

TESIS -No. TM142501

STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMENTAL ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW* 90° DENGAN VARIASI BUKAAN SUDUT *DOUBLE DAMPER*

LUTHFI HAKIM NRP. 2114202011

Pembimbing:

Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESES -TM142501

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90° WITH ANGLE OF DOUBLE DAMPERS OPENING VARIANT

LUTHFI HAKIM NRP. 2114202011

Advisor Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENERGY CONVERSION ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.)

> Di Institut Teknologi Sepuluh November

> > Oleh: Luthfi Hakim NRP. 2114202011

Tanggal Ujian: Senin, 18 Juli 2016 Periode Wisuda: Semester Genap 2015/2016

Disetujui Oleh

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

NIP. 197104051997021001

2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. NIP: 196412281990031002

3. Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T.

NIP: 19620216 199512 1 001

Penguii)

(Pembimbing I)

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D

N.P. 196012021987011001

STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMENTAL ALIRAN MELALUI SQUARE DUCT DAN SQUARE ELBOW 90° DENGAN VARIASI BUKAAN SUDUT DOUBLE DAMPER

Nama Mahasiswa : Luthfi Hakim
NRP : 2114 202011
Jurusan : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

ABSTRAK

Saluran udara (ducting system) berfungsi sebagai media pendistribusian udara dari satu sumber ke beberapa sumber yang diinginkan. Pada saluran udara terdapat komponen yang terdiri dari saluran upstream, saluran downstream, sambungan (fitting), belokan (elbow 90°), dan katup (damper). Komponen-komponen tersebut mempunyai koefisien losses dan menyebabkan pressure drop sepanjang aliran sehingga menambah kerugian energi dalam sistem. Pressure drop yang lebih besar pada elbow disebabkan oleh friction loss, separation loss dan secondary flow. Nilai Pressure drop pada aliran yang melalui suatu saluran dipengaruhi oleh besarnya laju aliran pada sisi inlet dan radius kelengkungan dari elbow yang akan menyebabkan aliran sekunder kemudian timbul vortex.

Penelitian dilakukan secara simulasi dan eksperimen, simulai dilakukan dengan bantuan piranti lunak computational fluid dynamic (CFD) komersial untuk menganalisa karakteristik aliran melalui square duct dan square elbow dengan variasi sudut bukaan double damper 0° , 30° clocwise (CW) dan 30° conter clockwise (CCW). Double damper di letakkan pada jarak $2D_h$, $(D_h = \text{diameter hidrolik dari duct})$ Pada daerah downstream setelah outlate elbow 90° .

Hasil penelitian secara simulasi berupa kontur kecepatan, profil kecepatan, dan *vector* kecepatan pada masing-masing sudut bukaan *double damper*. Sedangkan secara eksperimen diperoleh profil kecepatan dan besarnya nilai koeefisien *loss* saluran, koefisien *loss damper* dan koeefisien *loss elbow*. Pada sudut bukaan *double damper* 30° CCW terjadi peningkatan nilai *pressure drop* sebesar 74,10 % sedangkan pada sudut bukaan *double damper* 30° CW sebesar 27,22 % jika dibandingkan dengan sudur bukaan *double damper* 0°.

Kata kunci: Duct, Elbow, Double Damper, Profil Kecepata, pressure drop.

Halaman ini sengaja dikosongkan

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90° WITH ANGLE OF DOUBLE DAMPERS OPENING VARIANT

Nama Mahasiswa : Luthfi Hakim
NRP : 2114 202011
Departement : Teknik Mesin

Advisor : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

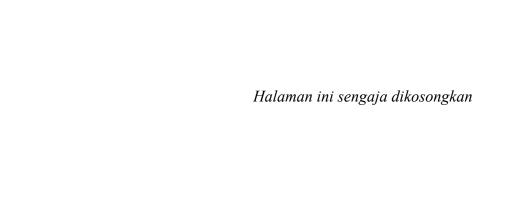
ABSTRACT

Ducting system serves as a distribution medium of air from one source to keeping the desired source. In the airways, there are several components that consist of a channel upstream, downstream channel, fitting, elbow 90° and a valve (damper). These components has a coefficient of losses and cause a pressure drop along the flow thereby increasing energy losses in the system. Pressure drop is greater in the elbow caused by friction loss, separation loss and secondary flow. Value Pressure drop in flow through a channel is affected by the magnitude of the flow rate at the inlet and radius of curvature of the elbow that will cause secondary flow vortex then arise.

Research conducted experiments and simulations, simulations are carried out with the help of commercial CFD software to analyze the flow characteristics through the square and square ducting elbow with double damper opening angle variation shaped horizontal angle 0° , 30° clocwise and 30° conter clockwise. Double damper is put at a distance 2Dh, (Dh = hydraulic diameter of the duct) On downstream after outlate elbow 90°

The results will be obtained from this study quantitatively in the form of a graph of pressure drop and velocity profile. While qualitatively be obtained contours, vectors, and pathline for speed and pressure on the downstream area. In addition, it was found the percentage increase in the average value of the pressure drop at each opening angle double damper. An increase of 27.22% damper opening angle of 30° CW when compared with the angle of 0° and 74.10% increase in the opening angle 30° CCW.

Keywords: Duct, Elbow, Double Damper, velocity Profile, pressure drop



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDULi
LEMBAR PENGESAHANiii
ABSTRAKv
ABSTRACTvii
KATA PENGANTARix
DAFTAR ISIxi
DAFTAR GAMBARxv
DAFTAR TABELxix
DAFTAR SIMBOLxxi
DAFTAR LAMPIRANxxiii
BAB 1 PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang1
1.2 Rumusan Masalah4
1.3 Batasan Masalah5
1.4 Tujuan Penelitian5
1.5 Manfaat Penelitian6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Penelitian Terdahulu7
2.1.1 Aliran Yang Melewati Saluran Dengan Penambahan Valve atau
Damper
2.1.2 Aliran Melalui Elbow 90°12
2.2 Separasi Aliran
2.2.1 Separasi Aliran di Dalam Elbow 90°19
2.2.1 Mekanisme Terjadinya Secondary Flow di Dalam Elbow 90°21
2.3 Persamaan Euler dalam Koordinat Streamline
2.4 Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis24
BAB 3 METODE PENELITIAN
3.1 Rancangan Simulasi Numerik
3 1 1 Parameter Uii 28

3.1.2 Tahap <i>pre-processing</i>	29
3.1.3 Tahap processing.	31
3.1.4 Tahap post-processing	32
3.1.5 Grid Independensi	33
3.2 Rancangan Eksperimen	34
3.2.1 Skema Penelitian	34
3.2.2 Peralatan Pendukung	35
3.2.3 Analisa Dimensi	40
3.2.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk Pressure Drop pada	
square Duct	41
3.2.3.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada	
squareDuct	42
3.2.4 Langkah-Langkah Validasi	44
3.2.5 Prosedur Pengambilan Data	45
3.2.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif	45
3.2.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif	46
3.2.5.3 Perhitungan untuk Reynolds Number	46
3.2.5.4 Perhitungan kecepatan lokal	47
3.2.5.3 Perhitungan untuk <i>pressure drop</i>	48
3.2.6 Urutan Langkah Penelitian	49
3.2.7 Flowchart Penelitian	49
3.2.8 Flowchart Pengambilan data	50
3.3 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	52
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Hasil Simulasi Numerik	55
4.1.1 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan pada Sudut Bukaan	
Damper 0°, 30° CW dan 30° CCW	55
4.1.2 Perbandingan Vector Kecepatan Setiap Cross-Section pada Sudut	
Bukaan Damper 0°, 30° CCW dan 30° CW	60
4.2 Hasil Eksperimen	63
4.2.1 Perbandingan Profil kecepatan bidang horizontal dan verikal sisi	
inlet upstream Straight Channel	63

	4.2.2 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal Vertikal	
	Tanpa <i>Damper</i> dengan Sudut Bukaan <i>Double Damper</i> 0°	64
	4.2.3 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal Vertikal	
	Tanpa <i>Damper</i> dengan Sudut Bukaan <i>Double Damper</i> 30° CW	67
	4.2.4 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal Vertikal	
	Tanpa <i>Damper</i> dengan Sudut Bukaan <i>Double Damper</i> 30° CCW	70
	4.2.5 Perbandingan Distribusi rofil Kecepatan Bidang Horizontal	
	Vertikal Tanpa Damper dengan Sudut Bukaan Double Damper	
	0° 30° CW dan 30° CCW	73
	4.2.6 Koefisien Tekanan Pada Square duct dengan Square elbow 90°	
	fungsi Reynolds Number Dengan variasi Tanpa Damper dan	
	Sudut Bukaan <i>Double Damper</i> 0° 30° CW dan 30° CCW	78
	4.2.7 Koefisien Losses Elbow 90° pada square duct dengan Square	
	elbow 90° fungsi <i>Reynolds Number</i> Dengan variasi Tanpa	
	<i>Damper</i> dan Sudut Bukaan <i>Double Damper</i> 0° 30° CW dan 30°	
	CCW	79
	4.2.8 Koefisien Losses Damper pada square duct dengan Square	
	elbow 90° fungsi <i>Reynolds Number</i> Dengan variasi sudut	
	Double Damper 0° 30° CW dan 30° CCW	80
	4.3 Diskusi	83
BAB 5	PENUTUP	85
5.	1 Kesimpulan	85
5	2 Saran	86
DAFTAI	R PUSTAKA	87

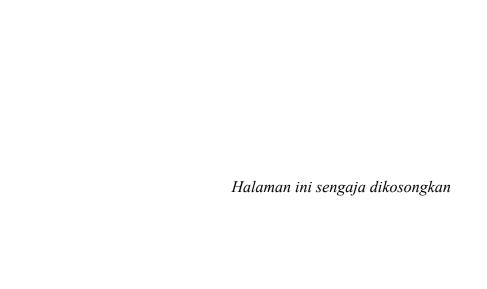
Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Skema pengujian	8
Gambar 2.2 Profil kecepatan pada pipa tanpa <i>elbow</i> dan sudut bukaan <i>valve</i> 0°	8
Gambar 2.3 Profil kecepatan pada pipa tanpa elbow dan sudut bukaan valve 30°	8
Gambar 2.4 Profil kecepatan pada pipa dengan <i>elbow</i> 90° dan sudut bukaan <i>valve</i> 0°	8
Gambar 2.5 Profil kecepatan pada pipa dengan <i>elbow</i> 90° dan sudut bukaan <i>valve</i> 30°	9
Gambar 2.6 Geometri <i>duct</i>	10
Gambar 2.7 Posisi cross-section profil kecepatan	11
Gambar 2.8 Grafik velocity profile masing-masing posisi cross-section berdasarkan	
x/D_h : a). 0° ; b). 90° ; c)1; d).0; e).1; f).2; g).3; h).10; i).15	11
Gambar 2.9 Geometri domain dan meshing pada belokan	13
Gambar 2.10 <i>velocity vector</i> pada posisi keluaran belokan ($\alpha = 90^{\circ}$)	13
Gambar 2.11 velocity profiles pada setiap posisi belokan di setiap bilangan Reynolds	
dan $Rc/D = 1$, b) $Rc/D = 2$, c) $Rc/D = 3$, d) $Rc/D = 4$, e) $Rc/D = 5$	14
Gambar 2.12 a. Geometri domain uji	15
Gambar 2.12 b. Mesh pada <i>Volume</i>	15
Gambar 2.13 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen	
untuk $\varphi = 30^{\circ} (z/Dh = 0.0)$	16
Gambar 2.14 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen	
untuk $\varphi = 60^{\circ} (z/Dh = 0.0)$	16
Gambar 2.15 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen	
untuk x/Dh = 1.0 and z/Dh = 0.0	17
	1/
Gambar 2.16 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall</i>	
elbow hasil simulasi dan eksperimen	17
Gambar 2.17 Separasi lapisan batas	18
Gambar 2.18 Separasi aliran pada <i>curved nine</i>	20

Gambar 2.19 Secondary flow	21
Gambar 2.20 Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline	23
Gambar 2.21 Pengukuran tekanan statis	24
Gambar 2.22 Pengukuran tekanan stagnasi	26
Gambar 2.23 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis	27
Gambar 3.1 a. geometri <i>duct</i> untuk bukaan sudu damper 0° horizontal	28
Gambar 3.1 b. geometri <i>duct</i> untuk bukaan sudu damper 30° CCW horizontal	30
Gambar 3.1 c. geometri <i>duct</i> untuk bukaan sudu damper 30° CW horizontal	30
Gambar 3.2 Penampang mesh pada <i>elbow</i> dan <i>double</i> damper sudu 0° horizontal	30
Gambar 3.3Penampang pada square duct	31
Gambar 3.4 Domain simulasi dan kondisi batas pada model pipa	31
Gambar 3.5 Lokasi pengambilan data	32
Gambar 3.6 Profil kecepatan pada $x/D_h=5$	30
Gambar 3.7 Skema instalasi penelitian.	35
Gambar 3.8 Model uji penelitian square duct	35
Gambar 3.9 Centrifugal blower	36
Gambar 3.10 Nozzle dan Honey Comb	37
Gambar 3.11 Damper	37
Gambar 3.12 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan	38
Gambar 3.13 Inclined Manometer	39
Gambar 3.14 Lokasi perhitungan untuk pressure drop	48
Gambar 3.15 Flowchart penelitian	50
Gambar 3.16 Flowchart pengambilan data	51
Gambar 4.1 a. kontur kecepatan untuk bukaan damper 0°	56
Gambar 4.1 b. kontur kecepatan untuk bukaan damper 30° CW	56
Gambar 4.1 c. kontur kecepatan untuk bukaan damper 30° CCW	56
Gambar 4.2 profil kecepatan pada posisi x/D_h : a) -2; b) -1; c) 0 d) 1; e) 2; f) 3; g) 7;	

h) 11; i) 16	59
Gambar 4.3 visualisai vector kecepatan pada sudut bukaan damper 0° pada posisi x/D_h : a) -2; b) -1; c) 0; d) 1; e) 2; f) 3; g) 7; h) 11; h) 13; i) 16	60
Gambar 4.4 visualisai vector kecepatan pada sudut bukaan damper 30° CCW pada posisi x/D_h : a) -2; b) -1; c) 0; d) 1; e) 2; f) 3; g) 7; h) 11; h) 13; i) 16	61
Gambar 4.5 visualisai vector kecepatan pada sudut bukaan damper 30° CCW pada posisi x/D_h : a) -2; b) -1; c) 0; d) 1; e) 2; f) 3; g) 7; h) 11; h) 13; i)16 Gambar 4.6. Grafik <i>velocity profile</i> : (a) bidang horizontal sisi <i>upstream</i> (b) bidang	62 64
vertikal sisi <i>upstream</i>	66
Gambar 4.8 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa damper dan sudut double damper 0°	66
Gambar 4.9. Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa damper dan sudut double damper 30°CW	69
Gambar 4.10 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa damper dan sudut double damper 30° CW	69
Gambar 4.11 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa damper dan sudut double damper 30° CCW	72
Gambar 4.12. Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa damper dan sudut double damper 30° CW	72
Grafik 4.13. Grafik velocity profile bidang horizontal pada posisi x/D_h : a)-2; b)-1; c) 1; d) 2; e) 3; f) 4; g) 7; h) 11; i) 16	75
Gambar 4.14 Grafik velocity profile bidang vertikal pada posisi x/D_h : a)-2; b)-1; c) 1; d) 2; e) 3; f) 4; g) 7; h) 11; i) 16	77
Gambar 4.15. Pressure drop pada square duct & square elbow 90° dengan variasi Reynolds number $4x10^4 < ReDh < 10x10^5$ dengan variasi sudut bukaan damper 0°, 30° CW dan 30° CCW	78
Gambar 4.16. <i>Koefisien losses elbow 90</i> ° pada <i>square duct & square elbow 90</i> ° fungsi <i>Reynolds number</i> 3,94x10 ⁴ < Re _{Dh} < 10 ⁵ pada masing-masing sudut bukaan <i>double damper</i>	80
Gambar 4.17. Koefisien losses damper pada square duct & square elbow 90° fungsi Reynolds number pada masing-masing sudut bukaan damper	81
Gambar 4.18 Perbedaaan profil kecepatan antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen pada posisi $x/D_h = -2$	83
Gambar 4.19 Gambar 4.19 Profil kecepatan pada jarak 16 D_h ; a) secara eksperiment b) secara numerik	84



DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 3.1 spesifikasi domain pemodelan	29
Tabel 3.2 Pengaturan parameter processing.	32
Tabel 3.3 Hasil <i>grid</i> independensi	33
Tabel 3.4 Lokasi perhitungan profil kecepatan	38
Tabel 3.5Urutan langkah penelitian	49
Tabel 3.6 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	52

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

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

 ρ : massa jenis fluida (kg/m³)

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

 U_{ref} : kecepatan freestream di inlet upstream straight channel (m/s)

u : kecepatan local (m/s)

a : tinggi damper (m)

b lebar damper (m)

 r_m : mean radius *elbow* 90° (m)

 r_i : inner radius elbow 90° (m)

 r_o : outer radius elbow 90° (m)

 l_i : panjang total inner searah streamline elbow 90° (m)

 l_o : panjang total *outer* searah *streamline elbow* 90^o (m)

 D_h : diameter hidrolik saluran (m)

 L_i : panjang upstream straight channel (m)

 L_o : panjang downstream straight channel (m)

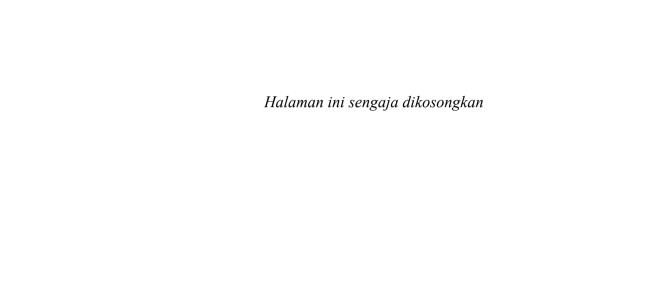
x : jarak damper dari output elbow 90° (m)

 θ : sudut pembukaan damper

Re_{Dh} : Reynold Number

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

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



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Heating, ventilating, and air conditioning (HVAC) termasuk vital penggunaanya dibeberapa industri, gedung-gedung perkantoran yang dipenuhi peralatan komputer dan pusat perbelanjaan yang perlu di jaga kelembapan udaranya. HVAC berfungsi menjaga kondisi udara sekitar dan menjaga kenyamanan personal. Hal tersebut menjadi penting dikarenakan alasan keselamatan atau ekonomi.

Konsumsi energi terbesar pada gedung-gedung perkantoran, pusat perbelanjaan dan hotel didominasi oleh penggunaan *air conditioning* (AC). Misalnya, total energi yang digunkan di hotel Hongkong didominasi oleh penggunaan AC sebesar 32 % sisanya (non- electrical 28 %, penerangan 12 %, lift dan escalators 5 % dan lain-lain 23 %) (Deng & Burnet, 2000). Oleh karena itu, perlu di desain saluran udara (duct) yang efesien agar kehilangan energi pada proses distribusi udara ke tempat tujuan dapat dikurangi. Bentuk dan komponen pada instalasi saluran udara dapat mempengaruhi kecepatan, tekanan dan efisiensi dari distribusi udara tersebut. Pada instalasi sistem saluran udara terdapat beberapa komponen yang terdiri dari saluran upstream, saluran downstream, sambungan (fitting), belokan (elbow 90°), dan katup (damper). Sambungan pada sistem ducting terdapat di antara saluran upstream dan downstream yang digunakan untuk menyambungkan antara saluran tersebut. belokan merupakan komponen berupa lengkungan yang berfungsi membelokkan aliran fluida dalam saluran sedangkan untuk mengatur laju aliran di gunakan katup.

Komponen-komponen tersebut mempunyai koefisien *losses* dan menyebabkan *pressure drop* sepanjang aliran sehingga menambah kerugian energi dalam sistem. Selain itu, dapat mempengaruhi profil kecepatan sepanjang aliran terutama pada sisi *downstream* sehingga dapat mempengaruhi keakuratan isntrumen pengukuran yang terpasang pada daerah tersebut.

Pressure drop yang terjadi pada saat aliran melewati ducting elbow akan lebih besar daripada saat aliran melewati instalasi lurus dengan panjang dan diameter duct yang sama. Fenomena ini terjadi karena aliran yang melewati elbow maupun yang melewati duct lurus sama-sama mengalami kerugian akibat gesekan (friction loss). Akan tetapi, kerugian pada aliran yang melewati elbow akan lebih besar karena disamping terjadi gesekan juga terjadi kerugian akibat separasi (separation loss) dan aliran sekunder (secondary flow).

Separasi terjadi akibat perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut sehingga aliran tidak mampu melawan adverse pressure gradient yang mengakibatkan aliran akan terpisah dan berbalik arah (back flow) dari aliran utamanya dan membentuk vortex. Pada rectangular elbow, secondary flow terjadi akibat perbedaan distribusi tekanan sisi inner dan outer wall elbow. Inner wall adalah sisi dari pada elbow yang memiliki radius kecil sedangkan outer wall adalah sisi dari pada elbow yang memiliki radius lebih besar. Tekanan pada sisi outer wall lebih besar di bandingkan sisi inner wall, sehingga memungkinkan partikel fluida outer wall bergerak menuju inner wall. Gerakan partikel ini menyebabkan laju aliran fluida terhambat. Adanya separasi dan secondary flow memberikan kontribusi yang besar dalam menimbulkan pressure drop aliran.

Penempatan penghalang atau katup (damper) pada sistem perpipaan juga sangat berpengaruh pada fenomena aliran yang terjadi. Dengan adanya damper maka aliran pada fluida akan mengalami gangguan dan akan terpecah setelah melewati damper. Untuk pressure drop yang terjadi pada asesoris tambahan suatu instalasi juga akan berpengaruh pada aliran di dalamnya, bergantung pada variasi bukaan sudut damper dan variasi bentuk bukaan damper yang dilakukan. Damper yang dibuka secara penuh (fully open) akan memberikan nilai koefisien dan pressure drop yang berbeda dengan damper yang dibuka 30°. Model bukaan damper juga akan mempengaruhi nilai koefisien dan fenomena aliran yang terjadi.

Upaya untuk mengamati fenomena aliran yang melewati katup telah dilakukan sebelumnya oleh Jeon, dkk (2010). Penelitian dilakukan secara numerik

dan eksperimen pada saluran pipa lurus yang memiliki diameter 400 mm. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan nilai valve flow coefficient (C_v) dan valve loss coefficient (K) yang melewati single butterfly valve dan double butterfly valve secara numerik dengan ekperimen. valve flow coefficient merupakan ciri penting dalam menginvestigasi kinerja valve dan ditentukan melalui perbedaan antara tekanan upstream dengan downstream. valve loss coefficient merupakan representasi dari perbedaan tekanan, densitas fluida, dan kecepatan fluida. Selain itu, dari hasil numerik di dapatkan velocity pathline yang menunjukkan bahwa pada saat bukaan katup 50%, aliran pada double butterfly valve memiliki fenomena aliran berupa recirculating eddies yang lebih komplek dibandingkan dengan single butterfly valve, dan pada bukaan katup 100% double butterfly valve memiliki aliran yang lebih smooth.

Penelitian serupa telah di lakukan oleh Danboon & Solliec (2000), penelitian dilakukan secara eksperimen pada pipa dan pipa elbow 90° berdiameer 0,3 m dengan panjang pipa 11 D yang di lengkapi dengan butterfly valve yang terletak setelah elbow dengan bukaan 0° (terbuka penuh) dan 30°. Ekperimen dilakukan dengan menvariasikan bilangan Reynolds $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$. Dari profil kecepatan yang di hasilkan menunjukkan bahwa pada pipa lurus yang terdapat valve aliran akan mencapai fully developed lebih awal di bandingkan dengan pipa lurus yang di tambahkan elbow, hal ini dikarenakan pada elbow sudah terjadi aliran sekunder sebelum melalui valve.

Penelitian pada pipa dan pipa *elbow* juga telah dilakukan oleh Dutta & Nandi (2015) penelitian dilakukan secara numerik menggunakan model turbulensi k-e dengan memvariasikan perbedaan *curvature ratio* (Rc/D= 1 hingga 5). Dimana (R_c) adalah mean *curvature radius* dan (D) adalah diameter pipa. Variasi bilangan *Reynolds* yang di tentukan yaitu antara 1×10^5 hingga 10×10^{10} . Dari hasil simulasi didapatkan karakteristik sparasi aliran dan ketergantungan intensitas turbulensi pada bilangan *Reynolds* dan *curvature ratio* belokan pipa 90° .

Peneliti berikutnya telah di lakukan oleh Rup & Sarna (2011), berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Penelitian ini di lakukan secara eksperimen dan simulasi untuk menganalisa aliran yang melewati square duct yang di pasang elbow 90° . square duct yang di gunakan berukuran 80x80 mm dengan , radius curvature elbow 160 mm dan panjang sisi inlet dan outlate 2000 mm. Simulasi dilakukan pada bilangan Reynolds 40000 dengan variasi tiga kerapatan mesh yaitu : (1) $V_{k1} = 553052$, (2) $V_{k2} = 1766079$, (3) $V_{k3} = 1034775$. Di peroleh hasil berupa profil kecepatan kemudian di bandingkan dengan hasil ekperimen.

Simulasi aliran yang melewati $rectangular\ duct$ dan $elbow\ 90^\circ$ dengan tambahan damper pada sisi $outlte\ elbow$ juga telah dilakukan oleh Edgar & Aries (2015). Simulasi di lakukan untuk mengamati profil kecepatan dengan variasi bilangan Reynolds $2.05\ x\ 10^5$ dan $8.2\ x\ 10^5$ serta empat pengaturan sudut $damper\ 0^o\ 10^0\ 20^o\ dan\ 30^o\ dan\ 30^o\ dan aliran pada daerah dekat dinding yang berakibat bertambahnya momentum aliran sehingga mempercepat proses <math>recovery$ aliran sehingga aliran sekunder daearah dekat dinding dapat teratasi. Selain itu, dari hasil penelitian yang telah dilakukan disebutkan bahwa tidak ada pengaruh yang signifikan pada variasi kecepatan terhadap proses recovery aliran.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, maka akan di lakukan penelitian lanjutan tentang karakteristik aliran melewati saluran berpenampang persegi (*square duct*) dan *elbow* 90° dengan penambahan *double damper* secara numerik dan eksperimental. *double damper* diletakkan pada posisi setelah outlate *elbow*, variasi dilakukan pada sudut bukaan *double damper* 0°, 30° CW dan 30° CCW.

1.2 Rumusan Masalah

Fluida yang mengalir melalui saluran tertutup akan mengalami *pressure* drop yang diakibatkan oleh gesekan antara fluida dengan material saluran. Selain itu,

juga di pengaruhi oleh adanya gangguan yang di tempatkan setelah *outlate elbow*. Dalam hal ini, gangguan berupa *double damper* yang di tempakan setelah *oulate elbow*. Dengan harapan dapat mengurangi *blockage effect* yang ditimbulkan oleh perbedaan kecepatan pada sisi *inner* dan *outer elbow*, sehingga profil kecepatan dapat *recovery* lebih cepat dan *pressure losses* yang ditimbulkan lebih kecil. Untuk mengamati fenomena tersebut, maka rumusan masalahnya adalah sebagai berikut.

- 1. Bagaimana interaksi aliran pada daerah *downstream straight channel* yang ditempatkan *double damper* dengan sudut bukaan 0°, 30° CW dan 30° CCW?
- 2. Bagaimana fenomena aliran pada daerah *downstream straight channel* setelah dipasang *double damper* dengan sudut bukaan 0°, 30° CW dan 30° CCW?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memperoleh hasil penelitian yang baik, maka dalam penelitian ini diberikan beberapa pembatasan dan asumsi agar penelitian tidak melebar dan lebih terfokus, antara lain :

- 1. Fluida kerja berupa udara sebagai *incompresible flow* dengan densitas (ρ) dan viskositas dinamik (μ) konstan pada kondisi STP
- 2. Aliran udara pada sisi *inlet* diasumsikan sebagai aliran yang seragam dan dalam kondisi *steady*
- 3. Perpindahan panas yang terjadi dalam sistem diabaikan
- 4. Simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CFD komersial.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran yang melewati *elbow* dan *double damper*, secara khusus penelitian ini bertujuan sebagai berikut :

1. Secara kuantitatif bertujuan untuk menganalisa grafik perubahan tekanan dan kecepatan aliran yang diakibatkan oleh *elbow* dan *double damper*.

2. Secara kualitatif bertujuan untuk menganalisa perilaku aliran melalui kontur tekanan dan kecepatan aliran, disamping itu juga melalui *pathline* dan vektor dari kecepatan aliran.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut :

- 1. Memberikan gambaran tentang fenomena aliran yang melewati suatu saluran berpenampang *square* yang diletakkan dua buah *Damper* pada saluran *downstream straight channel*.
- 2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh variasi sudut pembukaan *double*Damper 0°, 30° CW dan 30° CCW terhadap karakteristik aliran.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

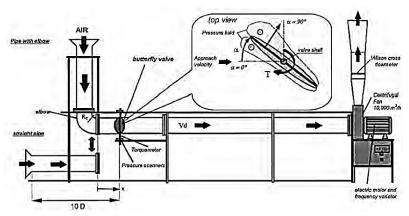
Berdasarkan permasalahan yang telah dikemukakan dalam bab sebelumnya, maka dilakukan studi secara numerik dan ekperimental berdasarkan kajian pustaka melalui penelitian-penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya dan dasar teori yang relevan akan dibahas dalam bab II ini.

2.1 Penelitian Terdahulu

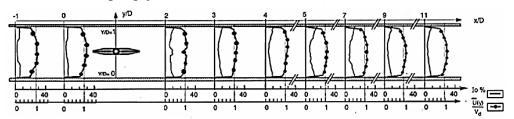
Fenomena aliran yang melewai valve (damper) dan *elbow* baik yang berpenampang lingkaran, persegi dan persegi panjang telah banyak diteliti. Beberapa penelitian terkait tentang hal tersebut sehingga dapat dijadikan referensi dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut.

2.1.1 Aliran Yang Melewati Saluran Dengan penambahan Valve atau Damper

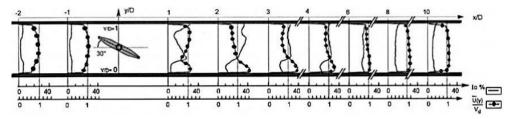
Danbon & Solliec (2000) melakukan eksperimen pada pipa yang dilengkapi dengan *elbow* 90° dan *butterfly valve* terletak pada x/D=1 pada daerah *downstream* setelah *outlate elbow*, dimana x/D adalah panjang pipa tiap satuan diameter. *Butterfly valve* divariasi dengan sudut bukaan 0° dan difungsikan sebagai pengatur laju aliran massa. Penelitian dilakukan secara eksperimen, skema eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2.1 dengan kecepatan aliran pada inlet 40 m/s dan intensitas turbulen 2%. Hasil penelitian yang diperoleh adalah profil kecepatan pada zona *downstream* seperti dalam Gambar 2.2 sampai 2.3.



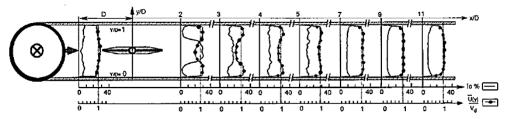
Gambar 2.1 Skema pengujian (Danbon & Solliec, 2000)



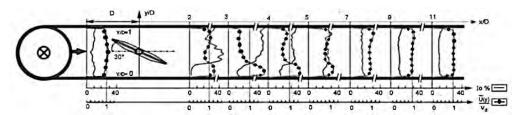
Gambar 2.2 Profil kecepatan pada pipa tanpa *elbow* dan sudut bukaan *valve* 0° (Danbon & Solliec, 2000)



Gambar 2.3 Profil kecepatan pada pipa tanpa *elbow* dan sudut bukaan *valve* 30° (Danbon & Solliec, 2000)



Gambar 2.4 Profil kecepatan pada pipa dengan *elbow* 90° dan sudut bukaan *valve* 0° (Danbon & Solliec, 2000)



Gambar 2.5 Profil kecepatan pada pipa dengan *elbow* 90° dan sudut bukaan *valve* 30° (Danbon & Solliec, 2000)

Pada Gambar 2.2 *valve* dipasang dengan sudut bukaan 0° pada pipa lurus tanpa *elbow* terlihat perubahan profil kecepatan sesaat setelah melewati *valve* namun segera kembali ke profil normal pada x/D=5, hal ini berbeda dengan Gambar 2.4 dimana *valve* dipasang setelah *elbow*, aliran terpengaruh oleh akselerasi yang ditimbulkan oleh *elbow* sehingga profil kecepatan aliran baru kembali pada x/D=7.

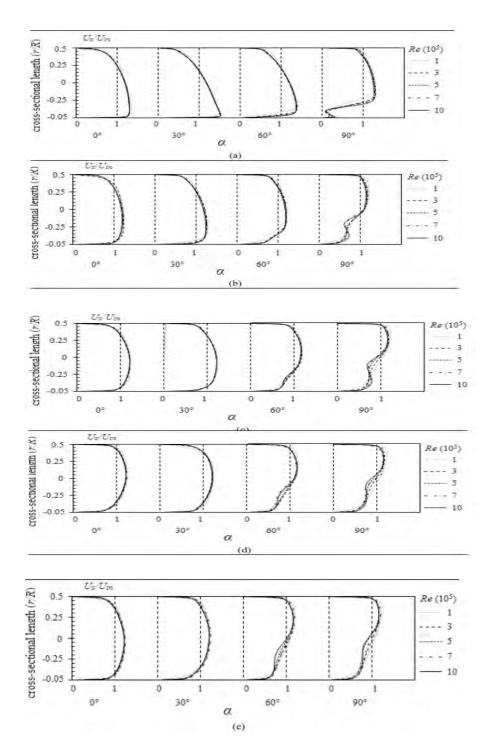
Ketika *valve* dibuka pada sudut 30° seperti dalam Gambar 2.3 dan 2.5 terlihat perbedaan profil kecepatan dimana aliran pada pipa tanpa *elbow* profil kecepatan dapat kembali normal lebih cepat dibanding pada aliran yang melewati *elbow*. Hal ini disebabkan karena pada saluran yang terpasang *elbow* sudah mengalami gangguan akibat aliran sekunder di dalamnya, kemudian sesaat setelah melewati *elbow* terdapat *blockage effect* berupa *valve* sehingga seolah-olah gangguan tersebut terakumulasi akibatnya aliran tertunda mencapai *fully developed*. Secara keseluruhan, untuk aliran yang melalui *valve* dengan bukaan 30° profil kecepatannya akan lebih lambat kembali normal dari pada *valve* dengan bukaan 0°, hal ini disebabkan oleh *blockage effect* yang lebih besar akan memberikan momentum tambahan untuk melawan gaya gesernya.

Penambahan damper sebagai bodi pengganggu juga telah dilakukan oleh Edgar & Aries (2015). Penelitian dilakukan secara simulasi dengan model uji berupa $rectangular\ duct\ dan\ elbow$, damper diletakkan setelah oulet elbow pada jarak $2D_h$, dimana (D_h) adalah diameter hidrolik duct. Geometri ducting dan penempatan damper dilustrasikan pada gambar 2.6

(gambar 2.8.(b)). Pada jarak x/D_h=-1 sebelum melewati *damper* terjadi kerugian energi kinetik (*kinetic energy losses*) yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect* seperti pada gambar 2.8.(c) akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Ketika aliran terganggu oleh laluan berupa *damper* seperti pada gambar 2.8.(d), terdapat perbedaan yang signifikan pada variasi kedua sudut *damper*, pada sudut 30° terjadi percepatan pada sisi *inner wall*, hal ini disebabkan karena adanya penyempitan luas penampang, namun sebagian aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* memiliki kecepatan yang rendah. Sedangkan pada sudut 0° sisi yang memiliki kecepatan lebih tinggi adalah sisi *outer*, disebabkan pada sisi *inner* masih terdapat pengaruh aliran sekunder sebelumnya. Setelah melalui *damper* sejauh Dh terjadi *recovery* di sisi *centerline*, terlihat pada gambar 2.8.(e); (f); (g). Artinya, tidak ada perubahan yang signifikan pada profil kecepan di posisi tersebut. Selanjutnya pada jarak x/D_h=10 s/d 15 kedua aliran tersebut sudah normal kembali.

2.1.2 Aliran Melalui Elbow 90°

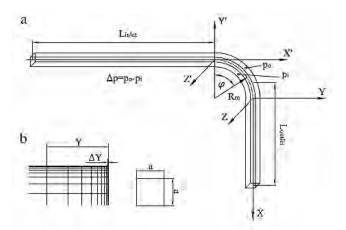
Penelitian secara simulasi guna mempelajari aliran yang melewai belokan (elbow) telah dilakukan oleh Dutta & Nandi (2015). Penelitian dilakukan untuk mempelajari dampak bilangan Reynolds dan curvature ratio terhadap separasi yang terjadi pada belokan pipa 90°. Model k-e dengan metode SIMPLE pada CFD digunakan untuk mempelajari fenomena tersebut. Variasi yang dilakukan berupa perbedaan curvature ratio (Re/D= 1 – 5). Dimana (R_c) adalah mean curvature radius dan (D) adalah diameter pipa. Variasi bilangan Reynolds yang di tentukan yaitu antara 1×10^5 hingga 10×10^{10} . Fluida kerjanya berupa udara yang memiliki densitas ($\rho = 1.2647 \ kg/m^3$) dan viscositas dinamik ($\mu = 1.983 \times 10^{-5} kg/ms$). Geometri belokan dan meshing ditunjukkan pada gambar 2.9. Didapatkan hasil berupa velocity vector (gambar 2.10) dan velocity profiles (gambar 2.10).



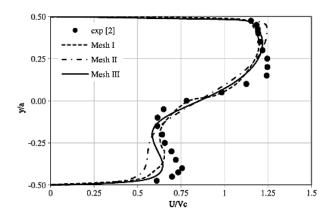
Gambar 2.11 *velocity profiles* pada setiap posisi belokan di setiap bilangan Reynolds dan Rc/D : a) Rc/D = 1, b) Rc/D = 2, c) Rc/D = 3, d) Rc/D = 4, e) Rc/D = 5 (Dutta & Nandi, 20015)

Gambar 2.11 menggambarkan *velocity profiles* rata-rata aliran turbulen yang melewati pipa belokan 90° untuk bilangan Reynolds dan *curvature rasio* yang berbeda. Nilai negatif pada sumbu-y mengindikasikan sisi *inner* belokan dan kecepatannya tegak lurus dengan kecepatan inlet. Pada *inlet* belokan ($\alpha = 0^{\circ}$), fluida dipercepat disisi *inner* disebabkan gradient tekanan pada belokan dengan nilai *curvature tratio* yang rendah (Rc/D = 1 & 2). Setelah ($\alpha = 60^{\circ}$) pada belokan dengan nilai *curvature tratio* tinggi (Rc/D = 3 & 5), kecepatan bergeser ke atas karena fluida bergerak lebih cepat dekat sisi *outer*. Plan diantara 75° dan 90° fluida terpisah dari sisi *inner wall* dan daerah separasi aliran tumbuh menuju *downstream*, sebab percepatan aliran sepanjang *outer wall*.

Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Dutta & Nandi (20015), karakteristik aliran melalui *rectangular duct* telah dilakukan secara simulasi dan eksperimen oleh Rup dan Sarna (2011). Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada Re = 40000 yang memiliki ukuran geometri penampang a × a = 80×80 mm, diameter hidrolik (Dh) = 80 mm dan L_{inlet} = L_{outlet} = 20Dh = 1600 mm seperti yang terlihat pada gambar 2.12. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh Vk = 553 052, Vk = 1766 079, and Vk = 1034 775

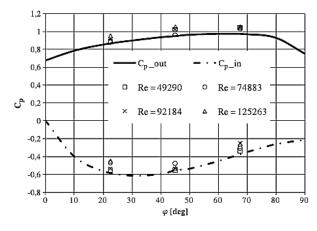


Gambar 2.12 a). geometri *domain* uji b). Mesh pada *Volume* (Rup & Sarna , 2011)



Gambar 2.15 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk x/Dh = 1.0 and z/Dh = 0.0 (Rup & Sarna, 2011)

Gambar 2.15 menunjukkan profil kecepatan pada jarak x/Dh = 1.0. Dimana terjadi kerugian energi kinetik *(energy kinetic losses)* pada sisi inner elbow. Kerugian tersebut disebabkan daerah-daerah aliran yang terpisah *(sparated flow)* didekat sisi *inner elbow* dan aliran sekunder yang berputar akibat kelengkungan sumbu pipa. Terdapat perbedaan yang jelas pada gambar 2.15 yang menunjukkan profil kecepatan pada lokasi x/Dh = 1.0 and z/Dh = 0.0 hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III (Vk = 1034 775).

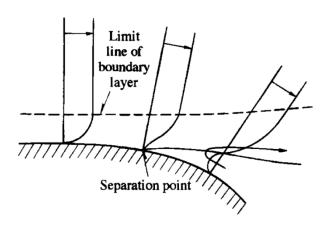


Gambar 2.16 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer* wall elbow hasil simulasi dan eksperimen (Rup & Sarna , 2011)

Gambar 2.16 memberikan informasi tentang distribusi koefisien tekanan pada elbow yang, dapat diamati bahwa koefisien tekanan maksimum di dinding elbow terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\varphi = 45^{\circ}$ (Z = 0.00). Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar koefisien losses pada *elbow* tersebut

2.2. Separasi Aliran

Karakteristik aliran yang melewai saluran lengkung sangalah kompleks. Dalam sebuah aliran dimana tekanan mengalami penurunan searah dengan arah aliran, fluida akan mengalami percepatan dan lapisan batas menipis. Dalam suatu saluran yang mengalami kontraksi, tekanan memiliki gradien yang negatif yang dapat membuat aliran stabil sementara itu turbulensi secara bertahap menurun. Sebaliknya, hal-hal yang sangat berbeda dalam aliran yang memiliki gradien tekanan yang positif dimana tekanan meningkat searah dengan arah alliran, seperti pada aliran divergen atau aliran pada dinding yang melengkung seperti pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Separasi lapisan batas (Nakayama & Boucher, 1999)

Pada gambar 2.17, terlihat bahwa fluida yang berjarak cukup jauh dari dinding memiliki kecepatan yang tinggi dan juga inersia yang besar. Oleh karena itu, aliran dapat melanjutkan ke arah *downstream* dan mampu juga untuk menghadapi tekanan

downstream yang tinggi. Sedangkan fluida yang berdekatan dengan dinding memiliki kecepatan yang rendah, sehingga tidak dapat mengatasi tekanan untuk mencapai downstream karena hanya memiliki inersia yang kecil pula. Dengan demikian kecepatan aliran menjadi lebih kecil dan lebih kecil lagi hingga pada akhirnya gradien kecepatannya menjadi nol. Titik ini disebut sebagai titik separasi.

Setelah terjadinya separasi, gradien kecepatan menjadi negatif sehingga menghasilkan aliran balik (backflow). Dalam area sekitar titik separasi, suatu vortisitas akan berkembang dan aliran akan menjadi turbulen. Berkembangnya vortisistas menyebabkan terbentuknya vortex, adanya vortex region akan mengurangi luas penampang efektif yang dilalui aliran utama, sehingga aliran mengalami percepatan. Akibatnya terjadilah pressure drop. Untuk alasan ini, kerugian energi menjadi meningkat. Fenomena seperti inilah yang terjadi pada sebuah elbow, pada elbow aliran salah satu dinding akan menjauhi arah aliran, bahkan dapat terjadi dengan tiba-tiba.

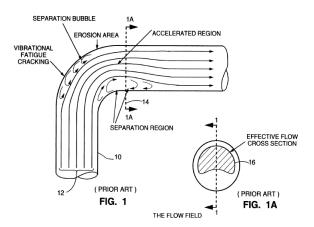
2.2.1 Separasi aliran di dalam *elbow 90*°

Separasi aliran didalam rectangular elbow disebabkan karena terbentuknya adverse pressure gradient (APG) atau kenaikan tekanan pada dinding elbow baik inner wall maupun outer wall. Proses terjadinya separasi berawal dari aliran yang melintasi rectangular elbow 90° melawan gaya gesek pada dinding elbow ditambah dengan adanya kenaikan tekanan (adverse pressure gradient). Kenaikan tekanan pada sisi outer wall elbow diakibatkan oleh radius kelengkungan elbow. Semakin besar radius kelengkungan elbow maka kenaikan tekanan akan semakin besar. Gesekan antara dinding elbow dan partikel fluida dapat mengurangi momentum aliran ketika melintas di sepanjang elbow dikarenakan fluida yang mengalir harus melawan tegangan geser, sehingga ketika melewati adverse pressure gradient (APG) aliran akan terseparasi (separation loss).

Sedangkan separasi aliran pada *inner wall* disebabkan oleh gaya inersia yang terjadi. Hal ini akan terbentuk *adverse pressure gradient* (APG) pada *inner wall* yang

mengakibatkan aliran akan terseparasi. Akibat separasi aliran akan berbalik arah dari aliran utamanya (backflow). Karena aliran ini mempunyai momentum yang rendah, maka aliran ini akan terjebak dan terbentuklah vortex flow pada sisi corner elbow. Vortex merupakan aliran yang terjebak dan berpusar-pusar diantara aliran utama dan dapat mengurangi energi aliran sehingga memberikan pengaruh terhadap timbulnya pressure drop. Vortex pada rectangular elbow 90° terjadi akibat adanya interaksi boundary layer dan endwall yang berkembang pada dinding. Terjadinya separasi aliran pada sisi inner dan outer wall serta vortex pada sisi corner akan menimbulkan blockage effect dan menyebabkan luas penampang aliran utama (effectiveness flow area) pipa akan mengecil. Timbulnya blockage effect, secondary flow pada corner dan surface roughness merupakan penyebab terjadinya pressure drop pada aliran.

Penelitian tentang separasi aliran di dalam *elbow* pernah dilakukan oleh Cheng (1994) dengan menginjeksikan cairan berwarna pada pipa transparan untuk memperoleh ilustrasi streamline di dalam elbow. Kemudian diambil gambarnya menggunakan movie picture seperti yang terlihat pada gambar 2.18



Gambar 2.18 Separasi aliran pada curved pipe (Cheng, 1994)

Pada gambar 2.18 terlihat bahwa terjadi separasi aliran di sisi *inner wall* maupun *outer wall elbow*. Pada outer wall terjadi kenaikan tekanan APG didekat upstream elbow yang menyebabkan aliran terseparasi *(separation loss)*. Begitu juga pada sisi *inner wall*, terjadi kenaikan tekanan (APG) di dekat *downstream elbow*.

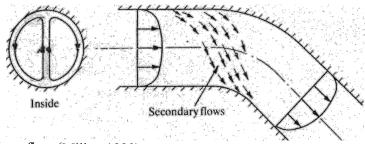
Separasi aliran yang terjadi pada sisi *inner wall* dan *outer wall* ini membuat *effective flow area* berkurang.

2.2.2 Mekanisme terjadinya Secondary flow di dalam elbow 90°

Terbentuknya aliran sekunder pada *elbow* disebabkan oleh adanya perbedaan distribusi energi pada sisi inner dan outer wall. Perbedaan ini terjadi akibat adanya beda tekanan pada sisi dalam dengan sisi luar. Semakin ke sisi luar maka tekanan statisnya semakin besar.

Oleh karena itu tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar daripada sisi *inner wall*. Hal ini sesuai dengan persamaan Euler pada koordinat normal *streamline* yang menyatakan bahwa semakin besar radius kelengkungan maka tekanan yang terjadi semakin besar.

Aliran sekunder pada saluran *circular elbow 90*° terjadi ketika aliran mulai memasuki *elbow*. Hal ini dikarenakan energi pada *outer wall* lebih besar dari pada *inner wall*, sehingga aliran tidak hanya bergerak searah aliran utama saja karena adanya kecepatan, tetapi juga begerak secara tangensial menuju inner. Pada belokan pipa secondary flow di dalam *elbow* terlihat jelas pada sisi *cross section*nya (gambar 2.19).



Gambar 2.19 Secondary flow (Miller, 1990)

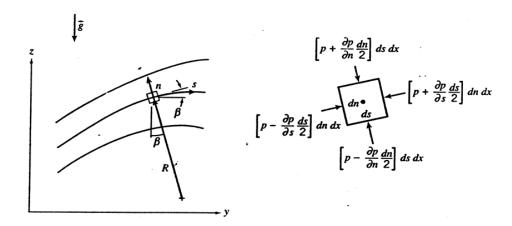
Miller (1990) melakukan penelitian tentang aliran melintasi *elbow* yaitu apabila aliran melintasi saluran melengkung pasti aliran mengalami gaya sentrifugal baik pada *sisi inner wall* maupun *outer wall*.

Sedangkan pada rectangular elbow, secondary flow tidak hanya diakibatkan oleh adanya belokan pipa sehingga energi outer lebih besar daripada inner, tetapi dikarenakan juga adanya vortex pada sisi corner baik pada inner maupun outer yang bergerak secara rotasi dan translasi. Munculnya separasi aliran pada sisi inner dan outer wall serta terbentuknya vortex pada corner inilah yang menyebabkan aliran mengalami penyumbatan aliran (blockage effect). Hal ini yang membedakan terbentuknya secondary flow pada rectangular elbow dan circular elbow.

2.3 Persamaan Euler Dalam Koordinat Streamline

Untuk mengambarkan aliran fluida di sepanjang *streamline* pada kondisi *steady flow*, maka setiap partikel fluida berurutan yang melewati sebuah titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. *Streamline* itu sendiri adalah adalah sembarang garis yang dilukiskan dalam medan aliran, dimana garis singgung pada setiap titik dalam garis tersebut menyatakan arah kecepatan aliran. Karena setiap kecepatan aliran hanya menyinggung *streamlines*, maka ini berarti tidak ada aliran yang memotong maupun melintasi *streamline*. Persamaan gerakannya dinyatakan dalam koordinat *streamline* yang dibangun dari persamaan Euler, untuk *inviscid flow*, dinyatakan pada persamaan 2.1.

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = \rho \bar{g} - \nabla p \tag{2.1}$$



Gambar 2.20 Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline (Fox dkk, 2010)

Dengan mengabaikan efek ketinggian dan *steady flow*, maka persamaan gerak di sepanjang *streamline* dinyatakan sebagai:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial s} - g\frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial s}$$
 (2.2)

karena steady flow dan gaya body diabaikan maka persamaanya menjadi

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \tag{2.3}$$

Persamaan di atas kita dapat mengetahui hubungan antara tekanan dan kecepatan dari sebuah partikel fluida di dalam medan aliran, dimana besarnya tekanan berbanding terbalik dengan kecepatan. Hal ini memenuhi hukum kekekalan energi, bahwasanya jika aliran diasumsikan tanpa gesakan maka penjumlahan komponen tekanan dan kecepatan pada setiap titik adalah sama. Sedangkan persamaan gerak *streamline* pada arah normal dinyatakan sebagai:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \tag{2.4}$$

Karena steady flow di bidang horizontal maka persamaany menjadi

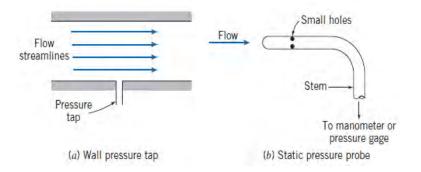
$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \tag{2.5}$$

Persamaan di atas menyatakan bahwa perubahan tekanan di sepanjang normal *streamline* akan terjadi jika terdapat perubahan radius kelengkungan. Semakin besar radius kelengkungan maka tekanan yang terjadi juga semakin besar. Perbedaan tekanan ini digunakan untuk mengimbangi gaya sentrifugal. Namun jika streamlinenya lurus $(R \approx \infty)$ maka tidak ada perubahan tekanan pada normal *streamline*. Oleh karena itu aliran di dalam pipa lurus, tekanan pada sisi normalnya konstan.

2.4 Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis

Tekanan P yang digunakan pada persamaan Bernoulli adalah tekanan thermodinamis atau lebih dikenal dengan tekanan statis. Tekanan statis adalah tekanan yang diukur oleh alat ukur yang bergerak bersama-sama aliran dengan kecepatan yang sama. Bagaimanapun juga cara pengukuran yang demikian sangat sulit dilakukan. Oleh karena itu perlu ada cara yang praktis untuk mengukurnya.

Fluida yang mengalir lurus akan mempunyai *streamlines* lurus pula dan tidak mempunyai variasi tekanan ke arah normal dari aliran *streamlines* tersebut. Kenyataan ini memungkinkan untuk melakukan pengukuran tekanan statis dengan menggunakan *wall pressure tap* yang ditempatkan di daerah dimana aliran *streamlines lurus*, seperti yang terlihat pada gambar 2.21



Gambar 2.21 Pengukuran tekanan statis (Fox dkk, 2010)

Pressure tap adalah sebuah lubang kecil yang dibuat pada dinding dimana axisnya tegak lurus terhadap permukaan dinding. Apabila lubang tersebut tegak lurus

terhadap dinding suatu saluran dan bebas dari kotoran, akurasi pengukuran tekanan statis akan dapat diperoleh dengan menghubungkan *pressure tap* dengan suatu alat ukur yang sesuai. Apabila fluida mengalir jauh dari dinding atau bila *streamlines*-nya berbentuk kurva, akurasi pengukuran tekanan statis dapat diperoleh dengan menggunakan *pressure probe*, seperti yang telihat pada gambar 2.18. Tekanan stagnasi adalah tekanan yang dapat diukur bila aliran diperlambat sampai kecepatannya sama dengan nol dengan proses tanpa gesekan. Pada aliran *incompressible*, persamaan Bernoulli dapat digunakan sehubungan dengan perubahan kecepatan dan tekanan sepanjang *streamlines*. Dengan mengabaikan diferensial elevasi, persamaan Bernoulli menjadi:

$$\frac{\mathbf{p}}{\rho} + \frac{\mathbf{v}^2}{2} = \text{konstan} \tag{2.6}$$

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:

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$
 (2.7)

dimana $V_0 = 0$, sehingga:

$$\frac{\mathbf{p}_{o}}{\rho} = \frac{\mathbf{p}}{\rho} + \frac{\mathbf{V}^{2}}{2} \tag{2.8}$$

$$p_{o} = p + \frac{1}{2} \rho V^{2}$$
 (2.9)

Persamaan di atas adalah kalimat matematis dari defenisi tekanan stagnasi, yang valid untuk aliran *incompressible*. Bentuk $\frac{1}{2}pV^2$ umumnya disebut tekanan dinamis. Jadi persamaan tekanan dinamis adalah :

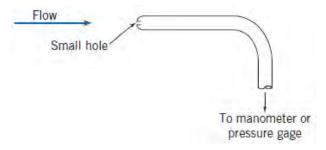
$$\frac{1}{2}\rho V^2 = p_o - p \tag{2.10}$$

dan kecepatannya adalah:

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \qquad \text{(Fox dkk, 2010)}$$

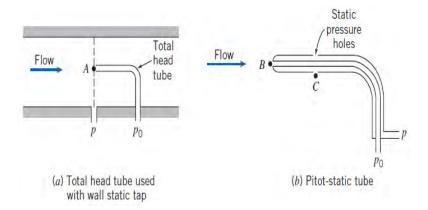
Jadi, bila tekanan stagnasi dan tekanan statis diukur pada suatu titik, maka persamaan kecepatan diatas akan menghasilkan kecepatan aliran lokal.

Tekanan stagnasi dapat diukur dengan menggunakan sebuah *probe* dimana lubangnya langsung berhadapan dengan aliran seperti terlihat pada gambar 2.22. *Probe* ini dikenal dengan nama *stagnation pressure probe* atau *pitot tube*. Daerah pengukurannya juga harus sejajar dengan arah aliran lokal.



Gambar 2.22 Pengukuran tekanan stagnasi (Fox dkk, 2010)

Pada gambar 2.23 terlihat bahwa tekanan statis yang sejajar dengan garis di titik A dapat dibaca dari *wall static pressure tap*. Sedangkan tekanan stagnasi dapat diukur langsung pada titik A dengan menggunakan *total head tube*.



Gambar 2.23 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis (Fox dkk, 2010)

Terkadang dua buah *probe* dapat dikombinasikan seperti pada *pitot-static tube*. Tabung bagian dalam digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi pada titik B, sedangkan tekanan statis pada titik C dibaca melalui lubang-lubang kecil pada tabung bagian luar. Pada daerah aliran dimana variasi tekanan statis dalam arah *streamwise*nya kecil, *pitot-static tube* dapat digunakan untuk mencari kecepatan pada titik B, dengan menggunakan persamaan kecepatan di atas dan mengasumsikan $p_b = p_c$

Perbedaan antara tekanan lokal statik pada setiap titik dalam aliran dengan tekanan statik pada *freestream* bergantung langsung dengan tekanan dinamik pada *freestream*, dan perbandingan ini yang disebut dengan koefisien tekanan atau *pressure coefficient* (Cp).

Halaman Sengaja Dikosongkan

BAB3

METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang desain, metode atau pendekatan yang akan di gunakan dalam menjawab permasalahan penelitian untuk mencapai tujuan penelitian. Penelitian dilakukan secara simulasi dan eksperimental dengan bantuan piranti lunak CFD komersial untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *square ducting* dengan variasi sudut bukaan *double damper* 0° horizontal, 30° CW horizontal, dan 30° CCW horizontal. *Double damper* di letakkan pada *downstream* setelah *outlate elbow* 90° (x/D_h=2).

3.1 Rancangan Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan untuk melengkapi eksperimen agar dapat mengetahui fenomena aliran melalui square ducting dan square elbow yang didalamnya terdapat double damper sebagai bodi pengganggu. Terdiri dari tiga tahapan yaitu :1) pre-processing, 2) processing, 3) post-processing. Tahap pre-processing meliputi pembuatan geometri, meshing, dan penentuan kondisi batas (boundary condition). Tahap Processing meliputi: memilih solver, model turbulensi, sifat material yang digunakan, mengatur parameter solusi, melakukan iterasi dan menyimpan hasil iterasi. Tahap post-processing, merupakan tahap akhir dari simulasi. Dimana hasil simulasi berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif berupa visualisasi aliran, kontur tekanan, dan kontur kecepatan.

3.1.1 Parameter Uji

Parameter uji pada penelitian ini terdiri dari parameter yang di jaga konstan dan parameter yang akan divariasikan. Parameter yang di jaga konstan meliputi : (1) jenis fluida kerja ; berupa udara pada kondisi STP, $\rho = 1.1726 \, kg/m^3$, $\mu = 1.8586 \, x 10^{-5} kg/ms$. (2) bentuk dan ukuran geometri duct dan damper (tertera pada rancangan ekperimen sub bab 3.3.2). (3) model turbulensi, $k - \varepsilon$ (RNG).

Sedangkan parameter yang akan di variasikan meliputi sudut bukaan damper 0° , 30° CW dan 30° CCW. (3) Bilangan Reynolds $2x10^{5}$ (10 m/s).

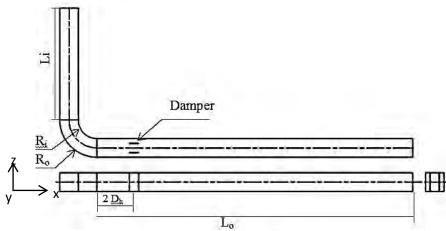
3.1.2 Tahap pre-processing

Langkah-langkah yang dilakukan pada tahapan ini meliputi :

1) Membuat geometri duct yang telah dilengkapi dengan *double damper*, dengan sudut bukaan, 0°, 30° *clockwise* (CW) dan 30° *counter clok wise* (CCW). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 a, b dan c dengan spesifikasinya pada tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3.1 spesifikasi domain pemodelan

	- 1	F
No	Besaran	Nilai (mm)
1	Bentuk penampang	Square
2	Panjang <i>upstream</i> (L _o)	2125
3	Panjang downstream (Li)	750
4	Elbow inner radius (R _i)	125
5	Elbow Outer radius (R _o)	250
6	Diameter $Hydroulic(D_h)$	125



Gambar 3.1 a. geometri duct untuk bukaan sudut damper 0°

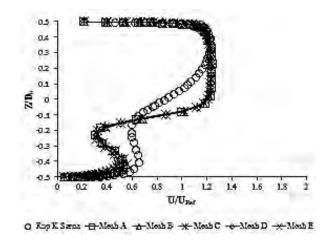
3.1.5 Grid Independensi

Grid independensi dilakukan untuk mendapatkan hasil perhitungan yang mendekati konstan atau terjadi perubahan yang sangat kecil pada nilai tertentu. Pada penelitian ini, parameter yang dibandingkan adalah kecepatan rata-rata (\overline{U}) pada daearah downstream $x/D_h=-1$, kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh Rup & Sarna (2011). Berikut variasi grid yang digunakan serta hasil perhitungannya (tabel 3.3)

Tabel 3.3 Hasil *grid* independensi

Jenis Mesh	Jumlah <i>Node</i>	\mathbf{y}^{+}	Ū
Mesh A	561454	7.30	0.7021
Mesh B	676350	7.33	0.7189
Mesh C	765486	7.19	0.7191
Mesh D	876024	7.27	0.7051
Mesh E	1035000	7.65	0.7055

Tabel 3.3 menunjukkan hasil dari grid independensi, grid independensi dilakukan dengan cara memvariasi 5 jumlah mesh. Dimulai dengan jumlah mesh yang paling kasar yaitu mesh A hingga mesh yang paling rapat yaitu mesh E. Dengan membandingkan nilai kecepatan rata-rata pada mesh D dan mesh E, terlihat bahwa tidak ada perubahan nilai kecepatan rata-rata antara keduanya meskipun terjadi perbedaan jumlah mesh. Dengan demikian, dipilih mesh D sebagai grid indepensi. Dengan penggunaan grid yang independent maka hasil dari perhitungan atau simulasi yang akan dilakukan oleh perangkat lunak CFD komersial nantinya sudah tidak terpengaruh lagi oleh mesh atau grid yang diberikan.



Gambar 3.6 Profil kecepatan pada $x/D_h = -1$

Gambar 3.6 menunjukkan profil kecepatan pada square duct dan elbow tanpa damper untuk masing-masing mesh, terlihat bahawa pada ordinat merupakan representasi dari nilai kecepatan lokal dibagi dengan kecepatan pada sisi inlet. Profil kecepata diambil pada posisi daerah downstream $x/D_h = -1$. Absis pada grafik menunjukan nilai Z/h=0.5 adalah posisi yang searah dengan sisi outerside elbow, sedangkan Z/h=-0.5 adalah posisi yang searah dengan innerside elbow.

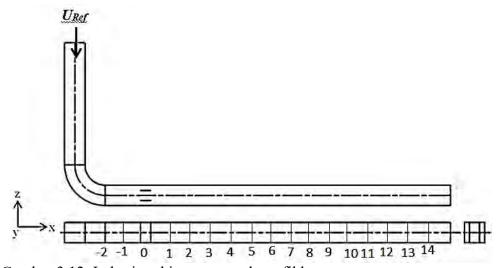
3.2 Rancangan Eksperimen

Eksperimen dilakukan untuk mengambil profil kecepatan dan nilai pressure drop pada variasi sudut bukaan *double damper* 0° horizontal, 30° CW horizontal dan 30° CCW horizontal. Secara ekperimen, tahapan yang dilakukan pada penelitian ini meliputi: (1) skema penelitian, (2) peralatan pendukung penelitian, (3) Analisa dimensi, (4) Prosedur pengambilan data, (5) Serta langkah-langkah dalam pengelolaan data.

3.2.1 Skema Penelitian

Skema penenelitian ini meliputi Instalasi penelitian berupa benda uji (test section) dan peralatan pendukung seperti nozzle, elbow, diffusor, centrifugal fan

mulai dari *outlet elbow 90°* pada setiap dinding *ducting* yang disusun secara paralel pada masing-masing *test section* yang berjarak 125 mm (kecuali pada titik posisi *damper*). Jumlah *wall pressure tap* disesuaikan dengan kondisi tekanan pada setiap section. Pada bagian *downstream straight channel* dipasang 16 *wall pressure tap*. Untuk mengetahui profil kecepatan aliran, maka *test section* dibagi menjadi 16 *section* yang akan dijadikan posisi peletakan *pitot tube*. Pada tabel 3.4 dan gambar 3.12 ditunjukkan beberapa lokasi yang akan diteliti untuk mendapatkan profil kecepatan.



Gambar 3.12 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan

Tabel 3.4 Lokasi perhitungan profil kecepatan

Section	$x_m (\text{mm})$	x_m/l_m
-2	937,5	0,31
-1	1062,5	0,35
1	1312,5	0,43
2	1437,5	0,47
3	1562,5	0,51
4	1687,5	0,55
5	1812,5	0,59
6	1937,5	0,63

Section	$x_m (\text{mm})$	x_m/l_m
7	2062,5	0,67
8	2187,5	0,71
9	2312,5	0,76
10	2437,5	0,80
11	2562,5	0,84
12	2687,5	0,88
13	2812,5	0,92
14	2937,5	0,96

2. Pitot Tube

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

3. Tranducer Tekanan dan Data Aquisisi

Berikut spesifikasi *Transducer* yang akan digunakan dalam percobaan ini , Untuk mengukur intensitas turbulensi dan u/Umax

Model : PX653 - 01D5L

Range : \pm 1" WC

Akurasi : 0.25 % FS (Fullscale)

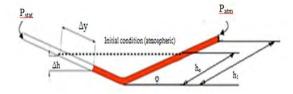
Output : 1 - 5 VDC

Excitation : 12 - 36 Vdc

Ser.no. : X14500102

4. Inclined manometer (Manometer V) dan Mistar

Manometer digunakan sebagai pembaca tekanan yang terukur melalui wall pressure tap dan pitot tube. Manometer yang digunakan mempunyai kemiringan sebesar 15° yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan Δh . Manometer digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui wall pressure tap dan pitot tube seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13



Gambar 3.13 Inclined Manometer

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

Skala minimum : 1 mm

Fluida kerja : Kerosene (SG_{kerosene} = 0,827)

Kemiringan : 15°

3.2.3 Analisa Dimensi

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

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

 ρ : massa jenis fluida (kg/m³)

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

 U_{ref} : kecepatan freestream di inlet upstream straight channel (m/s)

u : kecepatan local (m/s)

a : tinggi damper (m)

b lebar damper (m)

 r_m : mean radius *elbow* 90^o (m)

 r_i : inner radius elbow 90° (m)

 r_o : outer radius elbow 90° (m)

 l_i : panjang total inner searah streamline elbow 90° (m)

 l_o : panjang total *outer* searah *streamline elbow* 90° (m)

 D_h : diameter hidrolik saluran (m)

 L_i : panjang upstream straight channel (m)

 L_o : panjang downstream straight channel (m)

x : jarak damper dari output elbow 90° (m)

 θ : sudut pembukaan damper

3.2.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk Pressure Drop pada squareDuct

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

$$\Delta p = f(\rho, \mu, Uref, a, b, r_m, r_i, r_o, l_i, l_o, L_i, L_o, D_h, x, y, z, \theta)$$
(3.1)

Menggunakan Buckingham Pi-theorema dengan repeating parameter ρ , Uref dan D_h diperoleh 15 grup tak dimensi yaitu :

. I & I	•
$\pi_{1} = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^{2}}$ $\pi_{2} = \frac{\mu}{\rho U_{ref}D_{h}}$ $\pi_{3} = \frac{r_{m}}{D_{h}}$ $\pi_{4} = \frac{r_{i}}{D_{h}}$ $\pi_{5} = \frac{l_{i}}{D_{h}}$ $\pi_{7} = \frac{l_{o}}{D_{h}}$ $\pi_{8} = \frac{L_{i}}{D_{h}}$ $\pi_{9} = \frac{L_{O}}{D_{h}}$ $\pi_{10} = \frac{a}{D_{h}}$ $\pi_{11} = \frac{b}{D_{h}}$ $\pi_{12} = \frac{x}{D_{h}}$ $\pi_{13} = \frac{y}{D_{h}}$	koefisien tekanan
$n_1 - \rho U_{ref}^2$	
$\pi_2 = \frac{\mu}{}$	bilangan Reynolds (Re_{Dh})
$\frac{\partial^2}{\partial u_{ref}}D_h$	
$\pi_3 = \frac{r_m}{R}$	perbandingan mean radius elbow 90° dengan
$\frac{D_h}{T}$	diameter hidrolik
$\pi_A = \frac{r_i}{r_i}$	perbandingan inner radius elbow 90° dengan
D_h	diameter hidrolik
$\pi_r = \frac{r_o}{r_o}$	perbandingan <i>outer radius elbow 90°</i> dengan
D_h	diameter hidrolik
$\pi - \frac{l_i}{l_i}$	perbandingan panjang total inner searah streamline
$n_6 = \frac{n_6}{D_h}$	<i>elbow radius elbow 90°</i> dengan diameter hidrolik
$_{-}$ l_{o}	perbandingan panjang total outer searah streamline
$n_7 = \overline{D_h}$	<i>elbow radius elbow 90°</i> dengan diameter hidrolik
$\pi - \frac{L_i}{L_i}$	perbandingan panjang upstream straight channel
$n_8 - \overline{D_h}$	dengan diameter hidrolik
$\pi_{-} - \frac{L_O}{L_O}$	perbandingan panjang downstream straight channel
D_h	dengan diameter hidrolik
$\pi_{10} = \frac{a}{}$	perbandingan tinggi damper dengan diameter
D_h	hidrolik
$\pi = \frac{b}{a}$	perbandingan lebar damper dengan diameter hidrolik
$n_{11} - D_h$	
$\pi_{12} = \frac{\chi}{}$	perbandingan jarak arah sumbu x dari outlet elbow
D_h	90° dengan diameter hidrolik
$\pi_{\cdot \cdot \cdot} = \frac{y}{1}$	perbandingan jarak arah sumbu y dari outlet elbow
D_h	90° dengan diameter hidrolik
$\pi_{**} = \frac{Z}{}$	perbandingan jarak arah sumbu z dari outlet elbow
$\pi_{14} = \frac{z}{D_h}$ $\pi_{15} = \theta$	90° dengan diameter hidrolik
$\pi_{15} = \theta$	perbandingan lebar <i>elbow</i> 90° dengan jarak damper
	dari <i>output elbow 90°</i>

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

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

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^{2}} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref}D_{h}}, \frac{r_{m}}{D_{h}}, \frac{r_{i}}{D_{h}}, \frac{r_{o}}{D_{h}}, \frac{l_{i}}{D_{h}}, \frac{l_{o}}{D_{h}}, \frac{L_{i}}{D_{h}}, \frac{L_{o}}{D_{h}}, \frac{a}{D_{h}}, \frac{b}{D_{h}}, \frac{x}{D_{h}}, \frac{y}{D_{h}}, \frac{z}{D_{h}}, \theta\right)$$
(3.3)

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah $\frac{r_m}{D_h}$, $\frac{r_i}{D_h}$, $\frac{r_o}{D_h}$, $\frac{l_i}{D_h}$, $\frac{l_o}{D_h}$

$$\frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h} \operatorname{dan} \frac{z}{D_h} \operatorname{sehingga} \qquad \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref}D_h}, \theta\right)$$
(3.4)

Sehingga bilangan tak berdimensi untuk *pressure drop* pada *square duct* adalah sebagai berikut: $\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f(Re_{Dh}, \theta)$ (3.5)

3.2.3.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada square Duct.

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

$$u = f(\rho, \mu, Uref, a, b, r_m, r_i, r_o, l_i, l_o, L_i, L_o, D_h, x, y, z, \theta)$$
(3.6)

Menggunakan Buckingham Pi-theorema dengan repeating parameter ρ , Uref dan D_h diperoleh 15 grup tak dimensi yaitu :

$\pi_1 = \frac{u}{U_{ref}}$	kecepatan tak berdimensi
$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$	bilangan Reynolds
$\pi_3 = \frac{r_m}{D_h}$	perbandingan <i>mean radius elbow 90</i> ° dengan diameter hidrolik
$\pi_4 = \frac{r_i}{D_h}$	perbandingan <i>inner radius elbow 90°</i> dengan diameter hidrolik
$\pi_5 = \frac{r_o}{D_h}$	perbandingan <i>outer radius elbow 90°</i> dengan diameter hidrolik
$\pi_6 = \frac{l_i}{D_h}$	perbandingan panjang total inner searah streamline <i>elbow radius elbow 90°</i> dengan diameter hidrolik

$\pi_7 = \frac{l_o}{D_h}$	perbandingan panjang total outer searah		
D_h	streamline elbow radius elbow 90° dengan		
	diameter hidrolik		
$-L_i$	perbandingan panjang upstreams straight		
$\pi_8 = \frac{D_l}{D_h}$	channel dengan diameter hidrolik		
L_o	perbandingan panjang downstreams straight		
$\frac{\pi_9 = \frac{L_O}{D_h}}{a}$	channel dengan diameter hidrolik		
$\pi_{\cdot \cdot \cdot} = \frac{a}{a}$	perbandingan tinggi damper dengan diameter		
$\pi_{10} = \overline{D_h}$	hidrolik		
b	perbandingan lebar damper dengan diameter		
$\frac{\pi_{11} = \frac{S}{D_h}}{\pi_{11} = \frac{X}{D_h}}$	hidrolik		
$\pi_{-} = \frac{x}{x}$	perbandingan jarak damper dari output elbow		
$N_{12} = D_h$	90° dengan diameter hidrolik		
$\pi_{-} = \frac{y}{y}$	perbandingan jarak arah sumbu y dari outlet		
$\pi_{12} = \frac{x}{D_h}$ $\pi_{13} = \frac{y}{D_h}$ z	<i>elbow 90°</i> dengan diameter hidrolik		
$\pi_{\cdots} = \frac{\overline{Z}}{\underline{Z}}$	perbandingan jarak arah sumbu z dari outlet		
$\pi_{14} = {D_h}$	<i>elbow 90°</i> dengan diameter hidrolik		
$\pi_{15} = \theta$	perbandingan lebar elbow 90° dengan jarak		
-	damper dari <i>output elbow 90°</i>		

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\Pi_{1} = f(\Pi_{2}, \Pi_{3}, \Pi_{4}, \Pi_{5}, \Pi_{6}, \Pi_{7}, \Pi_{8}, \Pi_{9}, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}, \Pi_{14}, \Pi_{15})$$
(3.7)

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

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah $\frac{r_m}{D_h}$, $\frac{r_i}{D_h}$, $\frac{r_o}{D_h}$, $\frac{l_i}{D_h}$, $\frac{l_o}{D_h}$, $\frac{L_i}{D_h}$, $\frac{L_o}{D_h}$, $\frac{a}{D_h}$, $\frac{b}{D_h}$

sehingga
$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta \right)$$
 (3.9)

Oleh krena itu, bilangan tak berdimensi untuk kecepatan pada square duct adalah

sebagai berikut:
$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1 \left(Re_{Dh}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta \right)$$
 (3.10)

3.2.4 Langkah-Langkah Validasi

Ada beberapa langkah validasi yang perlu dilakukan sebelum pengambilan data yaitu

- 1. Kalibrasi alat, alat yang digunakan meliputi:
- a. Manometer
- b. Pressure Tranduser
- c. Data Aquisisi DAQ PRO 5300
- d. Pitot Static Tube
- 2. Validasi Tekanan Dinamis
- a. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* dengan sudut 2 buah damper 0°.
- b. *Pitot static tube* dipasang pada dinding saluran udara yang tersambung pada *manometer* dan *transducer*.
- c. Pengaturan *inverter* dari 0 50 Hz dengan interval 5 Hz.
- d. Diambil data manometer dan pressure transduser untuk tekanan dinamik.
- e. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data aquisisi didapatkan *Voltage* (*Volt*).
- f. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage* (*Volt*) sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.
- 3. Validasi Tekanan Dinding
- a. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* dengan sudut 2 buah damper 0°.
- b. Wall pressure tap pada inlet upstream dihubungkan pada manometer dan transducer.
- c. Pengaturan *inverter* dari 0 50 Hz dengan interval 5 Hz.
- d. Diambil data *manometer* dan *pressure transduser* untuk tekanan statis dinding.
- e. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data aquisisi didapatkan *Voltage* (*Volt*).
- f. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.

3.2.5 Prosedur Pengambilan Data

3.2.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif

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

1) Prosedur pengukuran tekanan dinamis

Prosedur pengukuran tekanan dinamis adalah sebagai berikut:

- a) Test section dipersiapkan.
- b) Pitot tube dipasang pada posisi yang ingin diukur.
- c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan mengunakan 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* saluran udara.
- e) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang 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) Langkah e sampai h diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.

2) Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:

- a) Test section dipersiapkan.
- b) Wall pressure tap dihubungkan ke pressure transducer dengan selang kapiler.
- c) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.

- d) Data voltage dari pressure transducer dicatat.
- e) Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* pada titik *section* selanjutnya.
- f) Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi pressure tap yang terakhir pada posisi 16D_h dari inlet downstream straight channel.

3.2.5.2 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	: 3169,375 mm		
inner wall (l_i)			
Panjang inlet upstream sampai downstream	: 3267,5 mm		
Outer wall (l_o)			
Sudut <i>inclined manometer</i> (θ)	: 15°		
Specific Gravity kerosene ($SG_{kerosene}$)	: 0,827		
Percepatan Gravitasi (g)	$: 9,81 \text{ m/s}^2$		
Temperatur ruangan dianggap konstan (<i>T</i>)	: 28°C		
Massa jenis udara pada T = 28° C (ρ_{ud})	$: 1,172 \text{ kg/m}^3$		
Viskositas kinematis udara pada $T = 28$ °C (v)	$: 1,585 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$		
Massa jenis air pada $T = 28^{\circ}C (\rho_{H2O})$: 996,4 kg/m ³		

3.2.5.3 Perhitungan untuk Reynolds Number

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynolds* yang didapat melalui persamaan 3.11 didapatkan kecepatan awal *centifrugal fan* diatur pada *Reynolds Number* $7,88 \times 10^4$.

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

Dimana: ρ_{ud} : massa jenis udara

v: viskositas kinematis udara pada $T = 28^{\circ}C$

 μ : viskositas absolut udara pada T = 28°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 Δh . Nilai Δh diukur dari frekuensi 0 Hz sampai 50 Hz sehingga akan mendapatkan frekuensi dengan nilai Δh pada kecepatan udara masuk 10 m/s dengan Reynolds Number 7,88 x 10^4 . Pengukuran kecepatan aliran masuk menggunakan persamaan 3.12 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^{2} = SG_{kerosene} \cdot \rho_{H20} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta y sin15^{\circ}$$

$$U_{ref}^{2} = \frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H20} \cdot g \cdot \Delta y sin15^{\circ}}{\rho_{udara}}$$

$$U_{ref} = \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H20} \cdot g \cdot \Delta y sin15^{\circ}}{\rho_{udara}}}$$

$$(3.13)$$

3.2.5.4 Perhitungan kecepatan lokal

Profil kecepatan diukur pada 16 test section sepanjang downstream straight channel dengan variasi pembukaan sudut damper dan pada Reynolds Number 7,88 x 10⁴. Posisi perngukuran dilakukan secara horizontal dari sisi outer wall ducting. Perhitungan profil kecepatan pada setiap section sepanjang downstream straight channel ditulis sesuai persamaan 3.13 sebagai berikut:

Pressure drop pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi Reynolds number $3,94 \times 10^4 < \text{Re}_{Dh} < 9,46 \times 10^4$ pada masing-masing variasi sudut damper.

3.2.6 Urutan Langkah Penelitian

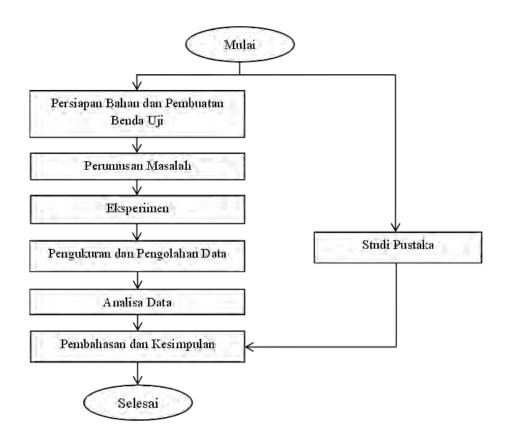
Pada tabel 3.5 dijelaskan urutan penelitian yang akan dilakukan. Urutan langkah penelitian adalah sebagai berikut :

Tabel 3.5 Urutan langkah penelitian

1. Profil Kecepatan pada Re_{Dh} 7,88 x 10 ⁴	Profil kecepatan dengan sudut pembukaan damper 0° horizontal			
	Profil kecepatan dengan sudut pembuka damper 30° CW			
	Profil kecepatan dengan sudut pembukaan damper 30° CCW			
2. Pressure Drop dengan variasi Re_{Dh} 3,94 x10 ⁴ < Re _{Dh} < 9,46	Pressure drop dengan sudut pembukaan damper 0°			
x 10 ⁴	Pressure drop dengan sudut pembukaan damper 30° CW			
	Pressure drop dengan sudut pembukaan damper 30° CCW			

3.2.7 Flowchart Penelitian

Gambar 3.15 merupakan *flowchart* dari urutan langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 3.15 Flowchart penelitian

3.2.8 Flowchart Pengambilan Data

Pada gambar 3.16 merupakan *flowchart* dari urutan proses pengambilan data pada penelitian yang akan dilakukan.

3.3 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan selama 6 bulan, dengan rencana jadwal pelaksanaan sesuai dengan yang terlihat pada tabel 3.6.

Tabel 3.6 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Kegiatan	Bulan				
		1	2	3	4	5
1	Identifikasi masalah					
2	Mengumpulkan literatur					
3	Mempelajari literatur					
4	Membuat geometri dan mesh					
5	Simulasi					
6	Analisa data					
7	Penyusunan laporan					

Halaman Sengaja Dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibagi menjadi dua sub-bab pokok yaitu: (1) sub-bab analisa dan pembahasan untuk hasil simulasi numerik, (2) sub-bab analisa dan pembahasan untuk hasil ekperimen. Pada hasil simulasi numerik akan ditampilkan data berupa profil kecepatan (*velocity profile*), vector kecepatan (*velocity vektor*) pada penampang melintang (*cross section*) yang sudah ditentukan dan visualisasi aliran. Sedangkan pada hasil eksperimen akan di tampilkan data berupa profil kecepatan horizontal dan vertikal pada sisi *inlet upstream straight channel* profil kecepatan pada penampang tegak lurus dengan damper (*horizontal cross section*) yang telah ditentukan, profil kecepatan pada penampang sejajar dengan damper (*vertikal cross section*) yang telah ditentukan, *pressure drop, koefisien losses elbow 90*° dan *koefisien losses damper* dengan variasi *Reynolds number*.

4.1 Hasil Simulasi Numerik

Pada sub-bab ini akan di tampilkan visualisasi berupa grafik profil kecepatan dan vector kecepatan pada *cross-section* tertentu untuk masing-masing variasi sudut bukaan damper. Hasil simulasi ini digunakan untuk melengkapi dan mempertegas hasil ekperimen.

4.1.1 Perbandingan distribusi profil kecepatan pada sudut bukaan damper 0°, 30° CW dan 30° CCW.

Profil kecepatan dan kontur kecepatan pada saluran yang berpenampang persegi (square duct) dan elbow 90° dengan penambahan double damper akan di sajikan pada gambar 4.1a, b dan c. gambar tersebut menjelaskan bahwa elbow dan double damper dengan sudut bukaan 0°, 30° CW dan 30° CCW memberikan pengaruh terhadap profil kecepatan yang dihasilkan. Distribusi kecepatan disajikan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (U/U_{Ref}) dimana Uadalah kecepatan lokal pada section tertentu dan U_{Ref} adalah kecepatan pada sisi inlet (10 m/s).

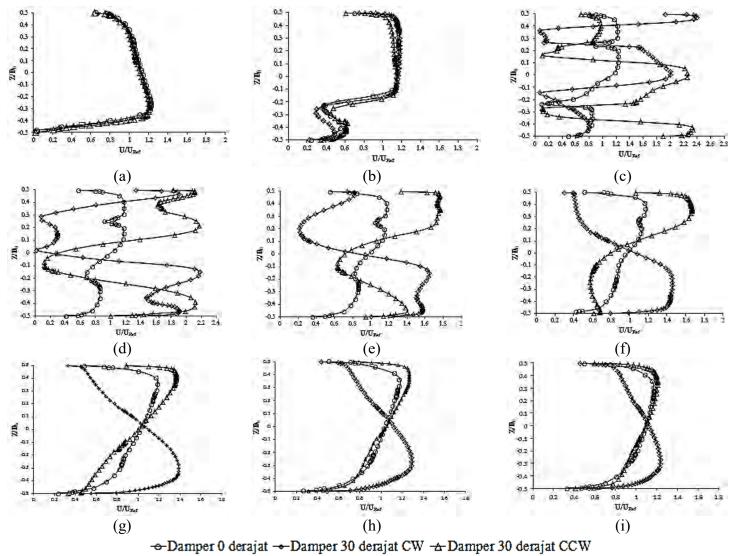
Gambar 4.1 dapat di *breakdown* menjadi beberapa grafik profil kecepatan agar lebih muda mempelajari prilaku aliran yang melewati sistem *duc*t tersebut. Nilai $Z/D_h = -0.5$ pada absis di grafik menunjukkan posisi *inner elbow* sedangkan $Z/D_h = 0.5$ menunjukkan posisi yang searah dengan *outer elbow*. Sisi *inner elbow* adalah sisi yang memiliki jari-jari kelengkungan lebih kecil jika dibandingkan dengan sisi *outer elbow*. Pemaparan grafik profil kecepatan untuk masing-masig variasi sudut bukaan damper dapat dilihat pada gambar 4.2.

Secara umum, profil kecepatan pada daerah downstream setelah melewati elbow dapat dijelaskan sebagai berikut. Gambar 4.2.(a). adalaha posisi $outlet\ elbow$ $(x/D_h=-2)$, terlihat bahwa adanya ketidaksimetrisan pada profil kecepatan, kecepatan pada sisi $inner\ wall$ lebih besar daripada sisi $outer\ wall$. Hal ini, sudah tampak adanya pengaruh elbow. Profil kecepatan yang serupa terjadi pada masingmasing bukaan sudut damper. Gambar 4.2.(b) terlihat adanya switching kecepatan yang mulanya kecepaan maksimum berapa pada sisi inner kini beralih ke sisi outer wall. Pada posisi tersebut, terjadi kerugian energi kinetik ($kinetic\ energy\ losses$) yang disebabkan karena terbentuknya aliran sekunder di sisi $inner\ elbow\ sehingga$ terdapat $blockage\ effect\ yang\ berakibat sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi <math>outer\ sehingga\ memiliki\ kecepatan\ yang\ lebih\ besar\ Profil\ kecepatan\ yang\ serupa juga terjadi\ pada\ masing-masing\ sudut\ bukaan\ damper.$

Gambar 4.2.(c). adalah representasi dari profil kecepatan yang telah terganggu oleh double damper. Terlihat adanya perbedaan yang signifikan antara ketiga variasi bukaan sudut doble damper. Pada bukaan sudut 0 derajat, kecepatan pada sisi outer wall masih mendominasi. Hal ini dikarenakan, pada sisi inner masih terpengaruh oleh aliran sekunder sebelumnya. Pada bukaan sudut 30° CW terlihat adanya kecepatan yang tinggi pada sisi inner, outer dan diantara double damper. Hal ini, disebabkan karena terjadi penyempitan luas penampang pada sisi-sisi tersebut. Kecepatan tetinggi terjadi pada sisi *inner* karena terpengaruh oleh efek nozzle. Sedangkan kecepaan terendah ada pada posisi outer karena laju aliran dari upstream terhalang oleh damper dan ada back flow didaerah belakang damper yng dekat dengan sisi *outer*. Selain itu,

masih terpengaruh oleh aliran sekunder pada elbow. Hal tersebut berkebalikan dengan sudut bukaan damper 30° CCW. kecepatan tertinggi pada posisi outer wall. Selain karena efek nozzle pada sisi outer, ada penyatuan kecepatan dari sisi *centerline* menuju sisi *outer* sehingga menambah kecepaan pada sisi *outer* (gambar 4.2 d). kecepatan pada sisi *inner* menjadi lebih rendah karena adanya aliran sekunder di belakang damper yang dekat dengan sisi *inner*. Dengan adanya *blockage effect* laju aliran akan terhalang sehingga berarah kesisi yang lain.

Semakin menjauhi elbow, pada sudut bukaan *damper* 30° CCW kecepatan maksimum kembali mengarah kesisi outer wall. Pada sudut bukaan *damper* 0° juga mengarah ke sisi *outer*. Hal tersebut, berbeda dengan sudut bukaan damper 30° CW kecepatan maksimum mengarah ke sisi inner wall (gambar 4.2 e, 4.2 f dan 4.2 g). Selanjutnya profil kecepatan mengalami proses *recovery* aliran untuk mencapai kondisi normal (gambar 4.2 h). Proses *recovery* dilakukan untuk mencapai kestabilan profil antara sisi *inner* dengan sisi *outer*. Hal tersebut, tidak terjadi pada masingmasing sudut bukaan damper. Kecepatan maksimum pada sudut bukaan damper 0° dan 30° CCW masih mengarah ke sisi outer. Hal tersebut berbeda dengan sudut bukaan *damper* 30° CW. Untuk lebih jelasnya akan dilakukan pembahsan visualisasi vector kecepatan pada *section* tertentu di sub-bab 4.1.2.



Gambar 4.2 profil kecepatan pada posisi x/D_h : a) -2; b) -1; c) 0 d) 1; e) 2; f) 3; g) 7; h) 11; i) 16

4.2 Hasil Eksperimen

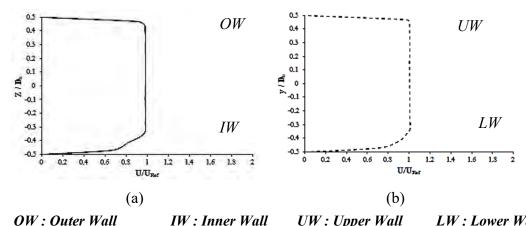
Secara garis besar pembahasan hasil dan analisa eksperimen pada penelitian ini melipui pembahasan tentang profil kecepatan pada penampang tegak lurus dan sejajar dengan double damper (vertikal dan horizontal cross section) yang telah ditentukan pada sudut buka double damper 0°, 30 CW°, dan 30° CCW dengan profil kecepatan model uji tanpa damper pada kecepatan 10 m/s, pressure drop pada square duct dengan elbow 90° dengan variasi Reynolds number 3,94 × 10⁴ < ReDh < 10 × 10⁴ (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi tanpa damper dan koefisien losses elbow 90° dan koefisien losses damper dengan variasi Reynolds number.

4.2.1 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi Inlet Upstream Straight Channel

Profil kecepatan pada sisi *upstream straight channel* digunakan sebagai acuan untuk menentukan gambaran proses *recovery* profil kecepatan daerah *downstream straight channel* pada *section* yang telah ditentukan. Profil kecepatan diambil pada sudut bukaan damper 0° . Pada gambar 4.6.(a) menunjukkan perilaku aliran pada sisi *upstream straight channel* berupa grafik *velocity profile* pada bidang horizontal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari -5 hingga 5 pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{U}{U_{ref}}$ pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $x/D_h=-0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner upstream straight channel* dan $x/D_h=0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer upstream straight channel*.

Pada gambar 4.6.(b) menunjukkan perilaku aliran pada sisi *upstream straight* channel berupa grafik velocity profile pada bidang vertikal. Velocity profile dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari -0.5 sampai 0.5 pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{U}{U_{ref}}$ pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai y/D_h= -0.5 adalah

posisi yang searah dengan sisi *lower upstream straight channel* dan $x/D_h=0.5\,$ adalah posisi yang searah dengan sisi *upper upstream straight channel*.



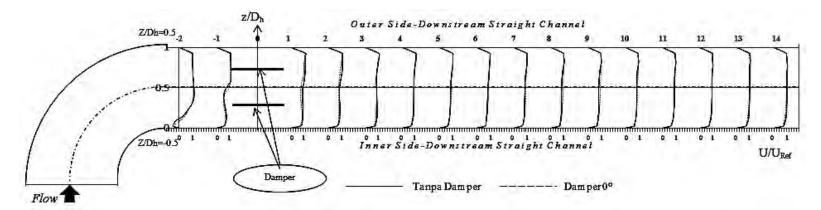
OW: Outer Wall IW: Inner Wall UW: Upper Wall LW: Lower Wall Gambar 4.6. Grafik velocity profile: (a) bidang horizontal sisi upstream (b) bidang vertikal sisi upstream

4.2.2 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa *Damper dengan Sudut Bukaan Double Damper 0°

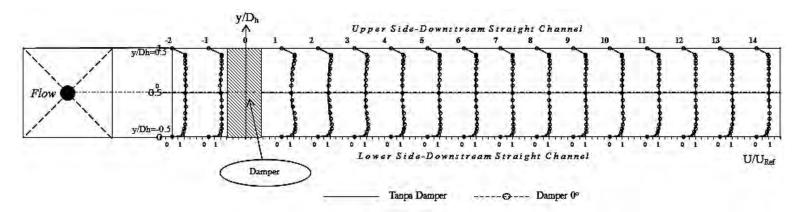
Gambar 4.7. Merupakan ilustrasi dari profil kecepatan di sepanjang downstream straight channel pada bidang horizontal dengan tanpa damper dan sudut bukaan double damper 0° yang mempunyai bentuk profil kecepatan hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa, tidak ada penggaruh yang signifikan antara sudut bukaan damper 0° dengan tanpa damper. Secara terperinci akan dijelaskan sebagai berikut: saat meninggalkan elbow, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh $8 D_h$ dari sisi outlet elbow 90° , pada section -2 kecepatan pada sisi outer lebih besar dari pada sisi inner. Hal ini dipengaruhi adanya perbedaan tekanan antara sisi inner dan outer, pada sisi inner terjadi backflow karena adanya daerah separasi pada daerah inner wall. Pada daerah sebelum melewati damper terjadi kerugian energi kinetik (kinetic energy losses) yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi inner elbow sehingga terdapat blockage effect seperti pada gambar $10 \ section \ -1$, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi outer sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Profil pada jarak $3D_h$ hingga $5D_h$ adalah posisi setelah

double damper, terlihat tidak ada perbedaan yang signifikan dari bentuk profil antara tanpa damper dengan double damper sudut bukaan 0° . Selanjutnya pada jarak 6 D_h hingga $16D_h$ kedua aliran tersebut sudah normal kembali seperti yang ditunjukkan pada gambar 10 section 13 dan 14.

Pada gambar 4.8 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan di sepanjang downstream straight channel pada bidang vertikal dengan tanpa damper dan sudut bukaan damper 0° yang mempunyai bentuk profil kecepatan hampir sama artinya tidak ada pengaruh dengan adanya sudut bukkan damper 0° . Secara terperinci profil kecepatan pada setiap secion dapat dijelaskan sebagai berikut: saat meninggalkan elbow, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh $5D_h$ dari sisi outlet elbow 90° , pada section -2 kecepatan pada sisi upper dan sisi lower hampir sama seperti pada gambar 4.8 section -2. Pada gambar 4.8 section -1 profil kecepatan pada daerah centerline mengalami sedikit perubahan yang disebabkan karena adanya gangguan damper sampai jarak $7D_h$ seperti pada gambar 4.8 section 1; 2; 3; 4. Selanjutnya pada jarak $8D_h$ hingga $16D_h$ kedua aliran tersebut sudah mendekati profil kecepatan normal kembali seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 section 14.



Gambar 4.7 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada downstream straight channel tanpa damper dan double damper sudut 0°



Gambar 4.8 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada downstream straight channel tanpa damper dan sudut double damper 0°

4.2.3 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa *Damper dengan Sudut Bukaan Double Damper 30° CW*

Gambar 4.9 Merupakan ilustrasi dari profil kecepatan sepanjang downstream straight channel pada bidang horizontal tanpa damper dan sudut bukaan damper 30° CW yang dijelaskan sebagai berikut: saat meninggalkan outlet elbow 90°, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh 14D_h dari sisi outlet elbow 90°, pada section -2 memiliki kecepatan pada sisi outer lebih besar dari pada sisi inner. Hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi inner dan outer, pada sisi inner terjadi backflow karena adanya daerah separasi pada daerah inner wall seperti pada gambar 4.9 section -2.

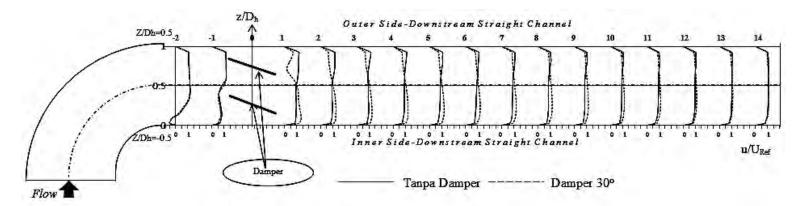
Pada daerah sebelum damper (x=1 D_h) terjadi kerugian energi kinetik (kinetic energy losses) yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi inner elbow sehingga terdapat blockage effect seperti pada gambar 4.9 section -1, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi outer sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Pada jarak $3D_h$ posisi setelah melewati damper terlihat perbedaan profil kecepatan yang begitu signifikan antata double damper sudut 30° CW dengan profil tanpa damper. Profil kecepatan tanpa damper, terlihat adanya perbedaan harga, kecepatan maksimum mulai bergeser ke arah outer. Sedangkan untuk damper 30° CW kecepatan tinggi terjadi pada sisi inner maupun sisi outer dan sisi centerline (sisi tengah antara double damper). Hal ini, terjadi karena ada penyempitan luas penampang. Akan tetapi kecepatan tertinggi ada pada posisi inner wall (effek nozzle). Penyempitan luas penampang pada sisi inner wall berdampak sampai jarak $12D_h$. Kemudian, kecepatan kembali simetri sekitar jarak $15D_h$.

Pada jarak 4D_h dari *outlet elbow 90*° pada *damper* sudut bukaan 30°CW terjadi perubahan profil kecepatan dengan kecepatan sisi *inner* lebih lebih besar daripada sisi *outer* hal ini disebabkan karena bentuk penampang *nozzle* pada daerah sisi *inner*. Pada daerah *outer side damper* sudut bukaan 30° terjadi *backflow* akibat daerah *wake* yang terjadi setelah adanya *damper* seperti pada gambar 4.9 *section* 1. Pada tanpa

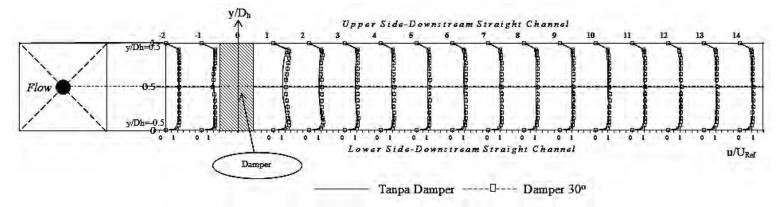
damper hanya terjadi perubahan kecepatan sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner* yang disebabkan karena adanya aliran sekunder setelah melewati *outlet elbow 90*° tanpa terjadi *backflow* seperti pada gambar 4.9 *section* 1.

Pada gambar 4.10 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan di sepanjang downstream straight channel pada bidang vertikal dengan tanpa damper dan sudut bukaan damper 30° CW yang mempunyai bentuk profil yang dijelaskan sebagai berikut: saat meninggalkan outlet elbow 90°, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh 11Dh dari sisi outlet elbow 90°, pada section -2 dan -1 mempunyai profil kecepatan yang sama antara tanpa damper dengan damper sudut bukaan 30° CW seperti pada gambar 4.10 section -2; -1. Pada gambar 4.10 section 1 pada tanpa damper terjadi perubahan profil kecepatan yaitu terjadi blockage effect pada daerah centerline akibat adanya aliran sekunder setelah melalui outlet elbow 90°. Sedangkan pada damper dengan sudut bukaan 30° terjadi perubahan profil kecepatan yang disebabkan karena adanya damper sebagai bodi pengganggu.

Pada *section* 2 *damper* 30° CW terjadi *recovery* profil kecepatan dengan sudah tidak terjadi *backflow*. Pada sisi *upper* dan sisi *lower* tanpa *damper* memiliki kecepatan lebih besar dibandingkan pada sisi *upper* dan sisi *lower damper* sudut bukaan 30° CW seperti pada gambar 4.10 *section* 2. Pada daerah jarak x/D_h = 12 sampai 16 profil kecepatan relatif sama antara tanpa *damper* dengan *damper* sudut bukaan 30° CW seperti gambar 4.10 *section* 9; 10; 11; 12; 13. Selanjutnya pada jarak x/D_h= 16 dari *outlet elbow* 90° kedua aliran tersebut sudah normal kembali tetapi kecepatan yang terjadi lebih tinggi dibandingkan kecepatan pada sisi *inlet upstream* seperti yang ditunjukkanpada gambar 4.10 *section* 14.



Gambar 4.9 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada downstream straight channel tanpa damper dan sudut double damper 30° CW



Gambar 4.10. Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada downstream straight channel tanpa damper dan sudut double damper 30° CW

4.2.4 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa Damper dengan Sudut Bukaan Double Damper 30° CCW

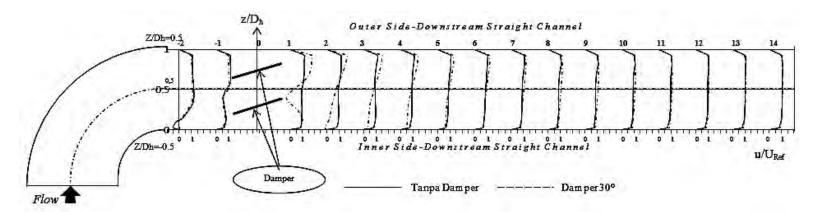
Gambar 4.11 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan di sepanjang downstream straight channel pada bidang horizontal double damper 30° CCW dan tanpa damper yang dijelaskan sebagai berikut: saat meninggalkan outlet elbow 90°, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh 14D_h dari sisi outlet elbow 90°, pada section -2 memiliki kecepatan yang hampir sama antara sudut bukaan 30° CCW dengan tanpa damper yaitu pada sisi outer lebih besar dari pada sisi inner. Hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi inner dan outer, pada sisi inner terjadi backflow karena adanya daerah separasi pada daerah inner wall seperti pada gambar 4.9 section -2.

Pada jarak $1D_h$ terjadi kerugian energi kinetik (*kinetic energy losses*) yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat blockage effect seperti pada gambar 4.11 section -1, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi outer sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Pada jarak $4D_h$ dari outlet elbow 90° pada damper sudut bukaan 30° CCW terjadi perubahan profil kecepatan dengan kecepatan sisi outer lebih lebih besar daripada sisi inner hal ini disebabkan karena bentuk penampang nozzle pada daerah sisi outer. Bukaan sudut damper 30° CCW mengarahkan aliran pada daerah centerline (daearah antara double damper) ke sisi outer. Hal ini menambah kecepatan pada sisi outer. Backflow terjadi pada posisi belakang damper yang dekat dengan inner.(gambar 4.9 section 1).

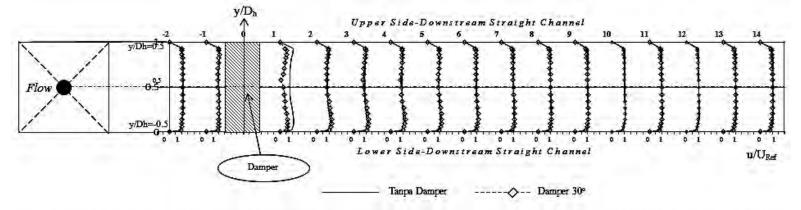
Pada tanpa *damper* hanya terjadi perubahan kecepatan sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner* yang disebabkan karena adanya aliran sekunder setelah melewati *outlet elbow 90*° tanpa terjadi *backflow* seperti pada gambar 4.9 *section* 1. Kecepaan tinggi pada sisi outer berlanjut sampai sekitar 12D_h untuk *damper* bukaan 30° CCW. Profil yang sama antara sudut bukaan 30° CCW dengan tanpa damper pada jarak 12D_h. Hal ini terjadi sampai jarak 15D_h dari *outlet elbow 90*°.

Pada gambar 4.12 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan di sepanjang downstream straight channel pada bidang vertikal dengan tanpa damper dan sudut bukaan damper 30° CCW yang mempunyai bentuk profil yang dijelaskan sebagai berikut : saat meninggalkan outlet elbow 90°, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh 11Dh dari sisi outlet elbow 90°, pada section -2 dan -1 mempunyai profil kecepatan yang sama antara tanpa damper dengan damper sudut bukaan 30° seperti pada gambar 4.10 section -2; -1. Pada gambar 4.10 section 1 pada tanpa damper terjadi perubahan profil kecepatan yaitu terjadi blockage effect pada daerah centerline akibat adanya aliran sekunder setelah melalui outlet elbow 90°. Sedangkan pada damper dengan sudut bukaan 30° terjadi perubahan profil kecepatan yang disebabkan karena adanya damper sebagai bodi pengganggu. Profil kecepatan terjadi backflow seperti pada gambar 4.10 section 1 damper 30°.

Pada *section* 2 *damper* 30° terjadi *recovery* profil kecepatan dengan sudah tidak terjadi *backflow*. Pada sisi *upper* dan sisi *lower* tanpa *damper* memiliki kecepatan lebih besar dibandingkan pada sisi *upper* dan sisi *lower damper* sudut bukaan 30° seperti pada gambar 4.10 *section* 2. Pada daerah jarak x/D_h = 12 sampai 16 profil kecepatan relatif sama antara tanpa *damper* dengan *damper* sudut bukaan 30° seperti gambar 4.10 *section* 9; 10; 11; 12; 13. Selanjutnya pada jarak x/D_h= 16 dari *outlet elbow* 90° kedua aliran tersebut sudah normal kembali tetapi kecepatan yang terjadi lebih tinggi dibandingkan kecepatan pada sisi *inlet upstream* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12 *section* 14.



Gambar 4.11. Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada downstream straight channel tanpa damper dan sudut double damper 30°CCW



Gambar 4.12 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada downstream straight channel tanpa damper dan sudut double damper 30° CCW

4.2.5 Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan Bidang Vertikal dan Bidang Horizontal Tanpa *Damper* dengan Sudut Bukaan *Double Damper* 0° 30° CW dan 30° CCW

Pada gambar 4.13 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi sepanjang *downstream straight channel* berupa grafik *velocity profile* pada bidang horizontal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{U}{U_{ref}}$ pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $Z/D_h=-0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight channel* dan $Z/D_h=0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight channel*. Untuk lebih detail, maka dijelaskan dalam grafik perbandingan antara tanpa damper dengan sudut bukaan *double damper* 0° , 30° CW, dan 30° CCW.

Gambar 4.13(a) adalah bentuk profil kecepatan saat meninggalkan *outlet elbow* 90°, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh 8D_h dari sisi *outlet elbow* 90°. Terlihat bahwa kecepatan pada sisi *outer* lebih besar dari pada sisi *inner*. Hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*, pada sisi *inner* terjadi *backflow* karena adanya daerah separasi pada daerah *inner wall*. Saluran tanpa damper mempunyai *backflow* lebih tinggi karena titik separasi terjadi lebih cepat. Sedangkan pada saluran yang menggunakan damper dengan sudut bukaan 0° mempunyai *backflow* yang paling rendah karena tertundanya titik separasi. Pada daerah sebelum melewati *damper* terjadi kerugian energi kinetik (*kinetic energy losses*) yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect*, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar.

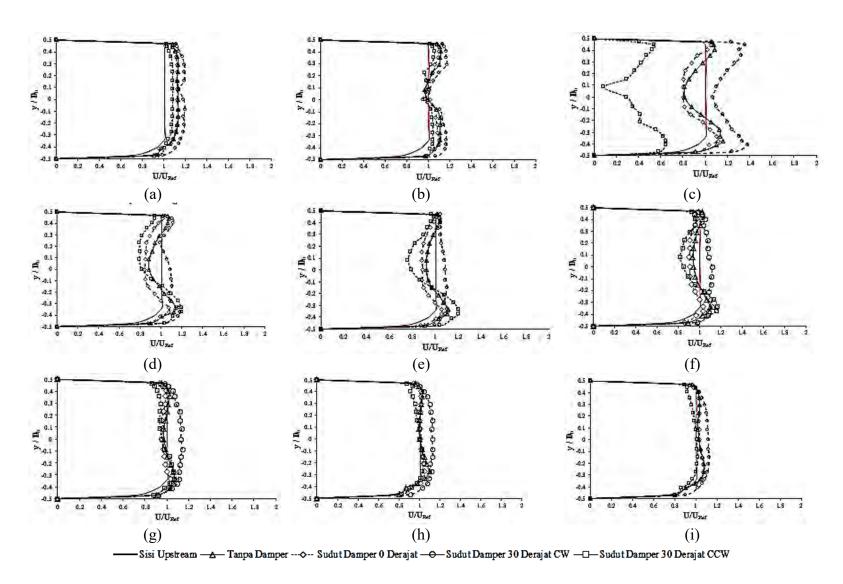
Profil kecepatan paling tinggi pada sisi *outer* terjadi pada damper dengan sudut bukaaan 30°CW. sedangkan profil kecepatan paling rendah pada sisi outer terjadi pada damper dengan sudut bukaan 30° CCW. Pada sisi inner kecepatan teringgi terjadi pada tanpa damper, kecepatan terendah terjadi pada *double damper* sudut

bukaan 30° CW seperti pada gambar 4.13.(b). Ketika aliran terganggu oleh *damper* seperti pada gambar 4.13.(c), terdapat perbedaan yang signifikan pada tanpa damper dengan semua variasi sudut bukaan *double damper*, pada sudut 30° CCW terjadi percepatan pada sisi *outer* paling tinggi, hal ini disebabkan karena adanya penyempitan luas penampang pada sisi *outer* ditambah lagi ada aliran dari *centerline* yang menuju sisi outer karena terarah oleh damper. Kecepatan tertinggi pada sisi inner terjadi pada sudu bukaan damper 30° CW. Selain itu, pada sisi *inner* terjadi *back flow* karena adanya daerah *wake* dibelakang *damper*. Profil yang hampir sama terjadi pada sudut bukaan damper 0° dengan tanpa damper. Pada saluran tanpa damper sisi yang memiliki kecepatan lebih tinggi juga terdapat pada sisi *outer*, disebabkan pada sisi *inner* masih terdapat pengaruh aliran sekunder sebelumnya.

Gambar 4.13. (d), pada sudut 30° CW terjadi *blockage effect* terbesar pada sisi *outer* yang terbentuk oleh pengaruh daerah *wake* dan kecepatan sisi *inner* lebih besar daripada sisi *outer*. Sedangkan pada sudut 30° CCW *blockage effect* terbesar terjadi pada sisi *innerr* yang terbentuk oleh pengaruh daerah *wake* dan kecepatan sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner*. Pada tanpa *damper* dan sudut bukaan 0° sisi yang memiliki kecepatan lebih tinggi adalah sisi *outer*, hal ini disebabkan pada sisi *inner* masih terdapat pengaruh aliran sekunder sebelumnya. Keadaan profil kecepaan yang demikian terjadi sampai kisaran jarak $7D_h$ (Gambar 4.13. (g). Setelah melalui *damper* sejauh $11D_h$ mulai terjadi *recovery* di sisi *outer*, sisi *centerline dan* sisi *inner*, terlihat pada gambar 4.13. (h). Selanjutnya pada jarak $x/D_h=14$ sampai 16 dari *outlet elbow 90*° semua aliran tersebut sudah mengarah ke profil normal seperti profil pada daerah *upstream*.

Dari gambar 4.14 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran secara dua dimensi pada bidang vertikal sepanjang *downstream straight* channel berupa grafik velocity profile. Grafik velocity profile dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari -0.5 sampai 0.5 pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{U}{U_{ref}}$ pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai y/D_h= -0.5 adalah posisi yang searah dengan sisi *lower*, sedangkan y/D_h= 0.5 adalah posisi yang searah dengan sisi *upper*.

Gambar 4.14.(a) kecepatan pada sudut bukaan damper 30° CW lebih besar daripada sudut bukaan damper 0°, 30° CCW dan tanpa damper. Kecepatan terendah pada sudut bukaan 30° CCW. Hal ini disebabkan bukaan damper 30°CCW menjadikan aliran terhambat oleh damper sebagai bodi pengganggu yang memperlambat kecepatan aliran sampai daerah section -1 seperti pada gambar 4.14.(b). Pada jarak x/D_h=3 dari outlet elbow 90°, sesudah melewati damper terjadi backflow pada sudut bukaan damper 30° CW dan 30°CCW karena adanya blockage effect yang menyebabkan timbulnya daerah wake pada section 1 gambar 4.14.(c). Pada section x/D_h= 4 kecepatan aliran pada sudut damper 30° CW masih dominan daripada kecepatan aliran pada sudut bukaan damper 0° dan 30° CCW gambar 4.14.(d). Setelah melalui damper sejauh 11 D_h terjadi recovery kecepatan aliran pada sudut bukaan damper 0° dan 30° CCW, namun tidak untuk bukaan 30° CW seperti pada gambar 4.14. (e). Kecepatan aliran pada sudut bukaan damper 0°, 30° CW dan 30° CCW belum normal kembali disebabkan karena masih adanya dampak aliran sekunder yang terjadi pada saluran searah bidang sejajar dengan *damper* seperti yang ditunjukan pada gambar 4.14. (f); (g); (h).

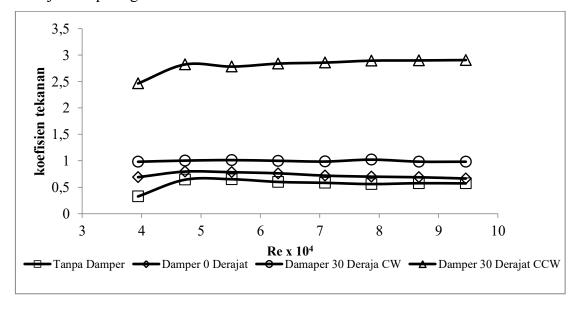


Gambar 4.14 grafik velocity profile bidang vertikal pada posisi x/D_h : a)-2; b)-1; c) 1; d) 2; e) 3; f) 4; g) 7; h) 11; i) 16

4.2.6 Koefisien Tekanan pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90*° Fungsi *Reynolds Number* dengan Variasi Tanpa *Damper* dan Sudut Bukaan *Double Damper 0*°, 30° CW dan 30° CCW

Pressure drop adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan penurunan tekanan dari satu titik ke titik lain dalam saluran. Pressure drop didapat karena adanya gaya gesek atau gaya hambat terhadap fluida ketika mengalir melintasi saluran. Pada eksperimen ini, pressure drop didapatkan dari data perbedaan tekanan dari pressure tap inlet upstream straight channel dan pressure tap outlet yang terdapat pada downstream straight channel dengan jarak 16D_h dari oulet elbow 90°.

Pada sub bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan karakteristik koefisien tekanan pada square duct dengan square elbow 90°. Koefisien tekanan merupakan bilangan tak berdimensi untuk menyatakan besarnya nilai pressure drop. Grafik dari nilai Koefisien tekanan dengan variasi Reynolds number $4x10^4 < ReDh < 10x10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) pada variasi tanpa damper sudut bukaan damper 0° , 30° CW, dan 30° CCW ditunjukkan pada gambar 4.15.



Gambar 4.15. Koefisien tekanan pada square duct & square elbow 90° dengan variasi Reynolds number $4x10^4 < ReDh < 10x10^5$.

Secara umum gambar 4.15 menunjukkan grafik hubungan antara koefisien tekanan dengan bilangan Reynolds. Dari grafik tersebut terlihat bawah besarnya nilai koefisien tekanan pada masing-masing sudut bukaan double damper 0°, 30° CW, 30°CCW, dan tanpa damper menunjukkan nilai yang berbeda. Nilai koefisien tekanan yang besar mengindikasikan besarnya nilai *pressure drop* yang terjadi pada saluran juga semakin besar.

Dari gambar 4.15. juga terlihat bahwa saluran tanpa damper memiliki nilai koefisien tekanan terendah bila dibandingkan dengan tambahan double damper. Dengan penambahan double damper akan meningkatkan *headloss* yang semakin besar. Kecepatan udara masuk pada sisi inlet akan meningkat karena pengaruh *blockage effect* yang diakibatkan oleh damper. Semakin besar *blockage effect* yang terjadi, maka kecepatan *freestream* akan jauh lebih cepat dari sebelumnya karena ada penyempitan area yang dilalui oleh fluida.

Pada bilangan Reynolds yang sama, nilai koefisien tekanan tertinggi dimiliki oleh sudut bukaan double damper 30° CCW. Sedangkan nilai terendah ada pada sudut bukaan double damper 0°. Sudut bukaan double damper 30° CCW memiliki nilai koefisien tekanan lebih tinggi dibandingkan dengan sudut bukaan double damper 30° CW. Hal ini disebabkan karena kecepatan maksimum pada sisi *outer wall* diarahkan oleh damper dengan sudut bukaan 30° CW kearah sisi *inner wall* sehingga dapat mereduksi *secondary flow* yang ada pada sisi inner wall. Sedangkan pada sudut bukaan double damper 30° CCW justru mengarakan kecepatan maksimum pada sisi outer wall sehingga menyebabkan koeefisien tekanan pada sudut bukaan double damper 30° CCW menjadi lebih besar.

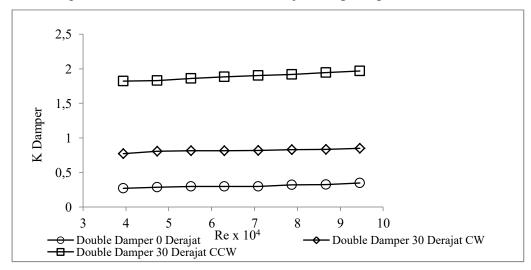
Dari seluruh variasi sudut bukaan *damper*, dapat dilihat bahwa pada sudut bukaan *damper* 0° memiliki *pressure drop* yang lebih rendah bila dibandingkan dengan sudut bukaan damper 30° CW dan 30° CCW. Prosentase kenaikan rata-rata bukaan damper 0° ke 30° CW sebesar 27,22%. Sedangkan Prosentase kenaikan bukaan damper 0° ke 30° CCW sebesar 74,10%. Prosentase kenaikan paling rendah

terjadi pada tanpa damper dengan bukaan sudut 0° yaitu sebesar 22.5%. Dengan demikian, bukaan sudut damper memberikan dampak yang begitu besar terhadap *pressure drop*.

4.2.7 Koefisien Losses Elbow 90° pada Square Duct dengan Square Elbow 90° Fungsi Reynolds Number dan Variasi Sudut Bukaan Double Damper 0°, 30°CW dan 30°CCW

Koefisien losses elbow 90° adalah nilai konstanta yang yang menentukan besar kecil head loss minor elbow 90° akibat pemasangan sebuah elbow 90°. Pada eksperimen ini, koefisien losses elbow 90° didapatkan dari data perbedaan tekanan dari pressure tap inlet elbow 90° dan pressure tap outlet elbow 90° (section -1) yang terdapat pada downstream straight channel.

Pada sub bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan karakteristik *koefisien* losses elbow 90° pada square duct & square elbow 90°. Grafik dari nilai koefisien losses elbow 90° fungsi variasi Reynolds number $4x10^4$ <Re_{Dh}< $10x10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi sudut bukaan damper $0^{\circ}30^{\circ}$ CW dan 30° CCW ditunjukkan pada gambar 4.16.



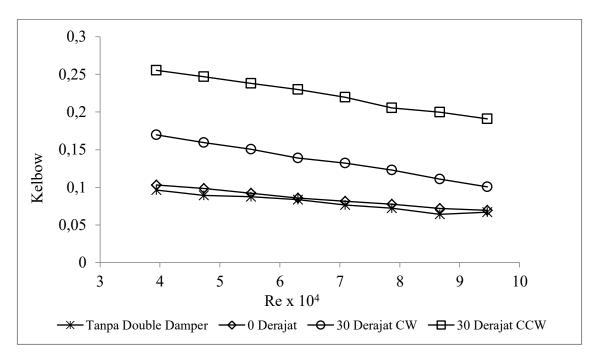
Gambar 4.16. Koefisien losses elbow 90° pada square duct & square elbow 90° fungsi Reynolds number $3.94 \mathrm{x} 10^4 < \mathrm{Re_{Dh}} < 10^5$ pada masing-masing sudut bukaan double damper.

Pada grafik gambar 4.16. terlihat bahwa *Trendline* grafik semakin menurun seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds pada masing-masing variasi sudut bukaan damper. Akan tetapi, terilihat ada peningkatan nilai *koefisien losses elbow* 90° yang lebih besar pada sudut bukaan damper 30° CCW sebesar 62.03% bila dibandingkan dengan sudut bukaan damper 0°. Peningkatan sebesar 36,97% juga terjadi pada sudut bukaan damper 30° CW terhadap sudut bukaan damper 0°. Prosentase kenaikan paling rendah terjadi pada tanpa damper dengan bukaan sudut 0° yaitu sebesar 6.30%.

4.2.8 Koefisien Losses Damper pada Square Duct dan Square Elbow 90° Fungsi Reynolds Number dengan Variasi Sudut Double Damper 0°, 30°CW, dan 30°CCW

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90*° berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *damper* pada jarak 2D_h dari *outlet elbow 90*°. Pemasangan damper akan mengakibat *koefisien losses damper* pada saluran. *Koefisien losses damper* adalah nilai konstanta yang yang menentukan besar kecil *headloss minor damper* akibat pemasangan sebuah damper. Pada eksperimen ini, *koefisien losses damper* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet* sebelum *damper* (*section -1*) dan sesudah *damper* (*section 1*) yang terdapat pada *downstream straight channel*.

Pada sub bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan karakteristik *koefisien* losses damper pada square duct dengan square elbow 90°. Grafik dari nilai koefisien losses damper fungsi variasi Reynolds number $4 \times 10^4 < \text{Re}_{Dh} < 10 \times 10^4$ pada masing-masing sudut bukaan damper 0°, 30° CW dan 30° CCW ditunjukkan pada gambar 4.17.

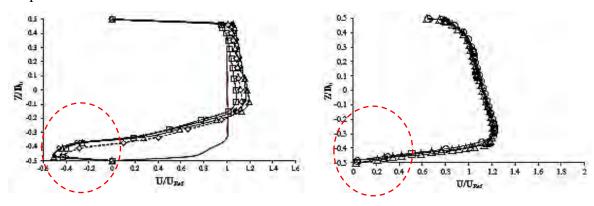


Gambar 4.17. Koefisien losses damper pada square duct & square elbow 90° fungsi Reynolds number pada masing-masing sudut bukaan damper.

Gambar 4.17. terlihat bahwa dengan adanya damper sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *koefisien losses damper* yang lebih besar. Pada setiap variasi *Reynolds number*, nilai *koefisien losses damper* mengalami kenaikan pada sudut bukaan damper 30° CW dan 30° CCW. *Trendline* grafik meningkat mulai *Reynolds number* terendah hingga teringgi. Prosentase kenaikan rata-rata bukaan damper 0° ke 30° CW sebesar 62,63%. Sedangkan Prosentase kenaikan bukaan damper 0° ke 30° CCW sebesar 83,85%.

4.3 Diskusi

Sub-bab ini membahas tentang perbandingan hasil yang diperoleh dari penelitian secara simulasi dengan hasil eksperiment. Terdapat beberapa hal yang bisa dibandingkan antara keduanya, diantaranya adalah bentuk profil kecepatan yang berdeda pada sisi outlate elbow $(x/D_h=-2)$. Seperti yang terlihat pada gambar 4.18 ada perbedaaan profil kecepatan pada sisi *inner wall* antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen, secara simulasi tidak nampak adanya back flow yang terjadi pada sisi *inner wall* sedangkan secara eksperiment nampak jelas terjadi back flow aliran pada sisi *inner wall*. Selain itu, dari hasil numerik menunjukkan data yang lebih *continue* karena data yang dihasilkan lebih banyak dibandingkan dengan hasil eksperiment.

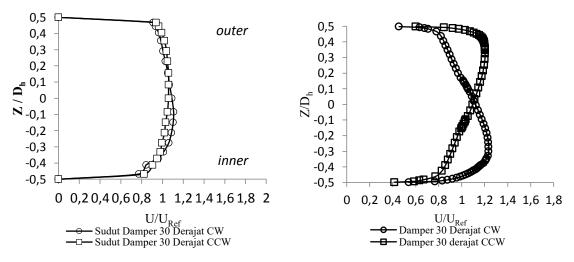


a) Profil kecepatan hasil eksperiment

b) Profil kecepatan hasil eksperiment

Gambar 4.18 Perbedaaan profil kecepatan antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen pada posisi $x/D_h=-2$.

Perbedaan profil kecepatan yang terjadi antara hasil simulasi dengan hasil eksperiment berikutnya yaitu mengenai posisi *recovery* aliran. Secara eksperimen, proses *recovery* aliran terjadi lebih cepat untuk bukaan sudut double damper 30° CCW. Hal ini disebabkan karena kecepatan maksimum pada sisi *outer wall* yang terjadi sebelum damper terhalang akibat defleksi damper. Sehingga aliran cenderung mengarah ke sisi *centerline* dan *inner wall*. Selain itu masih terpengaruh oleh *secondary flow* yang terjadi pada sisi *inner wall*. Sedangkan secara simulasi belum nampak terjadi adanya *recovery* aliran hingga jarak 16 D_h (Gambar 4.19).



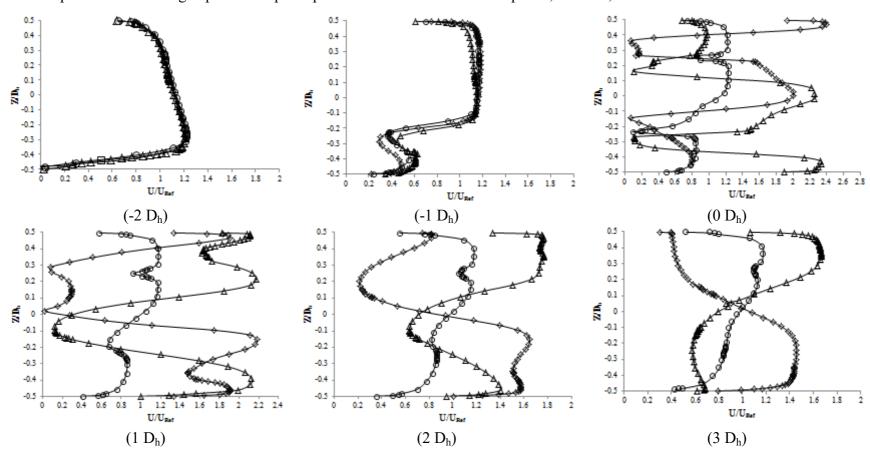
Gambar 4.19 Profil kecepatan pada jarak 16 Dh; a) secara eksperiment b) secara numerik

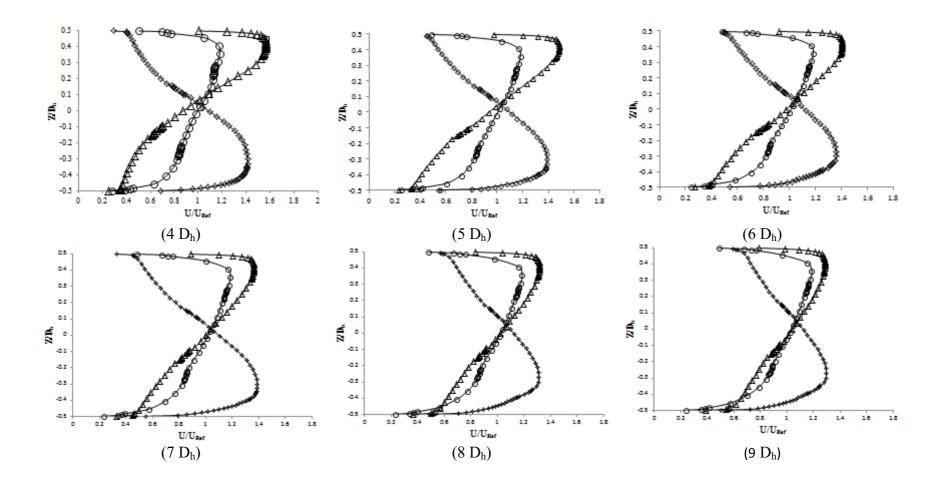
Pressure drop yang dihasilkan dari eksperiment menunjukan pada sudut bukaan double damper 30° CCW menghasilkan nilai yang lebih besar dari pada sudut bukaan 30° CW. Hal tersebut terjadi karena pada sudut bukaan double damper 30° CCW pada saat sebelum melewati damper kecepatan maksmimum fluida seolah-olah masuk nozzle sehingga diarahkan menuju daearah favourable pressure. Pada daerah tersebut fluida yang melewati akan memiliki kecepatan yang semakin meningkat dan tekanan yang semakin rendah sehingga Pressure drop yang dihasilkan juga semakin besar. Sedangkan pada sudut bukaan double damper 30° CW kecapatan maskimum pada sisi inner wall di arahkan menuju daerah adverse pressure gradient. Pada daerah tersebut memiliki nilai tekanan yang besar sehingga kecepata aliran fluida menurun. Dengan kecepatan aliran yang semakin menurun maka Pressure drop yang dihasilkan semakin kecil.

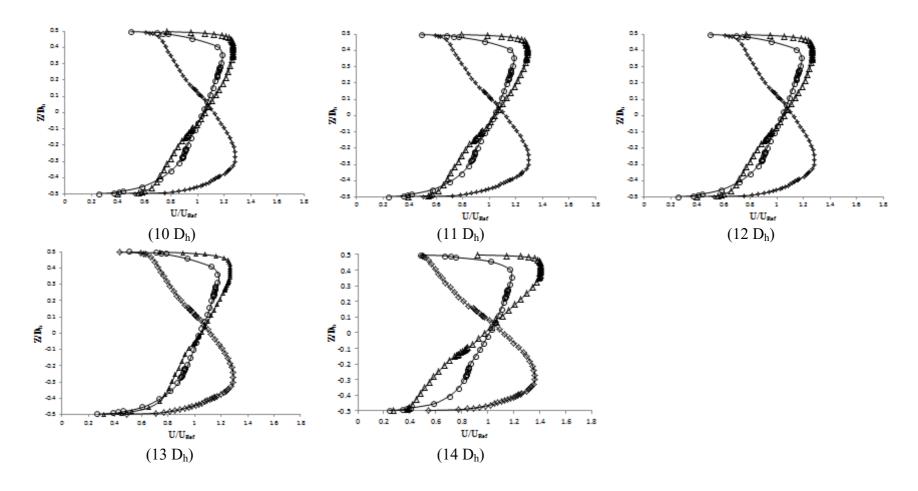
Berbeda dengan sudut bukaan double damper 30° CCW, dimana arah defleksi damper mengarah ke sisi *outer wall*. Sedangkan pada sudut bukaan double damper 30° CW aliran fluida didefleksikan kearah *inner wall* sehingga momentum aliran meningkat, dengan semakin meningkatnya momentum aliran akan memberikan energi tambahan pada fluida yang mengalir kearah *inner wall* sehingga mampu mereduksi secondary flow pada sisi *inner wall*.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perbandingan profil kecepatan pada sudut bukaan double damper 0°, 30° CW, dan 30° CCW secara simulasi

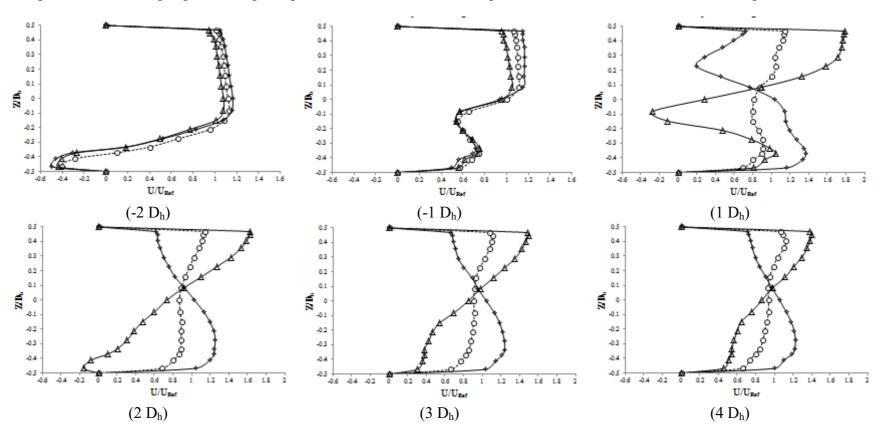


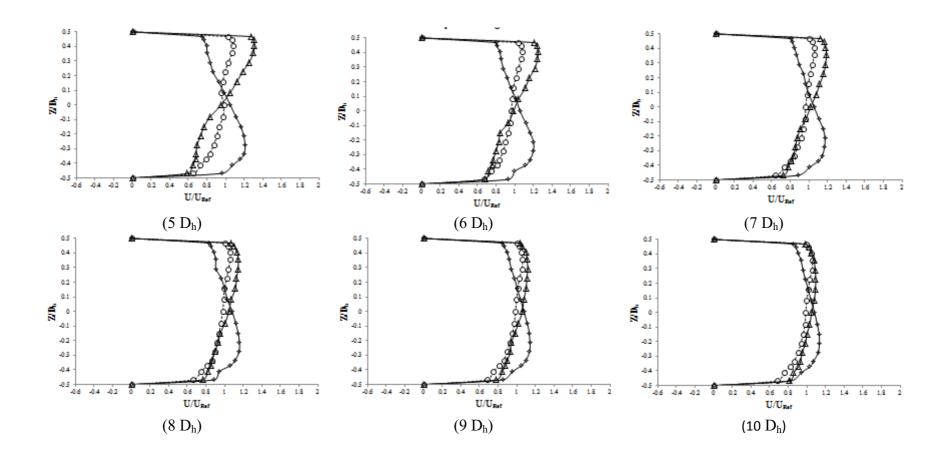


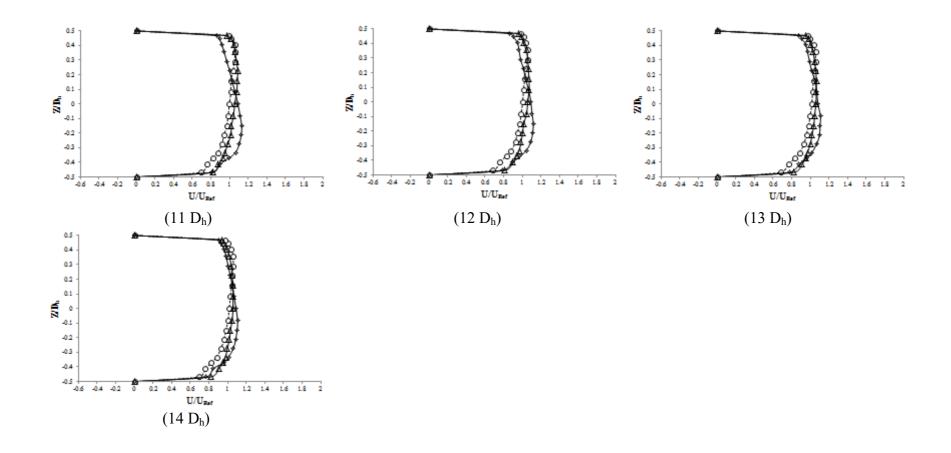


- → Damper 0 Derajat - → Damper 30 Derajat CW - Damper 30 Derajat CCW

Lampiran 2. Perbandingan profil kecepatan pada sudut bukaan double damper 0°, 30° CW, dan 30° CCW secara eksperimen







- → Damper 0 Derajat - → Damper 30 Derajat CW - Damper 30 Derajat CCW

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan Hasil Penelitian

Penelitian yang mengkaji tentang fenomena aliran yang melewati *square duct* dan *square elbow* 90° dan pengaruh penambahan *double damper* dengan sudut bukaan damper 0°, 30° CW dan 30° CCW terhadap *pressure drop* aliran menghasilkan data kuantitaif dan kualitatif. Data kuantitatif diperoleh dari hasil eksperiment yang nantinya akan disajika dalam bentuk grafik. Grafik yang dihasilkan berupa profil kecepatan, pressure drop variasi bilangan Reynolds, grafik koefisien *losses elbow* dan grafik koefisien *losses double damper*. Data kualitatif dihasilkan dari hasil simulasi berupa plot vektor kecepatan dan pathline kecepatan.

Berdasarkan pada data hasil penenelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya dapat di ambil kesimpulan sebagai berikut.

- 1. Perlambatan aliran terjadi sesaat sebelum melalui *double damper* pada semua variasi sudut bukaan damper 0°, 30° CW dan 30° CCW baik secara simulasi maupun secara eksperimen. Hal ini disebabkan adanya *blockage effect* akibat terbentuknya aliran sekunder pada sisi *inner* dekat dinding, daerah ini memiliki momentum yang lebih rendah daripada sisi *outer* dekat dinding.
- 2. Variasi sudut bukaan damper 0°, 30° CW, dan 30°CCW mempengaruhi profil kecepatan yang dihasilkan. Setelah melewati damper kecepatan maksimum mengarah ke sisi outer pada sudut bukaan damper 30° CW
- 3. Proses *recovery* aliran pada sudut bukaan damper 30° CCW lebih cepat terjadi jika di bandingkan dengan variasi bukaan damper 0° dan 30° CW. *Recovery* aliran terjadi pada posisi 16 D_h
- 4. Penempatan *damper* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih besar dengan semakin meningkatnya *Reynolds number* pada setiap sudut bukaan *damper*. Prosentase kenaikan rata-rata bukaan damper 0° ke 30°

- CW sebesar 27,22%. Sedangkan Prosentase kenaikan bukaan damper 0° ke 30° CCW sebesar 74,10%.
- 5. Peningkatan rata-rata nilai *koefisien losses elbow* 90° pada sudut bukaan damper 30° CCW sebesar 62.03% bila dibandingkan dengan sudut bukaan damper 0°. Peningkatan sebesar 36,97% pada sudut bukaan damper 30° CW terhadap sudut bukaan damper 0°.
- 6. Prosentase kenaikan rata-rata bukaan damper 0° ke 30° CW sebesar 62,63%. Sedangkan Prosentase kenaikan bukaan damper 0° ke 30° CCW sebesar 83,85%.

5.2 Saran

Adapun saran yang diperlukan untuk kedepannya adalah sebagai berikut.

- 1. Secara eksperiment, diperlukan peralatan yang berkualitas baik sehingga didapatkan hasil yang akurat. Sedangkan secara simulasi, diperlukan pengaturan meshing yang baik sehingga didapatkan data yang akurat.
- 2. Pada saat pengambilan data, kondisi ruangan yang stabil harus dikontrol agar data yang diperoleh baik.
- 3. Diperlukan adanya kajian eksperimen dan simulasi dengan variasi penempatan damper pada jarak D_h dari *outlet elbow 90*°, variasi radius *elbow 90*° dan jumlah damper agar dapat dibandingkan hasil eksperimen fenomena aliran yang terjadi dengan pengaruh dari variasi tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, D.Y. (1994). "Laminar Flow Elbow System and Method". U.s. Patent Documents, No. 5,323,661.
- Danbon, F. dan Solliec, C. (2000). "Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque". Nantes: Ecole des Mines de Nantes, Dèpartement Systémes.
- Dutta, Prasun & Nandi, Nityananda. (2015). "Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bend". Mechanics and Mechanical Engineering. Vol. 19 No. 1. India.
- Edo, Edgar S.P & Wawan, A. W. (2016). "Simulasi Numerik Aliran Tiga Dimensi Melalui Rectangular Duct dengan Variasi Bukaan Damper". Tugas Akhir. Teknik Mesin ITS Surabaya.
- Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2010. "Introduction to Fluid Mechanics, 7th edition". New York: John Wiley and Sons.
- Jeon S.Y, J.Y Yoon and M.S Shin. (2010). "Flow Characteristics and Performance Evaluation of Butterfly Valves using Numerical Analysis". Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Haengdang-dong. Republic of Korea
- Miller, D.S. (1990). Internal Flow System, 2nd editio. Bedford: BHRA
- Nakayama Y., dan Boucher R.F.1998. *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford:Butterworth-Heinemann.
- Rup, K., dan Sarna, P. (2011). "Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow". *Flow measuremet and instrumentation* Cracow: Elsevier.
- Shi-Ming Deng &John Burnett. 2000. "A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong". *Energy and Buildings*. Vol. 31. Department of Building SerÕices Engineering. Hongkong.

RIWAYAT HIDUP



Luthfi Hakim lahir di Ds. Raci Wetan Kec. Bungah, Kabupaten Gresik pada tanggal 24 Agustus 1987, merupakan anak keempat dari pasangan Suami istri Bpk. Asykuri dan Ibu Futicha. Penulis memulai pendidikan pada jenjang sekolah dasar (SD/MI) pada tahun 1993 di MI HAYATUL WATHON Gresik, selanjutnya meneruskan pendidikannya di Madrasah Tsanawiyah

(MTs) NURUL HUDA Gresik Tahun 2003. Setelah menyelesaikan pendidikan Tsanawiyah, penulis melanjutkan studi di Sekolah Menengah Atas (SMA) Tahun 2006, kemudian penulis melanjutkan kuliah di Universitas Negeri Malang (UM) Prodi S.1 Pendidikan Fisika MIPA (Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam). Setelah lulus, penulis menjadi guru mata pelaja fisika di SMK PGRI 3 malang dan SMP Brawijaya Smart School kota Malang dan sempat menjadi tentor fisika di lembaga bimbingan belajar ternama di Malang. Peneliti kemudian mengikuti beasiswa BPPDN Calon Dosen 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal) dengan mengikuti pendidikan Pra S2 Fisika di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) selama 1 tahun. Selanjutnya mulai melanjutkan studi S2 tahun 2014 di Jurusan Teknik Mesin ITS. Penulis bergabung di Laboratorium fluida dan melakukan penelitian tesis bertemakan tentang karakteristik aliran yang melewati suatu saluran. Penelitian ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Magister Teknik (MT).

Email: luthfi14@mhs.me.its.ac.id

Hp: 085790947905