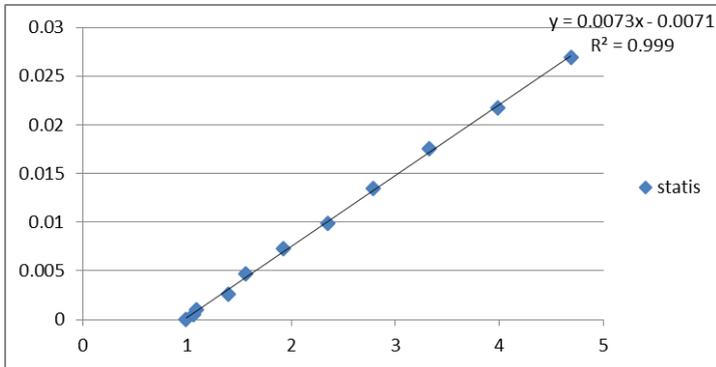
Berikut ini merupakan langkah untuk melakukan kalibrasi untuk mengukur tekanan dinamis:

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* dengan pembukaan sudut dampar 0°.
2. *Wall pressure tap* pada tiap sisi *test section* disatukan dan disambung pada *manometer* dan *transducer*. Data yang diperoleh merupakan tekanan rata-rata dari 4 sisi *test section*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer* untuk tekanan statis dinding.
5. Dari *manometer* didapatkan  $\Delta h$  (mm) dan dari data aquisisi didapatkan *Voltage (Volt)*.
6. Data-data tersebut dibuat grafik  $\Delta h$  *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



### Gambar 3.13 Validasi Tekanan Statis

Setelah melakukan validasi, maka akan didapat grafik perbedaan ketinggian fungsi tegangan listrik seperti pada Gambar 3.14. Perbedaan tekanan tersebut digunakan untuk menghitung tekanan statis yang terjadi, dengan menggunakan *pressure tranducer* yang dapat mengukur tekanan dengan output data berupa voltage, dapat diketahui tekanan statis yang terjadi.



**Gambar 3.14 Validasi Tekanan Statis dengan Sudut Bukaan Dampier 10°**

### 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) Persiapan *test section*.
- b) Pemasangan *pitot tube* pada posisi yang ingin diukur.
- c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan menggunakan selang kapiler.
- d) Posisi *pitot tube* diatur pada titik awal pengukuran pada jarak  $x_m/l_m = 0.31$  dan pada jarak  $r_o/b_x \approx 1$  artinya ujung *pitot tube* sebisa mungkin di dekatkan pada *dinding outer inlet*.
- e) Pengaturan bukaan *blower* sesuai kebutuhan.
- f) *Voltage* dari *pressure transducer* pada tekanan stagnasi pada dicatat.

- g) *Blower* dimatikan
- h) Pitot tube digeser searah horisontal mendekati sisi inner duct.
- i) Mengulangi langkah e sampai f hingga titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.

Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:

- a) Persiapan *test section*.
- b) Penghubungan *pressure tap* yang sudah terpasang di dinding ke *pressure transducer* dengan selang kapiler.
- c) Pengaturan bukaan *blower* sesuai kecepatan *free stream* yang akan di-set.
- 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* selanjutnya.
- f) Langkah c). sampai f). diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi  $16D_h$  dari *inlet downstream straight channel*.

### 3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif

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

- Diameter hidrolik ( $D_h$ ) : 125 mm
- Panjang *downstream straight channel* : 2125 mm
- Panjang *inlet upstream* sampai *downstream*  
     *inner wall* ( $l_i$ ) : 3169,375 mm  
     *Outer wall* ( $l_o$ ) : 3267,5 mm
- Sudut *inclined manometer* ( $\theta$ ) :  $15^\circ$
- *Specific Gravity red oil* ( $SG_{redoil}$ ) : 0,827
- Percepatan Gravitasi ( $g$ ) :  $9,81 \text{ m/s}^2$
- Temperatur ruangan dianggap konstan ( $T$ ) :  $28^\circ\text{C}$
- Massa jenis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$  ( $\rho_{ud}$ ) :  $1,182 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas kinematis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$  ( $\nu$ ) :  $1,59 \times$

$$10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Massa jenis air pada  $T = 28^\circ\text{C}$  ( $\rho_{H2O}$ ) :  $996,4 \text{ kg/m}^3$

### 1) Perhitungan untuk Reynolds Number

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynolds* yang didapat melalui persamaan 3.11 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada kecepatan 10 m/s.

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

Dimana:

- $\rho_{ud}$  : massa jenis udara
- $\nu$  : viskositas kinematis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$
- $\mu$  : viskositas absolut udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$
- $U_{ref}$  : kecepatan freestream pada *inlet upstream straight channel*
- $D_h$  : diameter
- hidrolik ducting

*Fan* yang digunakan pada eksperimen ini adalah *centrifugal fan*. Untuk mendapatkan kecepatan awal ( $U_{ref}$ ) sebesar 10 m/s dilakukan pengaturan frekuensi pada inverter secara manual. Dengan kalibrasi validasi tekanan dinamik pada saluran upstream straight channel melalui inclined manometer untuk pengukuran nilai  $\Delta h$ . Nilai  $\Delta h$  diukur dari frekuensi 0 Hz sampai 50 Hz sehingga akan mendapatkan frekuensi dengan nilai  $\Delta h$  pada kecepatan udara masuk 10 m/s. Pengukuran kecepatan aliran masuk menggunakan persamaan 3.12 sebagai berikut:

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

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 = SG_{redoil} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$U_{ref}^2 = \frac{2 \cdot SG_{redoil} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta h}{\rho_{udara}}$$

$$U_{ref} = \sqrt{\frac{2.5G_{red\ oil} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h}{\rho_{udara}}} \quad (3.13)$$

## 2) Perhitungan kecepatan lokal

Profil kecepatan diukur pada 16 test section sepanjang *downstream straight channel* dengan variasi pembukaan sudut damper. Perhitungan profil kecepatan pada setiap *section* sepanjang *downstream straight channel* ditulis sesuai persamaan 3.14 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{udara}}} \quad (3.14)$$

dimana:

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

## 3) Perhitungan Pressure Drop ( $\Delta p$ )

*Pressure drop* adalah selisih tekanan *inlet* pada *upstream straight channel* (dengan jarak  $x/D_h=2$  dari *inlet upstream straight channel*) dan *outlet* pada *downstream straight channel (section 16)*. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir sama. Perhitungan  $p_{inlet}$  dan  $p_{outlet}$  adalah sebagai berikut :

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (3.15)$$

*Pressure drop* pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi Reynolds number pada masing-masing variasi sudut damper.

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

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *dampner* pada jarak  $2D_h$  dari *outlet elbow 90°*. Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan *koefisien losses elbow 90°* pada saluran. *Koefisien losses elbow 90°* adalah nilai konstanta yang yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah *elbow 90°* pada sebuah saluran udara. Pada eksperimen ini, *koefisien losses elbow 90°* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* (*section 1*)

$$P_1 - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ} = K_{elbow\ 90^\circ} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.16)$$

$$K_{elbow\ 90^\circ} = \frac{(P_1 - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.17)$$

- dimana  $P_1$  : Tekanan pada *outlet elbow 90°* (*section 1*) ( $N/m^2$ )  
 :  
 $P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}$  : Tekanan pada *inlet elbow 90°* ( $N/m^2$ )  
 $\bar{V}^2$  : Kecepatan udara masuk pada upstream ( $m/s$ )  
 $\rho_{udara}$  : massa jenis udara pada  $28^\circ C$  ( $kg/m^3$ )  
 $K_{elbow\ 90^\circ}$  : *koefisien losses elbow 90°*

*Koefisien losses elbow 90°* pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi sudut bukaan *dampner*  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  dan  $30^\circ$ .

### 5) Perhitungan Koefisien Losses Damper ( $K_{damper}$ )

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *dampner* pada jarak  $2D_h$  dari *outlet elbow 90°*. Pemasangan dampner akan mengakibatkan *koefisien losses dampner* pada saluran. *Koefisien losses dampner* adalah nilai konstanta yang yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah dampner. Pada eksperimen ini, *koefisien losses dampner* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet* sebelum *dampner* (*section 2*) dan sesudah *dampner* (*section 3*).

$$P_3 - P_2 = K_{damper} \frac{\bar{v}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.18)$$

$$K_{damper} = \frac{(P_3 - P_2) \times 2}{\bar{v}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.19)$$

- dimana  $P_2$  : Tekanan pada *downstream* (*section 2*) ( $N/m^2$ )  
 :  
 $P_3$  : Tekanan pada *downstream* (*section 3*) ( $N/m^2$ )  
 $\bar{v}^2$  : Kecepatan udara masuk pada upstream ( $m/s$ )  
 $\rho_{udara}$  : massa jenis udara pada  $28^\circ C$  ( $kg/m^3$ )  
 $K_{damper}$  : *koefisien losses dampner*

*Koefisien losses dampner* pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi sudut bukaan dampner  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  dan  $30^\circ$ .

### 3.6 Urutan Langkah Penelitian

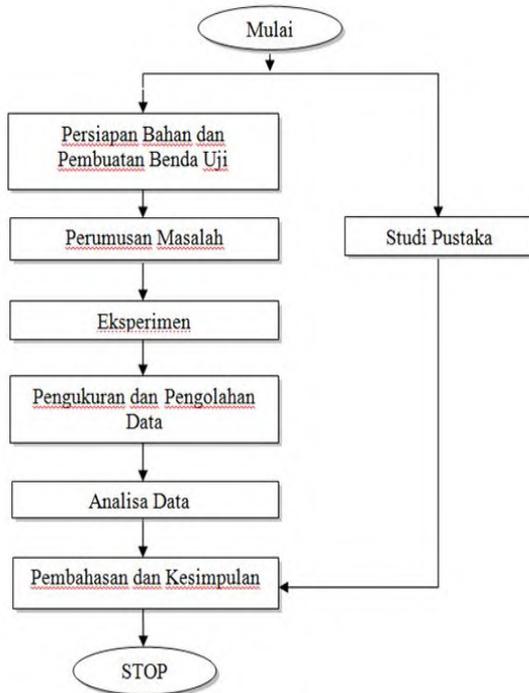
Pada tabel 3.2 dijelaskan urutan langkah penelitian yang akan dilakukan. Urutan langkah penelitian adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.2** Urutan langkah penelitian

	Profil Kecepatan	Pressure Drop
1.	Mempersiapkan peralatan sesuai dengan instalasi penelitian	Mempersiapkan peralatan sesuai dengan instalasi penelitian
2.	Damper dipasang dengan sudut $\theta_1 = 0^\circ$ ( <i>fully open</i> )	Damper dipasang dengan sudut $\theta_1 = 0^\circ$ ( <i>fully open</i> )
3.	Menghidupkan <i>induced draft fan</i>	Menghidupkan <i>induced draft fan</i>
4.	Kecepatan pada inlet 10 m/s dengan <i>Reynolds Number</i> ( $Re_{Dh}$ ) $7,88 \times 10^4$	Kecepatan inlet 5-12 m/s dengan interval 1 m/s yang memiliki variasi <i>Reynolds Number</i> ( $Re_{Dh}$ ) $3,94 \times 10^4$ , $4,73 \times 10^4$ , $5,52 \times 10^4$ , $6,3 \times 10^4$ , $7,09 \times 10^4$ , $7,88 \times 10^4$ , $8,67 \times 10^4$ , $9,46 \times 10^4$
5.	Menghitung profil kecepatan dari pengukuran tekanan dinamis dengan pitot tube pada 16 <i>sections</i> sepanjang <i>downstream</i> dengan setiap <i>section</i> terdapat 17 titik pengambilan data	Menghitung <i>Pressure Drop</i> dari pengukuran tekanan statis dengan <i>wall pressure tap</i> pada posisi $P_{inlet}$ dan $P_{outlet}$
6.	Pengolahan data hingga didapatkan grafik profil kecepatan pada setiap <i>section</i>	Pengolahan data hingga didapatkan grafik <i>pressure drop vs</i> $Re_{Dh}$
7.	Ulangi langkah 2-6 dengan variasi sudut bukaan damper $10^\circ$ , $20^\circ$ , hingga $30^\circ$	Ulangi langkah 2-6 dengan variasi sudut bukaan damper $10^\circ$ , $20^\circ$ , hingga $30^\circ$

#### 3.6.1 Flowchart Penelitian

Gambar 3.13 merupakan *flowchart* dari urutan langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan.



**Gambar 3.15** *Flowchart* penelitian



## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas pengolahan data yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan beserta analisisnya, yaitu meliputi data profil kecepatan tiap *section* secara horizontal, profil kecepatan tiap *section* secara vertikal, dan *pressure drop* dengan variasi bilangan Reynolds. Berikut ini merupakan hasil dari studi eksperimen yang telah dilakukan.

### 4.1. Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya $0^\circ$ Dengan Tanpa Damper Saat $Re = 7,87 \times 10^4$

Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ), dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada titik *section* tersebut yang didapatkan dari hasil pengolahan data yang didapat dari pengukuran menggunakan pitot dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan masuk pada saluran *upstream* yang telah ditentukan, yaitu 10 m/s. Berikut ini merupakan profil kecepatan saluran *downstream* yang diukur secara horizontal.

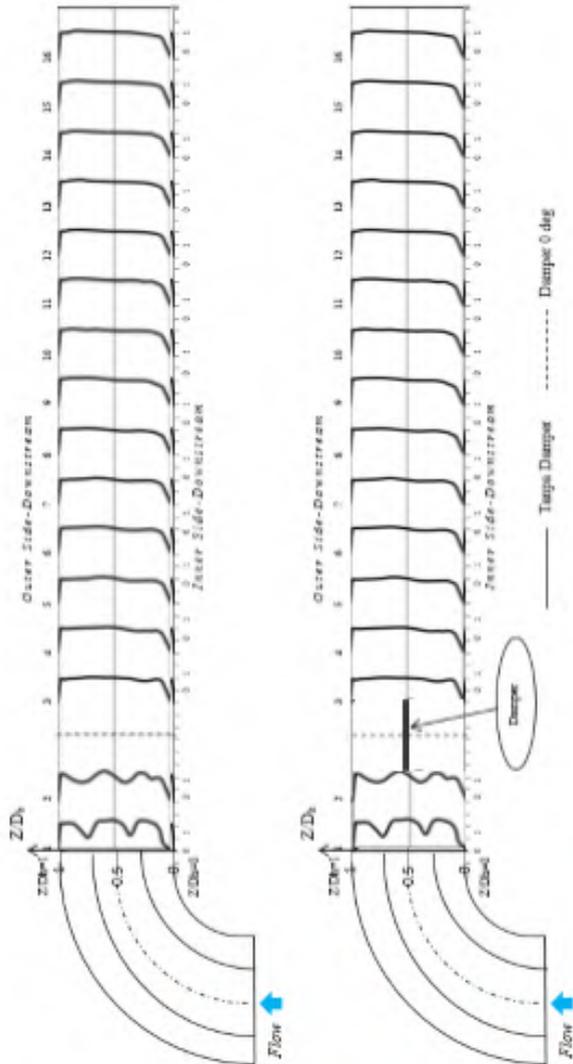
Gambar berikut merupakan profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal tiap *section* pada bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper*, dengan sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Z/D_h$  untuk bidang horizontal, dimana nilai  $Z/D_h=0$  merupakan sisi *inner* dan  $Z/D_h=1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan untuk bidang vertikal, sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Y/D_h$  dimana nilai  $Y/D_h = 0$  merupakan sisi *inner* dan  $Y/D_h = 1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan sumbu  $x$  grafik profil kecepatan adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref}=1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut. Dimana nilai  $Y/D_h=0$  merupakan sisi *lower* dan  $Y/D_h=1$  merupakan sisi *upper*. Sumbu  $x$  grafik profil kecepatan horizontal dan vertikal adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref}=1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut yang telah mengalami *recovery* aliran.

Perbedaan profil kecepatan yang terjadi pada aliran dengan bukaan *damper*  $0^\circ$  dengan tanpa *damper* terlihat tidak terlalu signifikan jika dilihat secara keseluruhan. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, kedua profil kecepatan pada *section* 1 (*outlet elbow*) untuk bidang horizontal dan vertikal terlihat sama dan tidak menunjukkan adanya *backflow*. Hal ini berarti profil kecepatan aliran yang melewati *elbow* memiliki karakteristik yang mirip untuk instalasi yang memasang *damper*  $0^\circ$  dengan tanpa *damper*.

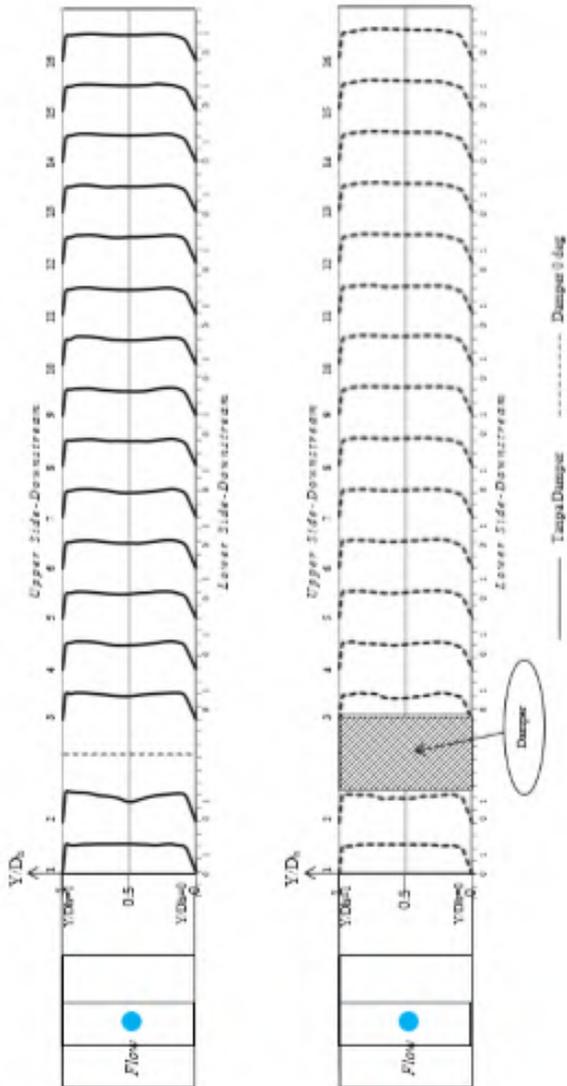
Pada *section* 3 bidang horizontal, hanya sedikit perbedaan profil kecepatan yaitu pada  $Z/D_h=0,5$  merupakan tempat *downstream damper* sehingga lokasi tersebut memiliki profil kecepatan yang lebih rendah daripada instalasi tanpa *damper*. Dari *section* 11 hingga akhir instalasi, profil kecepatan tanpa *damper* dengan sudut bukaan  $0^\circ$  sudah terlihat sama dan keduanya hampir mengalami *recovery* aliran setelah melewati hambatan.

Pada *section* 3 bidang vertikal, terlihat lebih jelas adanya defisit aliran pada daerah di sekitar  $Y/D_h=0,5$  pada instalasi yang terpasang *damper*. Hal ini disebabkan oleh tidak mampunya aliran untuk mengikuti kontur bodi sehingga terjadi separasi aliran setelah meninggalkan *damper* dan pada *section* tersebut terjadi sedikit keterlambatan aliran.

Dari penjelasan data eksperimen di atas, dapat dianalisis bahwa penambahan *guide vane* dapat mengurangi *separation loss* aliran yang terjadi pada *outlet elbow* karena dari fenomena yang ada tidak terdapat *backflow*. Lalu dengan pemasangan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* tidak menunjukkan perubahan profil kecepatan yang signifikan. Kedua aliran baik dari bidang vertikal maupun horizontal pada akhir *section* instalasi ini sudah terlihat mirip dan mendekati keadaan *recovery*. Perbedaan yang jelas terlihat pada aliran setelah melewati *damper* karena terdapat sedikit keterlambatan aliran karena adanya *separation loss*.



**Gambar 4.1** Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper*  $0^\circ$



**Gambar 4.2** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada downstream tanpa damper dan sudut damper  $0^\circ$

#### 4.2. Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya $10^\circ$ Dengan Tanpa Damper Saat $Re = 7,87 \times 10^4$

Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ), dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada titik *section* tersebut yang didapatkan dari hasil pengolahan data yang didapat dari pengukuran menggunakan pitot dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan masuk pada saluran *upstream* yang telah ditentukan, yaitu 10 m/s. Berikut ini merupakan profil kecepatan saluran *downstream* yang diukur secara horizontal.

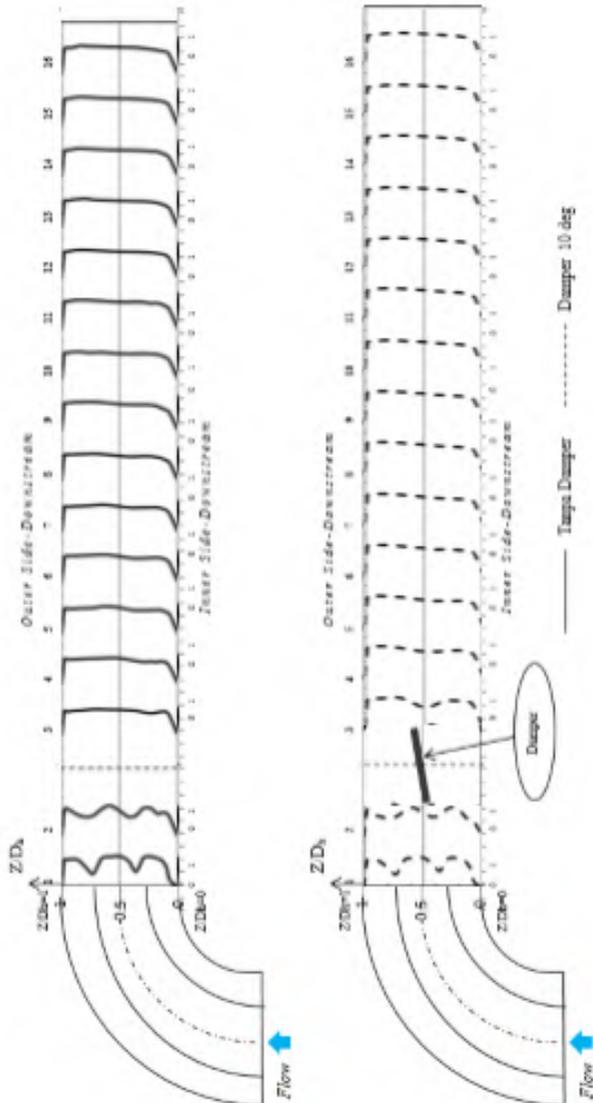
Gambar berikut merupakan profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal tiap *section* pada bukaan *damper*  $10^\circ$  dan tanpa *damper*, dengan sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Z/D_h$  untuk bidang horizontal, dimana nilai  $Z/D_h=0$  merupakan sisi *inner* dan  $Z/D_h=1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan untuk bidang vertikal, sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Y/D_h$  dimana nilai  $Y/D_h =0$  merupakan sisi *inner* dan  $Y/D_h =1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan sumbu  $x$  grafik profil kecepatan adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref}=1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut. Dimana nilai  $Y/D_h=0$  merupakan sisi *lower* dan  $Y/D_h=1$  merupakan sisi *upper*. Sumbu  $x$  grafik profil kecepatan horizontal dan vertikal adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref} =1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut yang telah mengalami *recovery* aliran.

Perbedaan profil kecepatan yang terjadi pada aliran dengan bukaan *damper*  $10^\circ$  dengan tanpa *damper* juga terlihat tidak terlalu signifikan jika dilihat secara keseluruhan. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, kedua profil kecepatan pada *section 1 (outlet elbow)* untuk bidang horizontal dan vertikal terlihat sama dan tidak menunjukkan adanya *backflow*. Hal ini berarti profil kecepatan aliran yang melewati *elbow* memiliki karakteristik yang mirip untuk instalasi yang memasang *damper*  $10^\circ$  dengan tanpa *damper*.

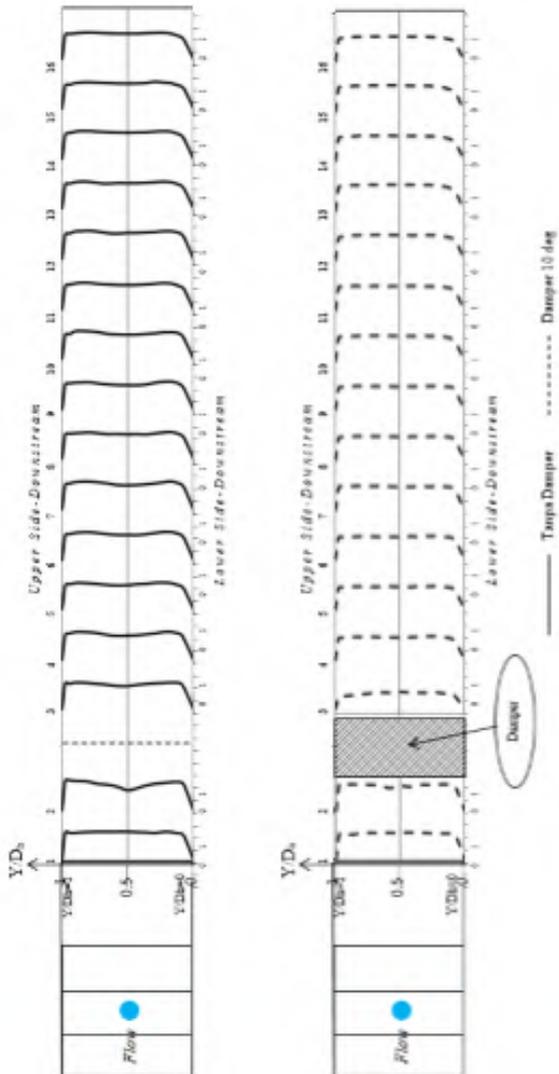
Pada *section 3* bidang horizontal, perbedaan profil kecepatan mulai terlihat berbeda yaitu pada  $Z/D_h=0,5$  yang merupakan tempat *downstream damper* sehingga lokasi tersebut memiliki profil kecepatan yang lebih rendah daripada instalasi tanpa *damper*. Dari *section 11* hingga akhir instalasi, profil kecepatan tanpa *damper* dengan sudut bukaan  $0^\circ$  sudah terlihat sama dan keduanya hampir mengalami *recovery* aliran setelah melewati hambatan.

Pada *section 2* bidang vertikal, terlihat aliran yang melewati saluran yang dipasang *damper* lebih sedikit terjadi defisit profil kecepatan dibandingkan dengan instalasi tanpa *damper*. Namun pada *section 3*, aliran banyak mengalami defisit dari *upper* hingga *lower wall* karena ketidakmampuan aliran untuk mengikuti kontur bodi sehingga terjadi separasi aliran setelah meninggalkan *damper* dan pada *section* tersebut terjadi keterlambatan aliran.

Dari penjelasan data eksperimen di atas, dapat dianalisis bahwa penambahan *guide vane* masih dapat mengurangi *separation loss* aliran yang terjadi pada *outlet elbow* karena dari fenomena yang ada tidak terdapat *backflow*. Lalu dengan pemasangan *damper*  $10^\circ$  dan tanpa *damper* mulai menunjukkan perubahan profil kecepatan. Kedua aliran baik dari bidang vertikal maupun horizontal pada akhir *section* instalasi ini sudah terlihat mirip dan mendekati keadaan *recovery*. Perbedaan yang jelas terlihat pada aliran setelah melewati *damper* karena terdapat keterlambatan aliran karena adanya *separation loss*.



**Gambar 4.3** Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada downstream tanpa damper dan sudut damper  $10^\circ$



**Gambar 4.4** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 10°

#### 4.3. Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya *Damper* 20° Dengan Tanpa *Damper* Saat $Re = 7,87 \times 10^4$

Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ), dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada titik *section* tersebut yang didapatkan dari hasil pengolahan data yang didapat dari pengukuran menggunakan pitot dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan masuk pada saluran *upstream* yang telah ditentukan, yaitu 10 m/s. Berikut ini merupakan profil kecepatan saluran *downstream* yang diukur secara horizontal.

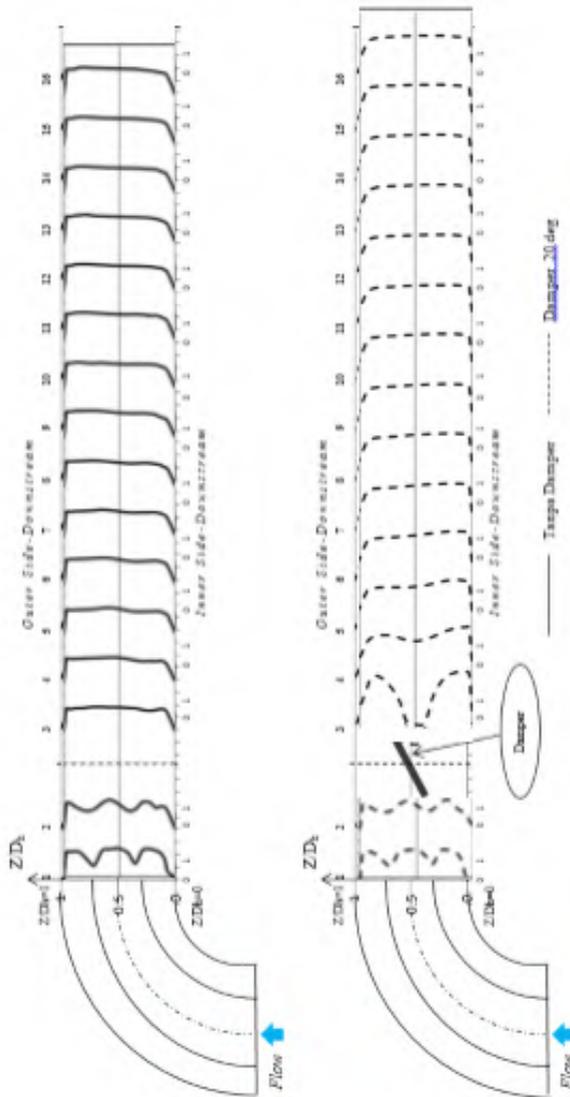
Gambar berikut merupakan profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal tiap *section* pada bukaan *damper* 20° dan tanpa *damper*, dengan sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Z/D_h$  untuk bidang horizontal, dimana nilai  $Z/D_h=0$  merupakan sisi *inner* dan  $Z/D_h=1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan untuk bidang vertikal, sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Y/D_h$  dimana nilai  $Y/D_h =0$  merupakan sisi *inner* dan  $Y/D_h =1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan sumbu  $x$  grafik profil kecepatan adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref}=1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut. Dimana nilai  $Y/D_h=0$  merupakan sisi *lower* dan  $Y/D_h=1$  merupakan sisi *upper*. Sumbu  $x$  grafik profil kecepatan horizontal dan vertikal adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref}=1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut yang telah mengalami *recovery* aliran.

Perbedaan profil kecepatan yang terjadi pada aliran dengan bukaan *damper* 20° dengan tanpa *damper* sudah terlihat berbeda. Namun berdasarkan eksperimen yang dilakukan, kedua profil kecepatan pada *section* 1 (*outlet elbow*) untuk bidang horizontal dan vertikal tetap terlihat sama dan tidak menunjukkan adanya *backflow*. Hal ini berarti profil kecepatan aliran yang melewati *elbow* memiliki karakteristik yang mirip untuk instalasi yang memasang *damper* 20° dengan tanpa *damper*.

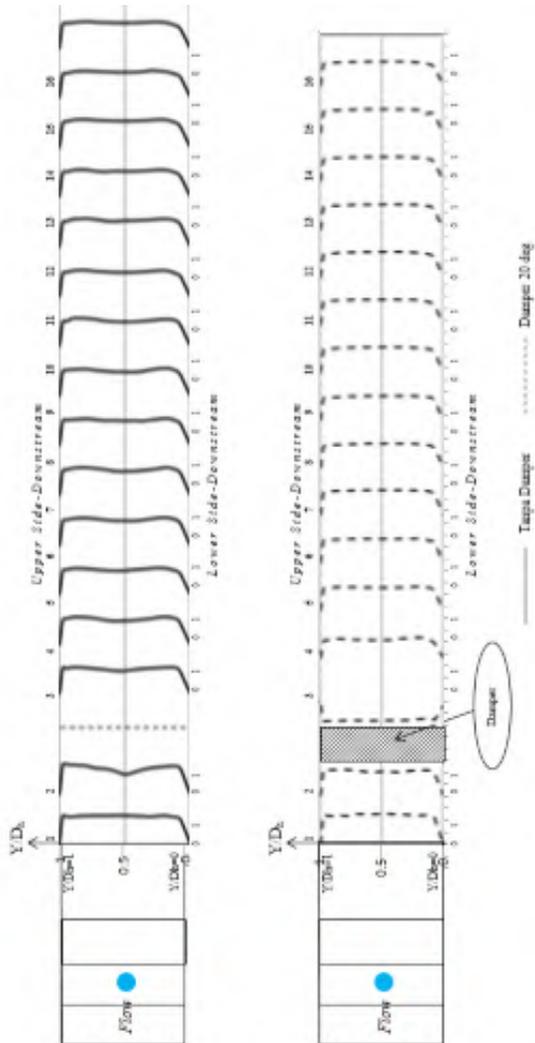
Pada *section 3* bidang horizontal, perbedaan profil kecepatan mulai terlihat berbeda yaitu pada  $Z/D_h$  dari 0,416 hingga 0,64 sudah terlihat *backflow* yang cukup besar dengan  $u/U_{Ref}$  paling rendah sebesar -0,56. Namun *backflow* tidak berlangsung panjang, pada *section 4* sudah tidak terjadi *backflow*. Dari *section 11* hingga akhir instalasi, profil kecepatan tanpa *damper* dengan sudut bukaan  $20^\circ$  sudah terlihat sama dan keduanya hampir mengalami *recovery* aliran setelah melewati hambatan.

Pada *section 2* bidang vertikal, terlihat aliran yang melewati saluran yang dipasang *damper* lebih sedikit terjadi defisit profil kecepatan dibandingkan dengan instalasi tanpa *damper*. Namun pada *section 3*, seluruh aliran dari *upper* hingga *lower wall* terlihat adanya *backflow* karena aliran tidak mampu mengikuti kontur bodi sehingga terjadi separasi aliran setelah meninggalkan *damper* dan pada *section* tersebut terjadi keterlambatan aliran.

Dari penjelasan data eksperimen di atas, dapat dianalisis bahwa penambahan *guide vane* masih dapat mengurangi *separation loss* aliran yang terjadi pada *outlet elbow* karena dari fenomena yang ada tidak terdapat *backflow*. Lalu dengan pemasangan *damper*  $20^\circ$  dan tanpa *damper* sudah menunjukkan perubahan profil kecepatan. Kedua aliran baik dari bidang vertikal maupun horizontal pada akhir *section* instalasi ini sudah terlihat mirip dan mendekati keadaan *recovery*. Perbedaan yang jelas terlihat pada aliran setelah melewati *damper* karena terdapat keterlambatan aliran karena adanya *separation loss*.



**Gambar 4.5** Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada downstream tanpa damper dan sudut damper  $20^\circ$



**Gambar 4.6** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream* tanpa *damper* dan sudut *damper* 20°

#### 4.4. Perbandingan Profil Kecepatan Pada Sudut Bukaannya *Damper* 30° Dengan Tanpa *Damper* Saat $Re = 7,87 \times 10^4$

Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ), dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada titik *section* tersebut yang didapatkan dari hasil pengolahan data yang didapat dari pengukuran menggunakan pitot dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan masuk pada saluran *upstream* yang telah ditentukan, yaitu 10 m/s. Berikut ini merupakan profil kecepatan saluran *downstream* yang diukur secara horizontal.

Gambar berikut merupakan profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal tiap *section* pada bukaan *damper* 30° dan tanpa *damper*, dengan sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Z/D_h$  untuk bidang horizontal, dimana nilai  $Z/D_h=0$  merupakan sisi *inner* dan  $Z/D_h=1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan untuk bidang vertikal, sumbu  $y$  grafik profil kecepatan adalah  $Y/D_h$  dimana nilai  $Y/D_h =0$  merupakan sisi *inner* dan  $Y/D_h =1$  merupakan sisi *outer*. Sedangkan sumbu  $x$  grafik profil kecepatan adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref}=1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut dimana nilai  $Y/D_h=0$  merupakan sisi *lower* dan  $Y/D_h=1$  merupakan sisi *upper*. Sumbu  $x$  grafik profil kecepatan horizontal dan vertikal adalah nilai dari  $u/U_{ref}$  dimana  $u/U_{ref} =1$  merupakan kecepatan lokal maksimum di *section* tersebut yang telah mengalami *recovery* aliran.

Perbedaan profil kecepatan yang terjadi pada aliran dengan bukaan *damper* 30° dengan tanpa *damper* terlihat berbeda. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, sudut bukaan *damper* 30° memberi pengaruh terhadap aliran yang melewati *elbow* yang dilengkapi dengan *double guide vane*, profil kecepatan pada *section 1 (outlet elbow)* untuk bidang horizontal menunjukkan sedikit adanya backflow pada sisi *outer*, namun pada bidang vertikal tetap terlihat sama dan tidak menunjukkan adanya

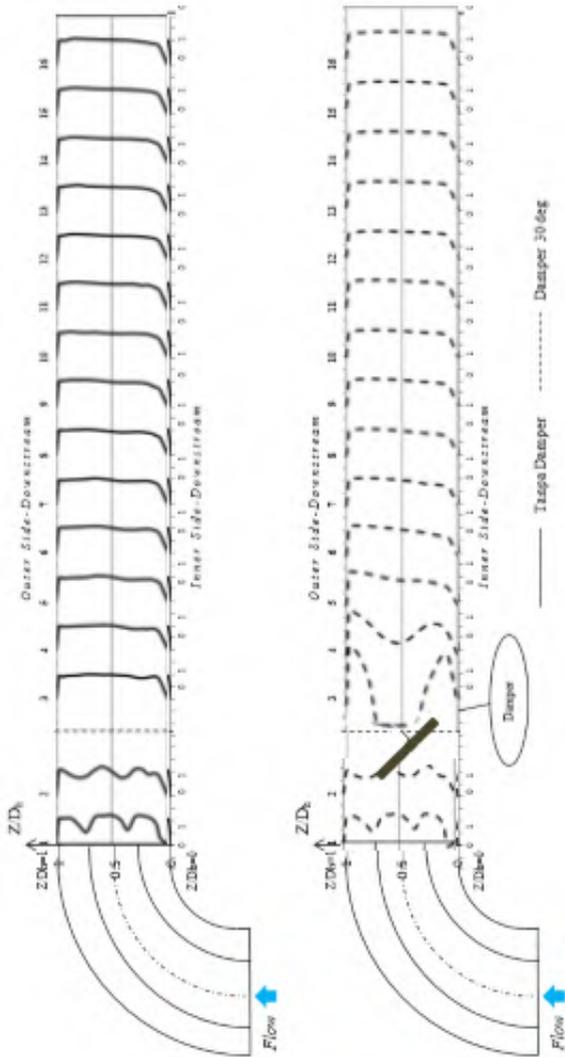
*backflow*. Profil kecepatan aliran yang melewati *elbow* tidak lagi memiliki karakteristik yang mirip untuk instalasi yang memasang *damper* 30° dengan tanpa *damper* karena perbedaan tersebut.

Pada *section* 3 bidang horizontal, profil kecepatan terlihat jelas berbeda yaitu pada  $Z/D_h$  dari 0,272 hingga 0,704 sudah terlihat *backflow* yang cukup besar dengan  $u/U_{Ref}$  paling rendah sebesar -0,838. Namun *backflow* tidak berlangsung panjang, pada *section* 4 sudah tidak terjadi *backflow*. Dari *section* 11 hingga akhir instalasi, profil kecepatan tanpa *damper* dengan sudut bukaan 0° sudah terlihat sama dan keduanya hampir mengalami *recovery* aliran setelah melewati hambatan.

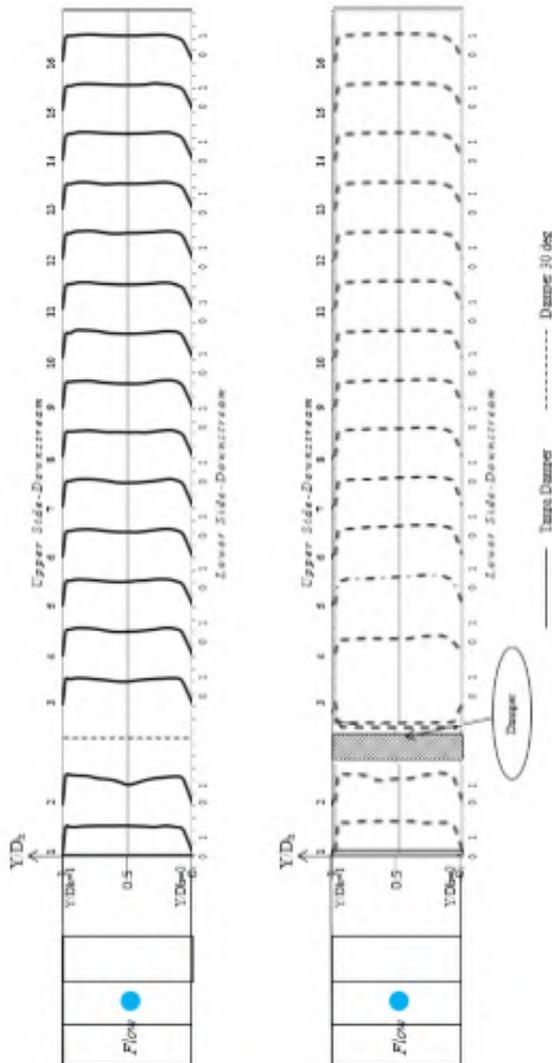
Pada *section* 2 bidang vertikal, terlihat aliran yang melewati saluran yang dipasang *damper* lebih sedikit terjadi defisit profil kecepatan dibandingkan dengan instalasi tanpa *damper*. Namun pada *section* 3, seluruh aliran dari *upper* hingga *lower wall* terlihat adanya *backflow* dengan kisaran nilai  $u/U_{Ref}=0,8$ . Hal ini disebabkan karena aliran tidak mampu mengikuti kontur bodi sehingga terjadi separasi aliran setelah meninggalkan *damper* dan pada *section* tersebut terjadi keterlambatan aliran.

Dari penjelasan data eksperimen di atas, dapat dianalisis bahwa penambahan *guide vane* sudah tidak mampu mengurangi *separation loss* aliran yang terjadi pada *downstream elbow* karena dari fenomena yang ada sudah terdapat *backflow*. Hal ini diakibatkan *damper* sebagai bodi penghalang menyisakan ruang pada *outer* dan *inner wall* untuk lewatnya aliran. Aliran tidak mampu mengikuti kontur bodi *damper* sehingga terjadi separasi setelah melewati *damper*, sehingga terjadi *backflow*. Daerah *entrance length* pada bukaan *damper* 0° lebih pendek dibandingkan 30°, hal ini menandakan bahwa aliran dengan bukaan sudut yang lebih kecil mempercepat adanya aliran yang telah berkembang penuh. Lalu dengan pemasangan *damper* 30° dan tanpa *damper* sudah menunjukkan perubahan profil kecepatan yang cukup signifikan pada *section* tertentu. Kedua aliran baik dari bidang vertikal maupun horizontal pada akhir

*section* instalasi ini sudah terlihat mirip dan mendekati keadaan *recovery*. Perbedaan yang jelas terlihat pada aliran setelah melewati *dampers* karena terdapat keterlambatan aliran karena adanya *separation loss*.



**Gambar 4.7** Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada downstream tanpa damper dan sudut damper  $30^\circ$



**Gambar 4.8** Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada downstream tanpa damper dan sudut damper 30°

#### 4.5. Pressure Drop pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* Fungsi Bilangan *Reynolds* dengan Variasi Sudut Bukan Dampier 0°, 10°, 20°, 30°

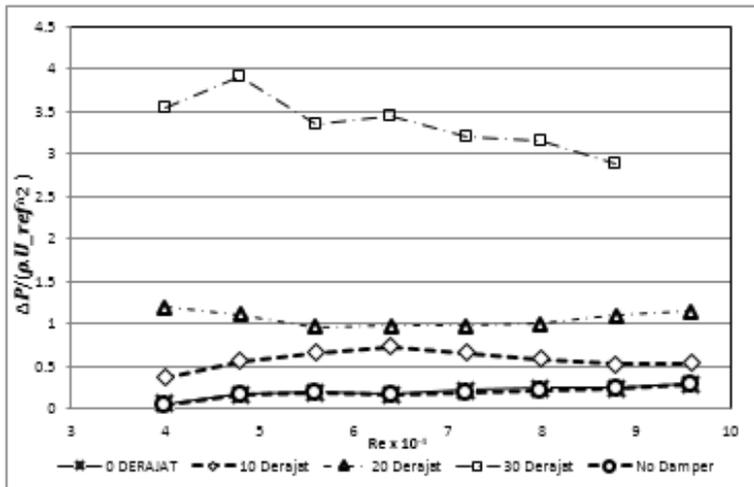
Sub bab ini akan menjelaskan karakteristik *pressure drop* pada *square duct* dengan *square elbow 90°* yang dilengkapi dengan *double guide vane*. Grafik dari nilai *pressure drop* dengan variasi bilangan *Reynolds*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) pada variasi sudut bukaan *dampier* 0°, 10°, 20° dan 30° ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Tabel Pressure Drop tiap sudut bukaan dampier

0 DERAJAT			10 DERAJAT		
Velocity (m/s)	Re	Delta P	Velocity (m/s)	Re	Delta P
5	39924.45	1.785772	5	39924.45	10.61767
6	47909.34	7.14309	6	47909.34	23.88976
7	55894.23	11.25037	7	55894.23	38.04665
8	63879.12	12.85756	8	63879.12	55.56581
9	71864.01	20.53638	9	71864.01	62.64425
10	79848.9	28.75094	10	79848.9	68.48397
11	87833.79	34.64399	11	87833.79	74.67761
12	95818.68	48.93017	12	95818.68	90.25019

20 DERAJAT			30 DERAJAT		
Velocity (m/s)	Re	Delta P	Velocity (m/s)	Re	Delta P
5	39924.45	35.18376	5	39924.45	104.9452
6	47909.34	46.91168	6	47909.34	165.9718
7	55894.23	55.45914	7	55894.23	194.3147
8	63879.12	73.74675	8	63879.12	260.1927
9	71864.01	93.02824	9	71864.01	306.4095
10	79848.9	117.478	10	79848.9	373.5642
11	87833.79	156.6373	11	87833.79	411.8654
12	95818.68	193.8088	12	95818.68	



**Gambar 4.9** Bilangan tak berdimensi  $\frac{\Delta P}{\rho \cdot U_{ref}^2}$  dengan variasi

Reynolds number  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  dan variasi sudut bukaan damper  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  dan  $30^\circ$  serta tanpa damper

Pada Gambar 4.9 dan Tabel 4.1 di atas jika dilihat secara keseluruhan, semakin bertambahnya bilangan Reynolds maka akan semakin bertambah pula *pressure drop* yang terjadi. Secara umum pemasangan damper  $0^\circ$  dengan tanpa damper tidak memiliki perbedaan *pressure drop* yang besar baik untuk bilangan Reynolds *range* yang paling rendah hingga yang paling tinggi. Perbedaan yang cukup besar terjadi pada bukaan sudut  $30^\circ$ , pada bilangan Reynolds  $3,94 \times 10^4$  nilai *pressure drop* yang terjadi pada  $30^\circ$  naik hingga sekitar 58 kali lipatnya. Namun pada bilangan Reynolds  $8,78 \times 10^4$  *pressure drop* yang terjadi pada bukaan  $30^\circ$  nilainya berkisar 8,4 kali dibandingkan sudut bukaan  $0^\circ$ .

Pada sudut bukaan  $0^\circ$  hingga  $20^\circ$ , grafik cenderung naik namun perbedaan tidak terlalu besar. Pada sudut bukaan  $30^\circ$  motor sudah tidak mampu mengalirkan fluida hingga bilangan Reynolds  $8,78 \times 10^4$  (kecepatan 12 m/s) hal ini diakibatkan oleh

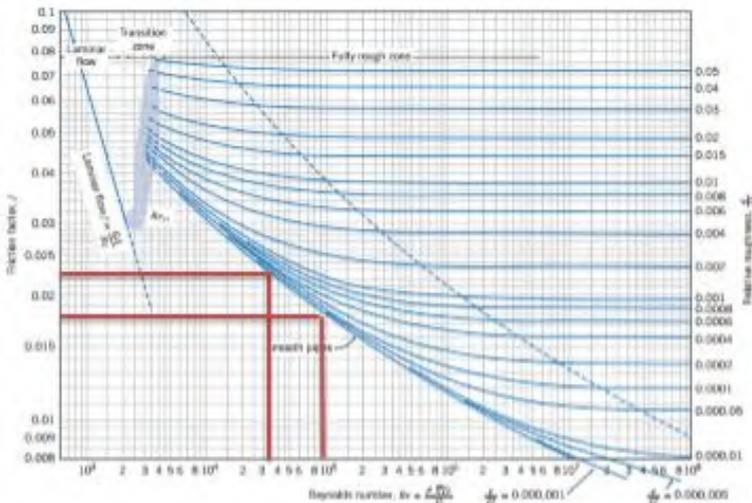
banyaknya defisit kecepatan aliran pada *section* tertentu, apalagi dari profil kecepatan yang telah didapat dari eksperimen terdapat *backflow* pada *outlet elbow*.

Nilai  $C_p$  untuk masing-masing sudut bukaan *damper* cenderung tidak berubah seiring bertambahnya bilangan Reynolds.  $C_p$  untuk instalasi yang dipasang *damper*  $0^\circ$  dengan yang tidak dipasang *damper* nilainya berhimpitan. Semakin besar sudut bukaan *damper*, maka nilai  $C_p$  nya juga bertambah besar.

*Pressure drop* pada instalasi ini dipengaruhi oleh kerugian akibat gesekan dan separasi aliran dari kontur bodi. Secara teori, jika mengabaikan dapat ditulis pada persamaan berikut:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot \bar{v}^2}{2} \left( f \frac{l}{D_h} + k_{elbow} + k_{damper} \right)$$

Untuk kerugian akibat gesekan, dapat dilihat pada gambar berikut:



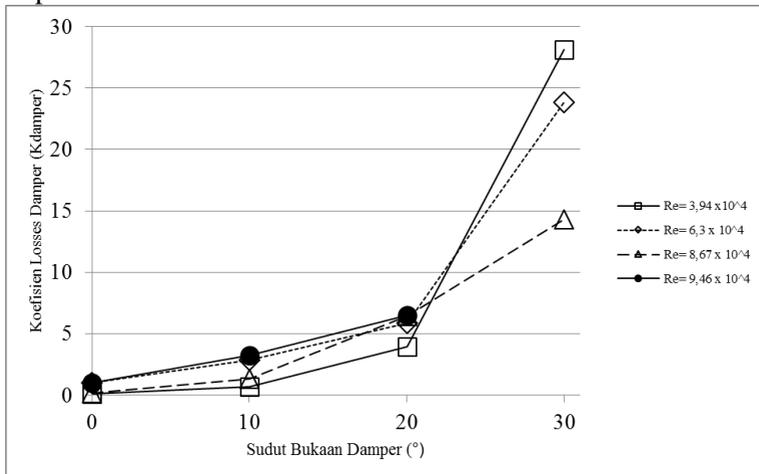
Gambar 4.10 Moody Diagram (Fox)

Jika instalasi yang digunakan dengan menggunakan material *acrylic* dianggap sebagai *smooth pipe*, maka *friction*

*factor* yang didapat berkisar antara 0,018 hingga 0,028 untuk *range* bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini. Perbedaan *friction factor* dari bilangan Reynolds untuk *range* terendah hingga tertinggi berkisar 0,01 dan nilai  $\frac{L}{D_R} = 23$ .

Sehingga untuk kerugian gesekan menyumbang nilai 0,414 hingga 0,644 untuk *pressure drop* sehingga *rangennya* sekitar 0,23.

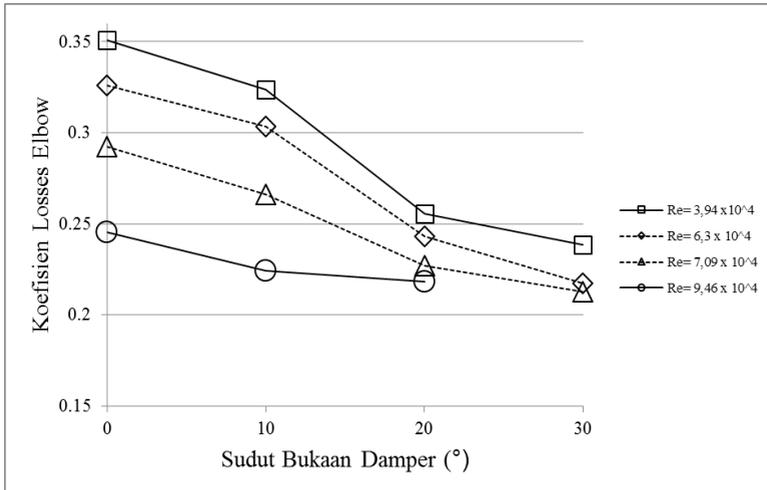
Kerugian akibat separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran mengikuti kontur bodi atau juga dapat diakibatkan oleh perubahan bentuk kontur bodi, atau dalam penelitian ini terjadi akibat adanya *damper* dan *elbow*. Separasi aliran terlihat pada *outlet damper* dan *elbow* pada data eksperimen yang diambil, selain juga terdapat kerugian gesekan pada *fitting* ini. Dalam hal ini kerugian tersebut dapat diwakilkan oleh konstanta *damper* dan *elbow* untuk mencari *pressure drop* yang terjadi. Berikut ini merupakan data k *elbow* dan *damper* yang didapat secara eksperimen:



Gambar 4.11 k Damper untuk masing-masing bukaan sudut

Dari gambar di atas didapat bahwa semakin bertambah besarnya sudut bukaan *damper*, semakin bertambah pula nilai

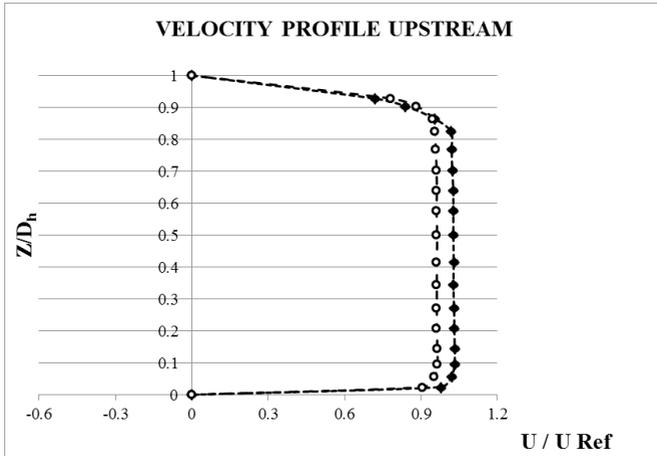
konstanta *dampernya*. Pada sudut  $0^\circ$ , semakin besar nilai Reynolds, semakin bertambah pula nilai konstanta *dampernya*. Namun untuk sudut bukaan  $30^\circ$  dengan bertambahnya bilangan Reynolds, maka nilai  $k$  yang didapat semakin kecil. *Range* nilai  $k$  *dampner* selama eksperimen ini 0,08 hingga 28,09 sehingga *range*  $k$  *dampner* sekitar 28.



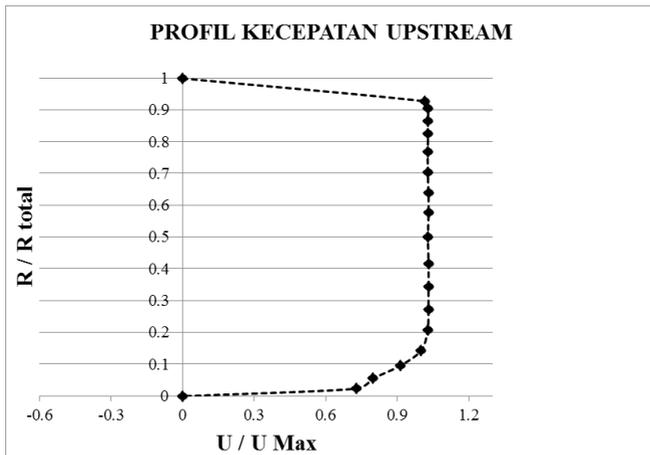
Gambar 4.12  $k$  *elbow* dengan *double guide vane* pada variasi sudut bukaan *dampner*

Gambar di atas merupakan grafik yang menunjukkan harga dari  $k$  *elbow* yang telah dilengkapi oleh *double guide vane* di dalamnya. Nilai  $k$  *elbow* cenderung turun dari sudut bukaan *dampner*  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$  untuk semua bilangan Reynolds. Hal ini diakibatkan karena dengan bertambahnya sudut bukaan *dampner*, separation loss yang terjadi pada *elbow* semakin berkurang. Nilai  $k$  *elbow with double guide vane* terendah adalah 0,21 dan tertinggi sebesar 0,35 sehingga *range*  $k$  *elbow with double guide vane* berkisar 0,14.

## LAMPIRAN



**Profil kecepatan upstream bidang horizontal**



**Profil kecepatan upstream bidang vertikal**

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- 1) *Pressure drop* instalasi semakin bertambah seiring dengan bertambahnya nilai bilangan Reynolds dan bertambah besarnya sudut bukaan *damper*. Nilai tertinggi terdapat pada bilangan Reynolds  $8,78 \times 10^4$  dengan bukaan sudut damper  $30^\circ$  dan nilai terendah terdapat pada bilangan Reynolds  $3,9924 \times 10^4$  dengan bukaan sudut damper  $0^\circ$ . Berdasarkan hasil eksperimen, faktor yang paling berpengaruh adalah kecepatan fluida yang mengalir dalam instalasi saluran udara, dan terdapat faktor lain yaitu gesekan, pemasangan *elbow*, dan pemasangan *damper*. Kerugian yang paling mendominasi dalam perhitungan *pressure drop* adalah penambahan sudut bukaan *damper* yaitu sebesar 84%.
- 2) Profil kecepatan aliran pada tiap variasi sudut bukaan mulai mendekati keadaan *recovery* aliran pada daerah  $11 D_h$  untuk semua bilangan Reynolds. Jika dibandingkan dari besaran dan bentuk profil kecepatan sisi *upstream* maka yang paling mendekati adalah aliran dengan variasi sudut bukaan *damper*  $30^\circ$ .
- 3) Nilai *k elbow* cenderung turun seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds untuk sudut bukaan  $0^\circ$  hingga  $20^\circ$  sedangkan untuk sudut  $30^\circ$  nilai *k elbow* meningkat drastis. Hal ini dikarenakan oleh meningkatnya perbedaan tekanan pada daerah inlet dan outlet *elbow*.
- 4) Nilai *k damper* semakin meningkat seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds. Pada bukaan sudut  $0^\circ$  nilai *k damper* tertinggi terdapat pada aliran dengan bilangan Reynolds tertinggi, yaitu  $9,46 \times 10^4$ . Fenomena ini berubah pada sudut

bukaan  $30^\circ$ , nilai  $k$  *damper* tertinggi terdapat pada nilai bilangan Reynolds yang terendah, yaitu  $3,94 \times 10^4$ .

- 5) Penambahan besaran sudut bukaan *damper* memberikan pengaruh terhadap profil kecepatan pada instalasi saluran udara dengan dua *guide vane* pada *square elbow*  $90^\circ$ . Pada sudut  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  tidak terdapat *backflow* pada *outlet elbow*, sedangkan pada  $30^\circ$  terdapat *backflow*. Hal ini berarti penambahan *guide vane* tidak sepenuhnya mampu mengatasi kerugian akibat separation loss. Kerugian akibat gesekan dan separasi meningkat seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan baik dari hasil eksperimen, terdapat beberapa hal yang masih perlu diperbaiki untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih baik pada penelitian selanjutnya. Beberapa saran yang dapat digunakan sebagai pertimbangan antara lain:

- 1) Menggunakan alat ukur yang mampu mengukur kecepatan pada daerah di dekat dinding agar data profil kecepatan yang didapat lebih lengkap untuk daerah dekat dinding.
- 2) Melanjutkan penelitian ini dengan menggunakan variasi aksesoris perpipaan lain untuk mengetahui karakteristik aliran dan penurunan *pressure drop* yang terjadi, misalnya *damper* pada penelitian ini diganti menggunakan *double damper*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, D.Y. 1994. Laminar Flow Elbow System and Method. U.S. Patent Documents, No. 5,323,661.
- Danbon, F. & Sollicec, C. 2000. Aerodynamic Torque of Butterfly Valve-Influence of an Elbow on The Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque. J. Fluids Engineering, vol. 122, p. 337-344.
- Fox, R.W. & McDonald, A. T. 1998. Introduction to Fluid Mechanics. 5<sup>th</sup> edition, John Wiley and Son, Inc.
- Hakim, Amir. 2008. Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Dua Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds 2,1 x 10<sup>4</sup> dan 8,4 x 10<sup>4</sup>. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin. FTI-ITS. Surabaya.
- Iswati. 2009. Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penambahan Dua Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Horizontal Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds 2,1 x 10<sup>5</sup>. Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin. FTI-ITS. Surabaya.
- Putra, Edo Edgar Santosa. 2016. Simulasi Numerik Aliran Tiga Dimensi Melalui Rectangular Duct Dengan Variasi Bukaannya Damper. Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin. FTI-ITS. Surabaya.
- Sutardi, A.W.Wawan, Affan.ibnu, Iswati, dan M.D.Sutrisno. 2010. Experimental Study on The Effect of Guide Vane Insertion and Reynolds Numbers on The Flow Pressure Drop in a 90 Rectangular Elbow. Journal. Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya.
- Shi-Ming Deng dan John Burnett. 1998. A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong

## BIODATA PENULIS



**Andrew Jaya Nazar**, adalah anak pertama dari dua bersaudara yang lahir di Surabaya, 1 April 1993. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya SDN Petemon I Surabaya (1999-2005), SMPN 1 Surabaya (2005-2008), SMAN 1 Surabaya (2008-2010), D3 Teknik Mesin FTI-ITS (2011-2014) dan melanjutkan jenjang S1 Teknik Mesin FTI-ITS (2014-2016) yang kemudian pada tahun 2016 mulai melakukan penelitian di Laboratorium Mekanika Fluida sampai dengan terselesaikannya buku ini.

Penulis berusaha untuk berpartisipasi aktif dalam kegiatan yang meningkatkan *softskill* maupun dalam kegiatan akademis selama berkuliah di ITS. Semasa kuliah penulis aktif menjadi tutor dalam bidang konversi energi. Penulis menjadi Kepala Departemen Komunikasi dan Informasi BEM FTI – ITS pada periode 2013/2014, lalu berpartisipasi menjadi anggota Komisi III DPM FTI – ITS di periode 2014/2015. Penulis merupakan alumnus DIII Teknik Mesin ITS dengan predikat *cumlaude* dan lulus sebagai Sarjana Teknik dengan IPK 3,59.

E-mail : [andrew.jaya.n@gmail.com](mailto:andrew.jaya.n@gmail.com)

No. HP : +62 857 3237 0207