



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM141585**

**STUDI NUMERIK ALIRAN PADA *ELBOW 90° SINGLE  
GUIDEVANE* DIBERI *CIRCURAL DISTURBANCE BODY*  
PADA *INNER UPSTREAM* VARIASI JARAK  
LONGITUDINAL**

**ARIF RAHMAN  
NRP. 0211164500054**

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

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



---

TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI NUMERIK ALIRAN PADA *ELBOW 90° SINGLE  
GUIDEVANE* DIBERI *CIRCURAL DISTURBANCE BODY*  
PADA *INNER UPSTREAM* VARIASI JARAK  
LONGITUDINAL**

ARIF RAHMAN  
NRP. 02111645000054

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

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



---

FINAL PROJECT – TM141585

**NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH ELBOW $90^\circ$   
SINGLE GUIDEVANE WITH CIRCULAR DISTURBANCE  
BODY ON THE INNER UPSTREAM AND  
LONGITUDINAL DISTANCE VARIATIONS**

ARIF RAHMAN  
NRP. 02111645000054

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

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

**STUDI NUMERIK ALIRAN PADA *ELBOW 90° SINGLE  
GUIDEVANE* DIBERI *CIRCULAR DISTURBANCE  
BODY* PADA *INNER UPSTREAM* VARIASI JARAK  
LONGITUDINAL**

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh :

**ARIF RAHMAN**

NRP. 02111645000054

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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

**SURABAYA**

**JULI, 2018**

**Studi Numerik Aliran Pada *Elbow 90° Single Guidevane*  
diberi *Circural Disturbance Body* pada *Inner Upstream*  
Variasi Jarak Longitudinal**

**Nama Mahasiswa** : Arif Rahman  
**NRP** : 02111645000054  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI – ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

**ABSTRAK**

Sebuah Saluran Ventilasi dan *Air Conditioning* merupakan teknologi yang secara luas diterapkan dalam arsitektur modern. Bangunan yang dibangun secara vertikal seperti gedung perkantoran, apartement, dan pusat perbelanjaan umumnya membutuhkan tata saluran udara, baik sebagai saluran pendingin maupun mensirkulasikan udara saja. Dalam instalasi saluran ini, umumnya menyumbang 40% dari total kerugian. Jadi mengoptimalkan sistem saluran ini sangat penting dalam meningkatkan pemanfaatan energi, menghemat energi, dan mengurangi emisi. Instalasi-instalasi saluran fluida tidak hanya menggunakan sistem perpipaan dengan pipa lurus, melainkan dapat juga menggunakan pembelokan aliran, penggabungan aliran, ataupun percabangan aliran. Hal tersebut sering kita sebut dengan istilah *fitting* perpipaan. Salah satu penggunaan *fitting* perpipaan adalah dengan menggunakan *elbow 90°*. Pemasangan *fitting* perpipaan ini akan membuat aliran di dalam *elbow* mengalami *pressure drop* yang lebih besar karena adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah melewati aksesoris tersebut. Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi di dalam *elbow 90°* adalah menambahkan sebuah bodi pengganggu berupa *guidevane* ataupun silinder *Circural Disturbance Body*.

Penelitian ini dilakukan secara numerik, menggunakan piranti lunak *CFD* komersial. Model turbulensi yang digunakan *k- $\omega$  Standart* dengan aliran fluida bersifat *incompressible flow*,

*viscous* serta *steady flow*. Model uji berupa saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*) dengan  $D_h = 125 \text{ mm}$  yang terdiri dari : *upstream duct (straight duct)* dengan panjang  $7D_h$ , *Circular Disturbance Body* berbentuk *cylinder* dengan  $D = 5 \text{ mm}$ , *square elbow 90°*  $R/D_h=1.5$  dengan *single guidevane*, dan dilengkapi *downstream duct (straight duct)* dengan panjang  $25D_h$ . Penelitian dilakukan dengan variasi jarak  $l/D_h = 0.1$ ,  $0.3$  dan  $0.5$  pada sisi *inner upstream* dengan *gap*  $g/d=0.2$  dan variasi kecepatan sebesar  $2 \text{ m/s}$ ,  $6 \text{ m/s}$ , dan  $12 \text{ m/s}$ . Pengambilan data dilakukan pada setiap *cross section* pada *elbow 90°* serta sepanjang *downstream duct*.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu nilai *pressure drop* pada saluran yang diberi *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.1$  dapat direduksi pada bilangan *Reynolds*  $Re_{D_h}=1.6 \times 10^4$ . Penambahan *CDB* ternyata efektif untuk meningkatkan momentum aliran didalam *elbow 90°* dan mamupu menunda separasi aliran yang terjadi. Fenomena aliran fluida seperti *velocity profil* dan *secondary flow* yang terjadi pada *elbow 90°* dan *downstream duct* sudah mampu menggambarkan perbedaan antara saluran dengan dan tanpa *CDB*.

**Kata kunci:** *Circular Disturbance Body, Variasi jarak, Pressure Drop, Square Duct*

***Numerical Study of Flow Through Elbow90° Single Guidevane  
with Circural Disturbance Body On The Inner Upstreamt and  
Longitudinal Distance Variations***

***Name of Student*** : Arif Rahman  
***NRP*** : 02111645000054  
***Department*** : *Mechanical Engineering FTI-ITS*  
***Lecturer*** : *Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.*

***Abstract***

*The ventilation ducts and Air Conditioning is a technology which is widely applied in modern architecture. Buildings built vertically like office buildings, apartements and shopping store which require of the air duct, as both a cooling duct or air circulation. In he instalation of the channel, generally accounts for 40% of total losses energy. So optimizing the system channel is very important in increasing the utilization of energy, save energy and reduce emissions. Instalations channel of piping system using not only with straight pipes, but also use the bending of flow, the incorporation of flow or flow branching. It is called by term of fitting channel. One of fitting channel is used of elbow90°. Instalation of fitting channel will make the flow in elbow90° experienced a greater pressure drop due to friction loss, separation loss and secondary flow. One of the efforts to reduce the presure drop that occurred in the elbow90° is adding a guidevane or circural disturbance body.*

*This research is done numerically, using commercial CFD software. Turbulance model used  $k\omega$ -standart will fluid flow are incompressible, viscous and steady flow. Model test of channel of square duct with  $D_h = 125$  mm consistinf of: upstream duct length  $7D_h$ , Circuraldicturbance body shaped cylinder with  $d=5$  mm, square elbow90°  $R/D_h=1.5$  with single guidevane and equipped with a downstream duct the length of  $25 D_h$ . Research done by variation of the distance  $l/D_h = 0.1, 0.3$  and  $0.5$  on the inner side of the upstream with gap  $g/d=0.2$  and variation of*

speed is 2, 6 and 12 m/s. Data retrieval is performed at each cross section on elbow $90^\circ$  and along the downstream duct.

The results obtained from this research that is the value of the pressure drop at a given channel CDB with a distance  $l/D_h=0.1$  can be reduced on the Reynolds number  $Re_{D_h}=1.6 \times 10^4$ . The addition of the CDB to be effective to increase the momentum of flow in the elbow $90^\circ$  and was able to delay flow separation which occurs. Phenomena such as fluid velocity profile and the secondary flow that occurs in elbow $90^\circ$  and downstream duct is already able to describe the difference between channels with and without the CDB.

**Keyword: Circural Disturbance Body, Distance variations, Pressure Drop, Square Duct**

## KATA PENGANTAR

Bismillaahirrahmaanirrahiim,

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

**“Studi Numerik Aliran Pada *Elbow 90° Single Guidevane*  
diberi *Circural Disturbance Body* pada *Inner Upstream*  
Variasi Jarak Longitudinal”**

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

1. Bapak Ibrahim dan Ibu Mujilah selaku orang tua penulis yang selalu memberikan doa kesuksesan serta dukungan dalam bentuk apapun.
2. Auliya Rahman selaku kakak yang selalu memberikan motivasi dan dukungan dalam bentuk apapun.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan ide, arahan, bimbingan dan motivasi selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Ir.Bambang Pramujati, M.Sc.Eng.,Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
5. Ibu Vivien Suphandani, ST., ME., P.hD. selaku dosen wali penulis yang selalu membimbing dan mengarahkan penulis dalam pengambilan mata kuliah dari awal mahasiswa baru sampai saat ini.
6. Bapak Sutrisno selaku teknisi Laboratorium Mekanika Fluida Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu

pengetahuan dan membantu penulis dalam jalannya pengambilan data di laboratorium.

7. Segenap staff dan karyawan Jurusan Teknik Mesin yang telah membantu dan memberi ilmu pengetahuan selama penulis menimba ilmu di jurusan Teknik Mesin ini.
8. Zidqi Oddie Matovani, Dheka Arga Utama, Ahmad Hisyam, Nurul Fajri Al Farizi Putra, Aulia Azizah selaku rekan Tugas Akhir penulis yang telah menyisihkan banyak waktu untuk mengerjakan buku Tugas Akhir ini.
9. Seluruh keluarga mahasiswa LJ 2016 Teknik Mesin yang selalu membantu bersama.
10. Supto Wisasno, Egie Ardiyono selaku rekan kost yang memberi semangat dan juga canda tawa saat jenuh menyelesaikan buku tugas akhir ini.

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

Surabaya, 13 July 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv

### **BAB I PENDAHULUAN**

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

### **BAB II DASAR TEORI**

2.1 Mekanika Fluida .....	7
2.2 Klasifikasi Aliran Fluida .....	7
2.3 Fluida <i>Newtonian</i> dan <i>non-Newtonian</i> .....	8
2.4 Aliran <i>Viscous</i> dan <i>Inviscid</i> .....	9
2.5 Aliran <i>Laminar</i> dan <i>Turbulent</i> .....	10
2.6 Aliran <i>Incompressible</i> dan <i>Compressible</i> .....	12
2.7 Aliran <i>Internal</i> .....	12
2.7.1 Fenomena Aliran <i>Internal</i> .....	12
2.7.2 Separasi Aliran .....	13
2.7.3 Aliran Sekunder ( <i>Secondary Flow</i> ) .....	14
2.8 Persamaan <i>Euler</i> dalam Koordinat <i>Streamline</i> .....	15
2.9 <i>Coefficient of Pressure (Cp)</i> .....	17
2.10 <i>Grid Independency</i> .....	18
2.11 Model Turbulensi .....	18
2.11.1 Model <i>k-ε</i> .....	18
2.11.2 Model <i>k-ω</i> .....	19

2.12 Intensitas Turbulensi .....	20
2.13 <i>Boundary Condition</i> .....	20
2.14 Kondisi Aliran Dekat Dinding.....	21
2.15 Penelitian Terdahulu.....	22

### **BAB III METODOLOGI**

3.1 Geometri <i>Ducting</i> .....	35
3.2 Metode Numerik.....	37
3.2.1 Tahap <i>Pre-Processing</i> .....	37
3.2.2 Tahap <i>Processing</i> .....	39
3.3 Langkah – Langkah Penelitian .....	42
3.4 Analisa <i>Grid Independency</i> .....	43
3.5 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	45

### **BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN**

4.1 Perbandingan Data Kuantitatif Setiap Variasi Model <i>Ducting</i> pada Setiap Variasi Kecepatan .....	47
4.1.1 <i>Pressure Drop</i> .....	47
4.1.2 <i>Coefficient of Pressure</i> .....	54
4.2 Perbandingan Distribusi <i>Velocity Profile</i> sepanjang <i>Ducting</i> dengan <i>Countur Velocity</i> . .....	56
4.2.1 Perbandingan Distribusi Vektor Kecepatan Sepanjang <i>Ducting</i> dengan Kontur Kecepatan (tanpa <i>CDB</i> dan dengan <i>CDB</i> $l/D_h=0.1$ ) .....	57
4.2.2 Perbandingan Distribusi Vektor Kecepatan Sepanjang <i>Ducting</i> dengan Kontur Kecepatan (tanpa <i>CDB</i> dan dengan <i>CDB</i> $l/D_h=0.3$ ) .....	61
4.2.3 Perbandingan Distribusi Vektor Kecepatan Sepanjang <i>Ducting</i> dengan Kontur Kecepatan (tanpa <i>CDB</i> dan dengan <i>CDB</i> $l/D_h=0.5$ ) .....	65

4.2.4 Perbandingan Distribusi Intensitas Turbulensi pada daerah <i>Elbow</i> 90° (tanpa <i>CDB</i> dan dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0.1; 0.3$ dan $0.5$ ) .....	69
4.3 Perbandingan Kontur Kecepatan dan <i>Streamline</i> setiap <i>Surface Cross-section</i> dengan dan Tanpa <i>CDB</i> pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	70
4.3.1 Visualisai Kontur Kecepatan dan <i>streamline</i> pada posisi <i>upstream</i> dengan dan Tanpa <i>CDB</i> pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	71
4.3.2 Visualisai Kontur Kecepatan dan <i>streamline</i> setiap <i>cross-section</i> Tanpa <i>CDB</i> pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	72
4.3.3 Visualisai Kontur Kecepatan dan <i>streamline</i> setiap <i>cross-section</i> dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0.1$ pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	75
4.3.4 Visualisai Kontur Kecepatan dan <i>streamline</i> setiap <i>cross-section</i> dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0.3$ pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	77
4.3.5 Visualisai Kontur Kecepatan dan <i>streamline</i> setiap <i>cross-section</i> dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0.5$ pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	80
4.3.6 Visualisai Kontur Kecepatan dan <i>streamline</i> pada posisi $x/D_h = 24$ dengan dan Tanpa <i>CDB</i> pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	82

## **BAB V PENUTUP**

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

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## **BIODATA PENULIS**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 2011) .....	8
Gambar 2.2	<i>Shear stress vs rate of shear strain</i> (Fox dan Mc. Donald, 2011).....	9
Gambar 2.3	Aliran <i>viscous</i> dan <i>inviscid</i> melewati plat datar (Fox dan Mc. Donald, 2011).....	10
Gambar 2.4	Perbedaan <i>boundary layer</i> aliran <i>laminar</i> dan <i>turbulent</i> (Incopera, 2011).....	11
Gambar 2.5	<i>Internal flow</i> pada pipa (Incopera, 2011).....	13
Gambar 2.6	Separasi aliran pada <i>curved pipe</i> (Danbon&Sollic,2000).....	14
Gambar 2.7	Aliran ideal pada lengkungan (Miller, 1999).....	14
Gambar 2.8	Aliran sekunder (Miller, 1999).....	15
Gambar 2.9	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> (Fox dan Mc. Donald, 2011).....	16
Gambar 2.10	a) Posisi pengambilan data pada <i>domain</i> uji b) Mesh pada <i>Volume</i> . (Rup & Sarna 2011) .....	22
Gambar 2.11	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ (Rup & Sarna 2011).....	23
Gambar 2.12	Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen. (Rup & Sarna 2011) .....	24
Gambar 2.13	Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya (Dutta dan Nandi 2015).....	25
Gambar 2.14	<i>Velocity profile</i> pada sudut $0^\circ$ , $30^\circ$ , $60^\circ$ , dan $90^\circ$ dengan variasi <i>curvature ratio</i> ( $R_c/D = 1 - 5$ ) (Dutta dan Nandi 2015).....	25
Gambar 2.15	Variasi sisi <i>inner</i> dan <i>outer</i> pada <i>elbow</i> .....	26
Gambar 2.16	Skema Instalasi Penelitian (Hardian,2017).....	27
Gambar 2.17	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow 90°</i> dengan variasi <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak	

	<i>inlet disturbance body</i> $0,1D_h - 0,5D_h$ (Hardian, 2017) .....	28
Gambar 2.18	Koefisien <i>Losses Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i> dengan variasi <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak <i>inlet disturbance body</i> $0,1D_h - 0,5D_h$ (Hardian, 2017).....	29
Gambar 2.19	Distribusi $C_p$ pada sisi <i>inner</i> dan <i>outer</i> tanpa <i>guidevane</i> (Sutardi,dkk,2017).....	31
Gambar 2.20	Distribusi $C_p$ pada sisi <i>inner</i> dan <i>outer</i> dengan <i>guidevane</i> (Sutardi,dkk,2017).....	31
Gambar 2.21	<i>Geometri</i> simulasi (Gigih,2017) .....	32
Gambar 2.22	<i>Mean streamwise velocity profiles</i> pada $X = 100, 150, \text{ dan } 200 \text{ mm}$ ; $AR = 1$ ; — tanpa silinder; $\diamond$ $G/B = 0,5$ ; $\blacklozenge$ $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010) .....	33
Gambar 3.1	<i>Geometri straight duct , square elbow 90°</i> , serta bodi pengganggu .....	36
Gambar 3.2	Gambar detail posisi penempatan bodi silinder pengganggu (a) dan bentuk variasi diameter silinder sirkular (b) .....	37
Gambar 3.3	<i>Meshing square ducting</i> tampak <i>isometri</i> .....	38
Gambar 3.4	Gambar detail <i>meshing square ducting</i> tampak atas .....	38
Gambar 3.5	Domain permodelan <i>square duct</i> .....	40
Gambar 3.6	Posisi pengambilan data ( <i>cross section</i> ). .....	41
Gambar 3.7	<i>Pressure drop vs mesh Cells</i> .....	44
Gambar 3.8	<i>Average velocity vs mesh Cells</i> pada $x/Dh=2$ .....	44
Gambar 3.9	<i>Flow chart</i> penelitian numerik.....	46
Gambar 4.1	Grafik <i>Pressure drop</i> terhadap <i>Reynolds number</i> untuk semua variasi <i>ducting</i> untuk pengambilan <i>overall</i> . .....	49
Gambar 4.2	Grafik <i>Pressure drop</i> terhadap <i>Reynolds number</i> untuk semua variasi <i>ducting</i> untuk pengambilan di <i>upstream duct</i> . .....	50

Gambar 4.3	Grafik <i>Pressure drop</i> terhadap <i>Reynolds number</i> untuk semua variasi <i>ducting</i> untuk pengambilan di <i>elbow90°</i> . .....	52
Gambar 4.4	Grafik <i>Pressure drop</i> terhadap <i>Reynolds number</i> untuk semua variasi <i>ducting</i> untuk pengambilan di <i>downstream duct</i> . .....	53
Gambar 4.5	<i>Coefficient of Pressure</i> pada <i>elbow90°</i> dengan variasi jarak <i>CDB</i> $l/D_h = 0,1; 0,3; 0,5$ dan variasi <i>Reynolds number</i> sebesar $4,8 \times 10^4$ .....	55
Gambar 4.6	<i>Coefficient of Pressure</i> pada <i>ducting overall</i> dengan variasi tanpa dan dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0,1$ dan variasi <i>Reynolds number</i> sebesar $1,6 \times 10^4$ .....	55
Gambar 4.7	Perbandingan profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran tanpa dan dengan <i>CDB</i> ( $l/D_h = 0,1$ ) pada bidang <i>horizontal</i> dengan variasi $Re_{Dh} = 1,6 \times 10^4$ .....	57
Gambar 4.8	Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>CDB</i> ( $l/D_h = 0,1$ ) pada variasi $Re_{Dh} = 1,6 \times 10^4$ .....	60
Gambar 4.9	Perbandingan profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran tanpa dan dengan <i>CDB</i> ( $l/D_h = 0,3$ ) pada bidang <i>horizontal</i> dengan variasi $Re_{Dh} = 1,6 \times 10^4$ .....	61
Gambar 4.10	Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>CDB</i> ( $l/D_h = 0,3$ ) pada variasi $Re_{Dh} = 1,6 \times 10^4$ .....	64
Gambar 4.11	Perbandingan profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran tanpa dan dengan <i>CDB</i> ( $l/D_h = 0,5$ ) pada bidang <i>horizontal</i> dengan variasi $Re_{Dh} = 1,6 \times 10^4$ .....	65
Gambar 4.12	Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>CDB</i> ( $l/D_h = 0,5$ ) pada variasi $Re_{Dh} = 1,6 \times 10^4$ .....	68
Gambar 4.13	Intensitas turbulensi tanpa dan dengan <i>CDB</i> ( $l/D_h = 0,1; 0,3$ dan $0,5$ ) pada variasi $Re_{Dh} = 1,6 \times 10^4$ .....	70

Gambar 4.14	Kontur <i>streamline</i> pada <i>ducting</i> tanpa dan dengan <i>CDB</i> pada posisi 6Dh <i>upstream duct</i> dengan $Re_{Dh}=1.6 \times 10^4$ .....	71
Gambar 4.15	Kontur <i>streamline</i> pada <i>ducting</i> tanpa dan dengan <i>CDB</i> pada posisi 1Dh <i>upstream duct</i> dengan $Re_{Dh}=1.6 \times 10^4$ .....	72
Gambar 4.16	Kontur kecepatan dan <i>streamline</i> pada <i>ducting</i> tanpa <i>CDB</i> setiap <i>cross-section</i> dengan $Re_{Dh}=1.6 \times 10^4$ .....	73
Gambar 4.17	Kontur kecepatan dan <i>streamline</i> pada <i>ducting</i> dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0.1$ setiap <i>cross-section</i> dengan $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	76
Gambar 4.18	Kontur kecepatan dan <i>streamline</i> pada <i>ducting</i> dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0.3$ setiap <i>cross-section</i> dengan $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	79
Gambar 4.19	Kontur kecepatan dan <i>streamline</i> pada <i>ducting</i> dengan <i>CDB</i> $l/D_h = 0.5$ setiap <i>cross-section</i> dengan $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .....	81
Gambar 4.20	Kontur <i>streamline</i> pada <i>ducting</i> tanpa dan dengan <i>CDB</i> pada posisi 24Dh <i>downstream duct</i> dengan $Re_{Dh}=1.6 \times 10^4$ .....	83

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Pengaruh penambahan <i>guide vane</i> terhadap <i>pressure drop</i> (Sutardi dkk, 2010).....	30
<b>Tabel 3.1</b>	Urutan langkah penelitian.....	42
<b>Tabel 3.2</b>	<i>Grid independency</i> ditinjau dari <i>Pressure drop</i> pada <i>ducting</i> .....	43
<b>Tabel 4.1</b>	<i>Pressure drop overall section inlet</i> dan <i>outlet</i> pada <i>ducting</i> untuk semua variasi <i>Reynolds number</i> .....	48
<b>Tabel 4.2</b>	<i>Pressure drop section inlet</i> dan <i>outlet</i> pada <i>upstream duct</i> untuk semua variasi <i>Reynolds number</i> .....	50
<b>Tabel 4.3</b>	<i>Pressure drop section inlet</i> dan <i>outlet</i> pada <i>elbow90°</i> untuk semua variasi <i>Reynolds number</i> .	51
<b>Tabel 4.4</b>	<i>Pressure drop section inlet</i> dan <i>outlet</i> pada <i>downstream duct</i> untuk semua variasi <i>Reynolds number</i> .....	53

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saluran Ventilasi dan *Air Conditioning* merupakan teknologi yang secara luas diterapkan dalam arsitektur modern. Bangunan yang dibangun secara vertikal seperti gedung perkantoran, apartement, dan pusat perbelanjaan umumnya membutuhkan tata saluran udara, baik sebagai saluran pendingin maupun mensirkulasikan udara saja. Dalam instalasi saluran ini, umumnya menyumbang 40% dari total kerugian. Jadi mengoptimalkan sistem saluran ini sangat penting dalam meningkatkan pemanfaatan energi, menghemat energi, dan mengurangi emisi.

Rancangan dari saluran udara terdiri atas berbagai macam komponen, komponen tersebut yaitu *valve*, *elbow 90<sup>0</sup>* dan lain-lain. Komponen-komponen tersebut memiliki fungsinya masing-masing. Yaitu *valve* berfungsi untuk mengatur debit aliran, *elbow 90<sup>0</sup>* berfungsi untuk membelokan arah aliran udara. Jika dibandingkan dengan aliran udara yang melewati saluran udara lurus, aliran udara yang melewati *elbow 90<sup>0</sup>* dengan kecepatan *free stream* yang sama akan mengalami *pressure drop* yang muncul akibat adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah aliran melewati *fitting* tersebut, sehingga konstruksi dari saluran udara yang ideal diharapkan mampu mengurangi *pressure drop* pada sistem saluran udara.

Salah satu cara untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi pada aliran fluida yang melewati *elbow 90<sup>0</sup>* yaitu dengan cara menambahkan bodi pengganggu berbentuk bulat (*circular cylinder*) pada saluran sebelum inlet *elbow 90<sup>0</sup>* dan sebuah *guidevane* di dalam *elbow 90<sup>0</sup>* itu sendiri. Penambahan bodi pengganggu ini bertujuan untuk menunda terjadinya separasi aliran pada *elbow* dan membuat aliran menjadi turbulen, semakin besar turbulensi dari aliran akan maka momentum yang dimiliki

oleh aliran tersebut semakin besar pula. Momentum yang besar dari aliran ini dimanfaatkan untuk melawan tekanan balik (*adverse pressure*) dan dapat mengurangi *pressure drop* pada saluran udara.

Selain itu penelitian eksperimen serta numerik dilakukan oleh **Gao, dkk (2017)** dimana membahas mengenai analisa aliran turbulen pada *square duct* dengan penambahan *elbow 90°*, dilakukannya perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen. Dimensi *square duct* 320 x 320 mm dengan radius kelengkungan sebesar  $R/D_h = 1.5$  dan fan mengalirkan udara dengan debit sebesar 3600 m<sup>3</sup>/h, sedangkan simulasi dilakukan dengan *velocity inlet* sebesar  $v=3, 4, 5, 6, 7, \text{ dan } 8$  m/s dengan model turbulen *RSM (Reynolds stress model)* untuk mendapatkan komponen *stress tensor*. Dengan memvariasikan sisi *outer* dan *inner wall* dari *elbow 90°*, menghasilkan data berupa tabel *total pressure loss* tiap variasi *elbow* dengan *standart elbow*, dimana dengan variasi pada *outer elbow* dapat mereduksi *pressure drop* hingga 6.53%, sedangkan variasi pada *inner elbow* dapat mereduksi hingga 5.95%. Dan dengan variasi gabungan *inner* dan *outer* dapat mereduksi 9-10%. **Hardian (2017)** Melakukan penelitian secara eksperimen dengan model saluran berpenampang bujur sangkar (*square duct*) dengan  $D_h = 125$  mm yang terdiri dari : *upstream duct (straight duct, Inlet Disturbance Body* dengan  $D = 12,5$  mm, *elbow 90°*, dan dilengkapi *downstream duct (straight duct)*. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak  $0,1D_h$  sampai  $0,5D_h$  dengan  $Re_{D_h}$  sebesar  $8,74 \times 10^4$  untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang *downstream duct*, *pressure drop* antara *downstream duct* dan *upstream duct*, serta *pressure drop elbow 90°* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* berupa nilai *pressure coefficient*, koefisien *loss minor elbow 90°* pada variasi nilai  $Re_{D_h}$  sebesar  $3,94 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$ . Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa Penempatan *inlet disturbance body* pada saluran dengan jarak  $0,1D_h$  merupakan jarak paling efektif untuk meningkatkan intensitas turbulensi dan menurunkan *pressure drop*, dimana pada sisi *inner outlet elbow 90°* memiliki

intensitas turbulensi tertinggi. **Dutta dan Nandi (2015)** melakukan studi eksperimen serta numerik tentang pengaruh *Reynolds number* ( $Re$ ) dan *curvature ratio* ( $Rc/D$ ) pada aliran dalam *elbow*  $90^\circ$ . Batasan penelitian ini yaitu menggunakan *elbow*  $90^\circ$  berpenampang silinder dengan variasi radius lengkung ( $Rc/D = 1 - 5$ ) serta bilangan  $Re$  dari  $1 \times 10^5$  sampai  $10 \times 10^5$ . *Geometry* yang digunakan yaitu diameter *inner* sebesar 0,01 m , panjang *inlet* 50D dan panjang *outlet* 20D. Didapatkan hasil akselerasi kecepatan tertinggi didapat pada rasio kelengkungan paling rendah yaitu  $Rc/D = 1$ . Sedangkan pada *downstream duct* akselerasi kecepatan pada sisi *inner* dalam mengembalikan menjadi bentuk *fully develop* terdapat pada rasio lengkung yang besar yaitu  $Rc/D = 5$ . Dari  $\alpha = 60^\circ$  sampai  $90^\circ$  , kecepatan rata-rata bergeser keatas diikuti dengan perubahan kecepatan laju fluida dekat dengan sisi *outer*. Penelitian secara eksperimen dilakukan **Sutardi dkk(2010)** pada sebuah *elbow* sebesar  $R/Dh=1,875$  yang diberi *guidevane* serta *rectangular duct* sebesar  $5 \times 10$  cm. Bilangan *Reynolds* yang digunakan mulai dari  $Re = 2.1 \times 10^4$ ,  $8.4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^5$ . Hasil penelitian yang diperoleh secara eksperimen adalah penambahan single *guidevane* dapat mengurangi *pressure drop* pada  $Re_{dh} = 2.1 \times 10^4$ . **Gigih(2017)** penelitian secara numerik pada *squaeduct* dengan *elbow*  $90^\circ$  da penempatan IDB pada daerah *inner upstream* dengan variasi jarak  $l/Dh$  sebesar 0.1, 0.3, dan 0.5. Dari hasil penelitian, penulis menyarankan untuk memperpanjang saluran hingga mencapai 25 sampai 40 Dh, agar dapat terlihat sejauh mana aliran mencapai *fully developed*. Simulasi dilakukan pada *elbow* dengan  $R/Dh= 1$  atau 1.5, karena semakin besar  $R/Dh$  efek penambahan IDB tidak berpengaruh dalam mengurangi *pressure drop*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, baik secara eksperimental maupun pemodelan numerik pada aliran yang melalui saluran udara berpenampang bujur sangkar, yang terdiri dari *upstream duct* dengan dan tanpa bodi pengganggu, *elbow*  $90^\circ$

dengan dan tanpa *guidevane* serta *downstream duct* untuk mereduksi *pressure drop* yang terjadi. Penempatan bodi pengganggu pada sisi *inner upstream duct*, sebelum *inlet elbow*  $90^\circ$ . Interaksi aliran terhadap bodi pengganggu diharapkan dapat meningkatkan intensitas turbulensi yang semakin kuat dan meningkatkan momentum aliran pada sisi *inner elbow*  $90^\circ$ . Sehingga separasi aliran akibat tegangan geser pada dinding dapat ditunda dan diharapkan mampu melawan *adverse pressure* yang terjadi. Penelitian eksperimental yang dilakukan **Sutardi, dkk(2010)** tentang penambahan *guidevane* pada *elbow*  $90^\circ$  mampu mereduksi *pressure drop* pada bilangan *Reynolds* yang rendah namun pada bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi gagal untuk mereduksi *pressure drop*. Selanjutnya dapat dirumuskan sebuah masalah baru dengan kombinasi penempatan bodi pengganggu pada sisi *inner upstream duct* sebelum *elbow*  $90^\circ$  dan penambahan *guidevane* pada *elbow*  $90^\circ$ . Dialiri pada berbagai variasi bilangan *Reynolds* dengan basis diameter hidrolis.

Oleh karena itu, dilakukan pemodelan secara numerik untuk menganalisis karakteristik aliran udara yang melewati *square duct* dengan *elbow*  $90^\circ$  yang diberi *guidevane* dan bodi pengganggu pada sisi *inner* sebelum masuk *elbow*  $90^\circ$  yaitu *disturbance body* dengan bentuk *circular cylinder*  $d = 5$  mm yang divariasikan pada jarak  $l/D_h = 0.1$ ,  $l/D_h = 0.3$ , dan  $l/D_h = 0.5$  pada *inner upstream duct* dengan *gap*  $g/d = 0.2$  serta *elbow*  $90^\circ$  dengan  $R/D_h = 1.5$  dengan tambahan *guidevane* tunggal. Modifikasi dari saluran tersebut kemudian divariasikan dengan kecepatan aliran 2, 6 dan 12 m/s atau pada bilangan *Reynolds* ( $ReD_h = 1.6 \times 10^4$ ,  $4.8 \times 10^4$  dan  $9.6 \times 10^4$ ). Fenomena aliran pada saluran udara yang berkaitan dengan variasi tersebut akan ditampilkan data kuantitatif berupa *pressure drop overall*, *upstream duct*, *elbow*  $90^\circ$  dan *downstream duct* serta distribusi tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall*. Serta data kualitatif berupa profil kecepatan pada *elbow*  $90^\circ$  dan *downstream duct* pada beberapa posisi.

### 1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan yang berisi tentang variable yang akan diteliti maupun variable yang akan diasumsikan sehingga bahasan tidak melebar dari tujuan utama. Batasan masalah tersebut adalah sebagai berikut :

1. Perangkat lunak yang digunakan dalam pemodelan *geometry* benda uji serta / tahapan *pre-processing*, *processing* serta *post processing* menggunakan piranti lunak CFD komersial.
2. Fluida kerja adalah udara dengan profil kecepatan udara *uniform* pada sisi *inlet upstream*. Aliran fluida bersifat *incompressible flow*, *viscous* dan *steady flow*.
3. Temperatur fluida didalam udara diasumsikan konstan yaitu  $T = 28^0$ .
4. Aliran yang melintasi *square duct* memiliki region aliran turbulen.
5. Studi numerik dilakukan pada kecepatan 2,6 dan 12 m/s atau pada *Reynolds number* sebesar  $1.6 \times 10^4$ ,  $4.8 \times 10^4$  dan  $9.6 \times 10^4$ .

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh interaksi aliran antara *guidevane* dan *circular disturbance body (CDB)* dengan variasi jarak peletakan dari *inlet elbow 90°* pada  $l/D_h = 0.1$ ,  $l/D_h = 0.3$ , dan  $l/D_h = 0.5$  serta pada gap  $g/d = 0.2$ , sehingga dilakukan kajian numerik. Serta terdapat tujuan khusus untuk menganalisa baik dalam bentuk kuantitatif maupun kualitatif, antara lain sebagai berikut:

1. Mengetahui *pressure drop overall* dan pada bagian *upstream duct*, *elbow 90°*, dan *downstream duct* serta *coefficient of pressure* pada *ducting*.

2. Mengetahui fenomena aliran yaitu *velocity profile* pada daerah *square elbow 90°* dan *downstream duct* .
3. Mengetahui fenomena aliran yaitu kontur kecepatan dan *streamline* pada daerah *square elbow 90°* dan *downstream duct* .

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat setelah melakukan penelitian studi numerik ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan gambaran tentang fenomena aliran yang melewati suatu saluran berpenampang bujur sangkar saat melintasi bodi pengganggu berbentuk *circular cylinder*.
2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh adanya *guidevane* pada *elbow 90°* dan *circular disturbance body* pada sisi *inner wall upstream duct* dengan variasi jarak peletakan dari *inlet elbow* terhadap karakteristik aliran sepanjang *square elbow 90°* serta *downstream duct*.

## **BAB II DASAR TEORI**

### **2.1 Mekanika Fluida**

Mekanika Fluida adalah cabang dari ilmu yang mempelajari mengenai zat fluida (cairan dan gas) bergerak atau diam serta gaya akibat yang ditimbulkan oleh fluida tersebut pada batasnya. Mekanika fluida dapat dibagi menjadi fluida statis dan fluida dinamik. Fluida statis mempelajari fluida pada keadaan diam sementara fluida dinamis mempelajari fluida yang bergerak dan interaksi fluida dengan padatan atau fluida lain pada permukaan batasnya. Sedangkan fluida sendiri merupakan zat yang akan mengalami deformasi secara terus menerus (continue) jika diberikan tegangan geser (tangensial) seberapa kecil tegangan geser tersebut. Batas tersebut dapat berupa permukaan padat atau fluida lainnya.

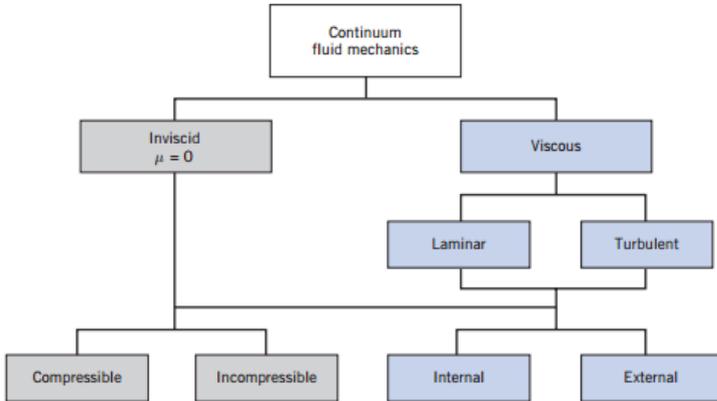
Pembahasan tentang fluida yang bergerak yaitu dengan mengembangkan persamaan-persamaan dasar untuk menerapkan teori analisis berdasarkan volume atur. Analisis didasarkan pada volume atur, karena: Pertama, fluida sebagai media dapat mengalami distorsi dan deformasi secara terus menerus dan oleh karenanya sangat sulit sekali untuk mengidentifikasi suatu massa yang sama di setiap saat. Kedua, lebih sering berurusan dengan pengaruh dari gerakan fluida secara menyeluruh terhadap suatu peralatan maupun terhadap bangunan konstruksi tertentu.

Fluida memiliki sifat mengikuti perubahan bentuk wadah serta kemampuannya untuk mengalir menuju suatu tempat. Sifat ini dikarenakan salah satu dari sifat ketidakmampuan fluida melawan tegangan geser (shear stress). Misalnya pada suatu instalasi perpipaan, fluida tidak dapat bergerak kemanapun kecuali mengikuti instalasi perpipaan itu sendiri.

### **2.2 Klasifikasi Aliran Fluida**

Aliran fluida dapat dibedakan menjadi aliran *inviscid* dan *viscous*. Fluida *viscous* diklasifikasikan sebagai fluida *Newtonian* dan

fluida *non-Newtonian*. Fluida *Newtonian* terdapat hubungan linier antara besarnya tegangan geser yang diterapkan dengan laju perubahan bentuk yang diakibatkan dengan mengikuti hukum viskositas *Newton*. Klasifikasi jenis fluida diilustrasikan pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 2011)

### 2.3 Fluida *Newtonian* dan *Non-Newtonian*

Fluida *Newtonian* didefinisikan sebagai fluida yang tegangan gesernya berbanding lurus secara linier dengan gradien kecepatan pada arah tegak lurus dengan bidang geser. Definisi ini memiliki arti bahwa fluida *Newtonian* akan mengalir terus tanpa dipengaruhi oleh gaya-gaya yang berkerja pada fluida. Sebagai contoh, air adalah fluida *Newtonian*. Persamaan yang berkaitan dengan fluida *Newtonian* dirumuskan pada rumus 2.1

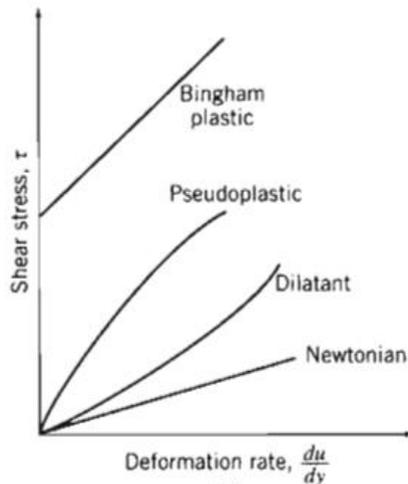
$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Fluida *non-Newtonian* adalah fluida dimana tegangan geser dengan nilai kecepatan deformasi tidak terhubung secara linier, sebagai contoh fluida *non-Newtonian* adalah pasta gigi.

Persamaan yang berkaitan dengan *Non-Newtonian fluid* dirumuskan pada rumus 2.2.

$$\tau_{yx} = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

Dari perumusan 2.1 dan 2.2 pada fluida *Newtonian* dan *non-Newtonian* kita bisa tahu perbedaannya, pada fluida *Newtonian* viskositas ( $\mu$ ) dianggap konstan (kecuali ada pengaruh dari temperature), sedangkan fluida *non-Newtonian* dipengaruhi oleh *apparent viscosity* ( $\eta$ ) yaitu bergantung oleh tegangan geser. Berikut perbedaan antara fluida *Newtonian* dengan fluida *Non-Newtonian* diilustrasikan pada gambar 2.2.

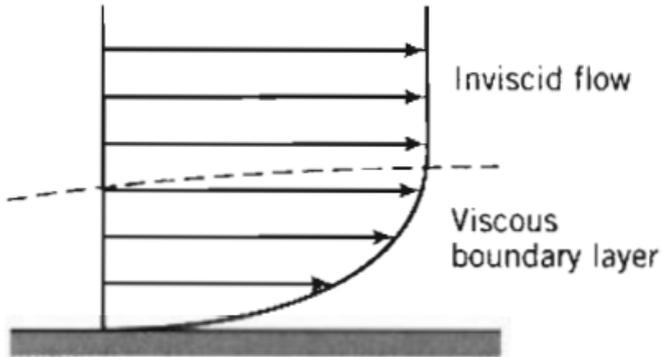


**Gambar 2.2.** *Shear stress vs rate of shear strain* (Fox dan Mc. Donald, 2011)

#### 2.4 Aliran *Viscous* dan *Inviscid*

Aliran *viscous* adalah aliran fluida dimana viskositas dari fluida sangat berpengaruh sehingga menimbulkan tegangan geser aliran pada dinding saluran. Sedangkan aliran *inviscid* dimana viskositas fluida diasumsikan nol ( $\mu=0$ ) sehingga tegangan geser sudah tidak berpengaruh terhadap bentuk aliran. Berikut aliran

*viscous* dan *inviscid* yang terjadi pada plat datar, diilustrasikan pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3.** Aliran *viscous* dan *inviscid* melewati plat datar (Fox dan Mc. Donald, 2011)

Pada gambar 2.3 dapat diketahui bahwa aliran *viscous* adalah aliran yang berada diantara plat datar dan *boundary layer* dimana pada daerah tersebut terdapat tegangan geser karena efek *viscous*, sehingga profil kecepatan aliran pada daerah ini semakin mengecil bila mendekati plat datar. Pada daerah diatas *boundary layer*, alirannya berubah menjadi *inviscid* ini karena tegangan geser diabaikan dan profil kecepatan didaerah ini sudah konstan.

## 2.5 Aliran *Laminar* dan *Turbulent*

Aliran fluida dibedakan menjadi dua tipe, yaitu aliran laminar dan turbulen. Pada aliran laminar fluida bergerak secara teratur. Profil kecepatan pada aliran laminar berupa kurva yang halus. Partikel fluida bergerak sepanjang garis arus tertentu. Hampir tidak ada pencampuran antara garis arus yang satu dengan yang lainnya. Pola aliran turbulen dicirikan oleh kecepatan fluida yang berfluktuasi secara acak dan aliran yang bercampur pada level makroskopik. Pada aliran turbulen fluida tidak bergerak pada suatu garis arus yang halus dan kecepatan fluida berubah secara acak terhadap waktu.



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

Jika:  $Re \leq 2300$ , aliran bersifat *laminar*

$2300 \leq Re \leq 4000$ , aliran bersifat *transisi*

$Re \geq 4000$ , aliran bersifat *turbulen*

## 2.6 Aliran *Incompressible* dan *Compressible*

Aliran *Incompressible* adalah aliran dimana variasi densitas fluida yang mengalir dapat diabaikan atau dianggap konstan, sedangkan aliran *compressible* adalah aliran dimana variasi densitas dari fluida yang mengalir tidak boleh diabaikan. Untuk mengkarakteristikan aliran itu *incompressible* atau *compressible* digunakan bilangan *Mach number* ( $M$ ), bila *Mach Number* ( $M$ )  $< 0,3$  dikategorikan sebagai aliran *incompressible*, bila *Mach Number* ( $M$ )  $> 0,3$  dikategorikan sebagai aliran *compressible*. Berikut adalah perumusan bilangan *Mach number* ( $M$ ).

$$M = \frac{\bar{v}}{c} \quad (2.5)$$

Dimana :

$\bar{v}$  = kecepatan rata-rata suatu aliran

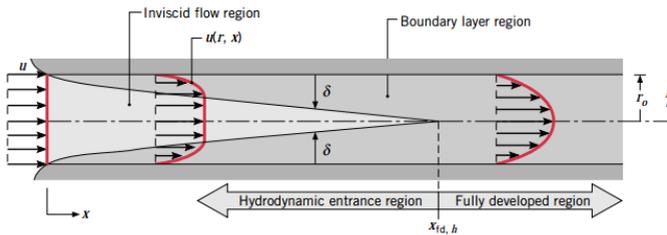
$c$  = kecepatan rambat bunyi local

## 2.7 Aliran *Internal*

### 2.7.1 Fenomena Aliran *Internal*

Aliran *Internal* adalah aliran dimana fluida mengalir dibatasi oleh suatu batasan benda padat, sebagai contoh aliran fluida dalam pipa, *ducting*, dan lain-lain. Pada gambar 2.5, aliran fluida yang masuk pada pipa adalah aliran uniform. Karena aliran tersebut *viscous* maka terjadi tegangan geser pada dinding-dinding pipa, maka terjadilah lapisan batas atau *boundary layer*. *Boundary layer* memisahkan 2 jenis aliran yaitu aliran *inviscid* dan *viscous*, dimana pada  $U_{max}$  masih dalam keadaan aliran *inviscid* sedangkan pada aliran dekat dinding dalam keadaan aliran jenis *viscous*. Aliran *viscous* yang ada di dalam *boundary layer*

memiliki pengaruh viskositas yang relatif besar, sehingga profil kecepatannya yang ada pada sekitar dinding tidak lagi *uniform*.



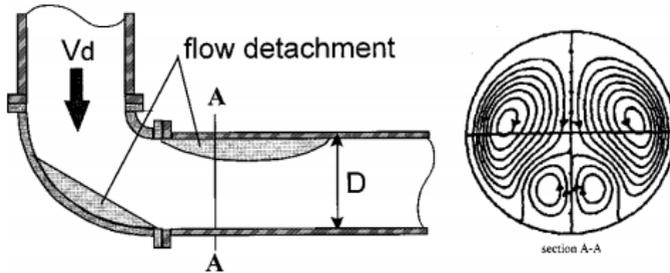
**Gambar 2.5.** *Internal flow* pada pipa (Incopera, 2011)

Perubahan profil kecepatan dalam aliran ini memiliki batas tertentu. Apabila *boundary layer* tersebut bertemu pada satu titik, maka profil kecepatannya akan tetap. Aliran yang telah berkembang penuh ini dinamakan aliran *fully developed*.

### 2.7.2 Separasi Aliran

Separasi aliran terjadi akibat momentum dari aliran fluida tidak mampu untuk melawan tegangan geser, sehingga akan terbentuk tekanan balik pada fluida yang menyebabkan aliran fluida berbalik arah dari arah utamanya (*backflow*). Karena momentum dari aliran yang rendah menyebabkan aliran akan terjebak dan terbentuklah *vortex flow* pada sisi *corner elbow*. *Vortex* merupakan aliran yang terjebak dan berputar-putar diantara aliran utama dan dapat mengurangi energi aliran sehingga memberikan pengaruh terhadap timbulnya *pressure drop*.

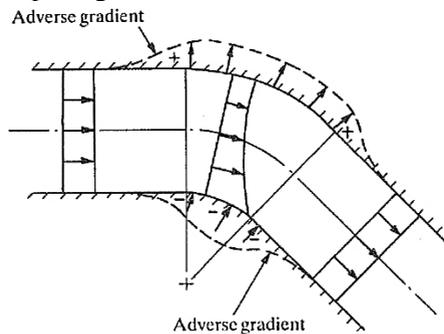
**Danbon&Sollic** (2000) melakukan penelitian tentang aliran separasi pada *curved pipe*, dengan penambahan *butterfly valve* pada daerah *downstream*. Hasil visualisasi diilustrasikan pada gambar 2.6



**Gambar 2.6.** Separasi aliran pada *curved pipe* (Danbon&Sollic,2000)

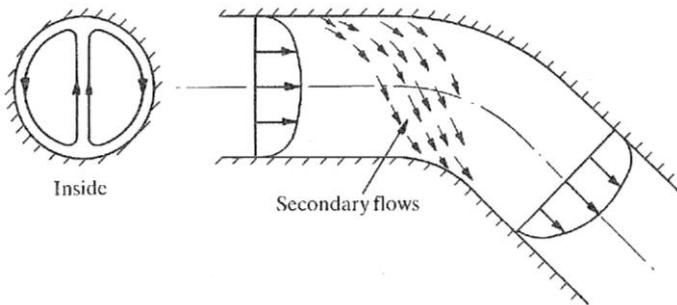
### 2.7.3 Aliran Sekunder (*Secondary Flow*)

Aliran sekunder terjadi karena perbedaan distribusi energi pada sisi *outer wall* dan *inner wall* pada *elbow*. Pada sisi *outer* tekanan statisnya semakin besar ini terjadi karena aliran fluida langsung mengarah pada dinding *outer* yang menyebabkan kecepatan aliran berkurang secara tiba-tiba kemudian aliran fluida bergerak menuju *inner wall*, sehingga tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar dari *inner wall*. Aliran yang melintasi suatu *fitting* seperti *elbow* akan terjadi perubahan arah aliran dimana akan mempengaruhi perubahan tekanan statis dan distribusi kecepatan aliran, sehingga menimbulkan dua tekanan balik *adverse pressure* seperti pada gambar 2.7



**Gambar 2.7** Aliran ideal pada lengkungan (Miller, 1999)

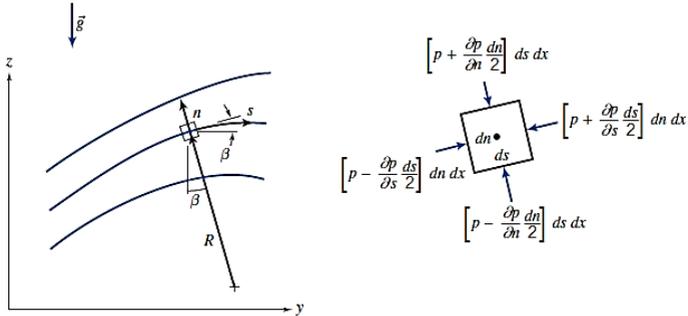
Aliran sekunder pada *elbow* terjadi ketika aliran mulai memasuki *elbow*. Ini terjadi karena energi pada sisi *outer wall* lebih besar pada sisi *inner wall* sehingga arah aliran tidak hanya mengikuti arah aliran utama, namun juga bergerak secara tangensial menuju *inner wall*. Pada gambar 2.8 terlihat jelas fenomena aliran sekunder yang terjadi pada *elbow*



**Gambar 2.8** Aliran sekunder (Miller, 1999)

## 2.8 Persamaan *Euler* dalam Koordinat *Streamline*

Streamline adalah garis sembarang 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*. Gerakan partikel fluida sepanjang aliran *streamline* diilustrasikan pada gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox dan Mc. Donald, 2011)

Pada gambar 2.9 diatas partikel fluida pada bidang koordinat  $y$ - $z$  dimana  $s$  sebagai jarak sepanjang *streamline* ,  $n$  sebagai jarak normal terhadap *streamline* sedangkan  $p$  adalah pusat tekanan dari suatu elemen. Persamaan *Euler* pada aliran *inviscid* dapat dibentuk dari persamaan gerak partikel pada suatu aliran dalam koordinat *streamline* , sehingga dirumuskan pada persamaan 2.6.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.6)$$

Dengan asumsi kondisi aliran *steady*, *body force* diabaikan serta aliran dianggap sebagai aliran *incompressible* sehingga persamaan *Euler* sepanjang *streamline* kearah  $s$  dapat dirumuskan pada persamaan 2.7.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.7)$$

Sedangkan pada kondisi *steady flow* dimana  $R$  adalah radius lengkungan *streamline*. Sehingga menyebabkan persamaan *Euler* berubah dimana persamaan *Euler* normalnya dinyatakan pada persamaan 2.8.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{\bar{v}^2}{R} \quad (2.8)$$

Untuk aliran steady pada bidang horizontal / arah  $n$  , maka persamaan *Euler* dinyatakan dengan persamaan 2.9.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{\bar{v}^2}{R} \quad (2.9)$$

Persamaan 2.8 di atas menunjukkan adanya peningkatan tekanan ke arah keluar dari pusat radius kelengkungan *streamline*, disebabkan karena gaya yang bekerja pada partikel hanya berupa tekanan sehingga menyebabkan adanya percepatan *sentripetal*. Di daerah-daerah *streamline* dimana pada *streamline* lurus maupun *streamline* dengan jari-jari kelengkungan  $R$  yang tak terhingga menyebabkan tidak adanya perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline*.

## 2.9 Coefficient of Pressure ( $C_p$ )

Pada sistem perpipaan maupun saluran udara (*ducting system*), sering kali dilakukan modifikasi parameter,  $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$  dimana  $\Delta P$  merupakan selisih antara tekanan statis lokal pada dinding/*wall* dengan tekanan statis acuan / tekanan statis sesuai dengan standart referensi, dengan memasukkan faktor  $\frac{1}{2}$  untuk membuat *denominator* / penyebut pada suatu bilangan menjadi tekanan dinamik. Maka dirumuskan pada persamaan 2.10.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = \frac{P_s - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (2.10)$$

dimana:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{ref}^2 &= \text{tekanan dinamis pada sisi } inlet \text{ elbow} \\ P_s &= \text{tekanan statis lokal pada dinding} \\ P_{ref} &= \text{tekanan statis acuan (referensi)} \end{aligned}$$

$\rho$  = massa jenis fluida pada kondisi kerja  
 $U_{ref}$  = kecepatan *freestream*

*Coefficient of pressure* pada suatu elemen saluran udara contoh pada saluran *elbow* didefinisikan sebagai selisih antara tekanan statis lokal dengan tekanan statis referensi (*freestream*) dibagi dengan tekanan dinamis yang diukur pada bagian sisi *inlet elbow*. Dalam penentuan besaran *pressure drop* dapat menggunakan  $C_p$  sebagai acuan. Dimana semakin besar selisih  $C_p$  antara *inlet* dengan *outlet* maka *pressure drop* yang terjadi akan semakin besar.

## 2.10 Grid Independency

Dalam melakukan penelitian secara numerik, untuk mendapatkan hasil simulasi yang optimal setiap meshing harus dilakukan pengecekan yaitu dengan menggunakan metode *grid independency*. Dengan menggunakan metode *grid independency* maka hasil simulasi akan mendapatkan harga optimal pada konvergensi tertentu dimana tidak melihat dari besar maupun kecil suatu besaran *meshing*.

*Grid independency* berhenti ketika hasil numerik yang diperoleh sudah tidak terdapat perubahan yang signifikan atau sudah konstan pada setiap jumlah *meshing*.

## 2.11 Model Turbulensi

Pada menu jenis turbulensi, aliran *turbulen* dikenali dengan adanya medan kecepatan yang berfluktuasi. Fluktuasi kecepatan mengakibatkan perubahan berbagai besaran seperti : momentum, energi, konsentrasi partikel. Perubahan mengakibatkan berbagai besaran ikut berfluktuasi. Oleh karena itu persamaan yang berhubungan dapat di rata-ratakan atau dimanipulasi. Pemilihan model turbulensi tergantung dari beberapa pertimbangan, antara lain fisik aliran, tingkat akurasi yang diinginkan.

### 2.11.1 Model $k-\varepsilon$

Model  $k-\varepsilon$  merupakan model turbulen dengan menggunakan dua persamaan, sehingga kecepatan turbulen dan skala panjang

ditentukan secara independen. Model  $k-\varepsilon$  dikhususkan untuk mekanisme yang memberikan efek terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa)  $k$ . Lalu  $\varepsilon$  merupakan laju disipasi dari  $k$ . Beberapa macam model  $k-\varepsilon$  ialah sebagai berikut :

- ***Standard  $k-\varepsilon$***

Pemodelan ini menggunakan persamaan *transport* dalam penyelesaiannya. Model ini dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan seperti *bouyancy*, *heating*, dan *compressibility*. Model ini tidak sesuai untuk aliran kompleks yang meliputi separasi dan *strong stream curvature*.

- ***RNG (renormalization-group)  $k-\varepsilon$***

Model ini merupakan perbaikan dari metode  *$k-\varepsilon$  standart*, persamaan yang digunakan sama. Adapun perbaikannya meliputi:

- Meningkatkan akurasi untuk jenis aliran yang berputar.
- Meningkatkan akurasi aliran yang terhalang secara tiba-tiba.
- Digunakan untuk *Reynolds number* rendah.
- Menyediakan bilangan prandtl turbulensi.

- ***Realizable  $k-\varepsilon$***

Pemodelan ini mempunyai beberapa batasan matematis pada bilangan Reynolds, namun konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Model ini mempunyai kelebihan yaitu lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida. Pada model ini dapat memberikan performa bagus untuk aliran yang melibatkan separasi, *recirculation*, dan lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar dengan *error* kecil.

### **2.11.2 Model $k-\omega$**

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Pada model  $k-\omega$  ini, terdapat *inverse time scale* dimana  $\omega$  merupakan *specific dissipation rate* yang

berkaitan dengan aliran turbulensi. Karakteristik numerik dari model ini hampir sama dengan model  $k-\varepsilon$ . Beberapa macam model  $k-\omega$  ialah sebagai berikut :

- **Standard  $k-\omega$**

Pemodelan ini menggunakan dua persamaan *transport model* untuk memecahkan  $k$  dan  $\omega$ . Model ini dapat menampilkan transisi suatu aliran. Model ini juga dapat pula menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.

- **SST (*shear-stress transport*)  $k-\omega$**

Model ini merupakan variasi dari model *standard  $k-\omega$*  yang dikembangkan untuk memadukan formulasi model *standard  $k-\omega$*  sehingga diharapkan hasil yang didapat menjadi lebih akurat pada daerah di dekat dinding . Model  $k-\omega$  yang memiliki keunggulan dalam aliran *free stream*.

## 2.12 Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi merupakan bilangan untuk menentukan fluktuasi dari turbulensi dengan membandingkan *root mean square* dari fluktuasi kecepatan ( $u'$ ) terhadap kecepatan rata-rata ( $u_{avg}$ ). Intensitas turbulensi dinyatakan dalam bentuk prosentase. Intensitas turbulensi dapat dinotasikan pada persamaan 2.17 sebagai berikut:

$$IT = \frac{u'}{u_{avg}} \times 100 \% = 0,16(\text{Re}_{Dh})^{-1/8} \quad (2.11)$$

$$u' = \sqrt{\frac{\sum(u_{avg} - U_n)^2}{n-1}} \quad (2.12)$$

Dimana: IT : Intensitas turbulensi

$U_n$  : Kecepatan lokal (m/s)

$u_{avg}$  : Kecepatan rata-rata (m/s)

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

### 2.13 *Boundary Condition*

Berikut ini beberapa *boundary condition* yang di *input* dalam piranti lunak *CFD* antara lain:

- ***Velocity inlet***

*Boundary condition* ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan suatu aliran serta properti pada inlet aliran seperti *turbulence intensity* , *diameter hidraulik* serta beberapa properti lainnya.

- ***Out flow***

*Boundary condition* ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar dari suatu media laluan, dimana kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui sebelum kriteria konvergensi tercapai.

- ***Pressure outlet***

Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya.

- ***Wall***

*Boundary condition* ini digunakan untuk daerah sisi sisi dalam media laluan fluida sehingga aliran tidak dapat melewati batas dinding yang sudah ditentukan atau di definisikan. Dalam aliran *viscous*, kondisi batas tanpa *slip* diberlakukan pada dinding secara *default*, tetapi kondisi batas tersebut dapat diubah seperti *wall* yang didefinisikan bergerak secara translasi atau rotasi dari batas dinding, atau model “*slip*” dinding

Beberapa penelitian telah membahas serta mengamati karakteristik aliran yang melewati suatu *elbow* baik melalui metode eksperimen maupun dengan metode numerik, menggunakan beberapa variasi untuk menurunkan *pressure drop* maupun kerugian energi diantaranya dengan menambah suatu bodi pengganggu , pengarah (*guide vane*) , *valve* seperti *damper*.

### 2.14 Kondisi Aliran Dekat Dinding

Pengkondisian jenis aliran dekat dinding dapat didefinisikan dengan nilai  $y^+$ .  $y^+$  adalah suatu parameter tak berdimensi untuk menyatakan kondisi aliran yang dibatasi oleh dinding, dimana nilai  $y^+$  dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut.

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad (2.13)$$

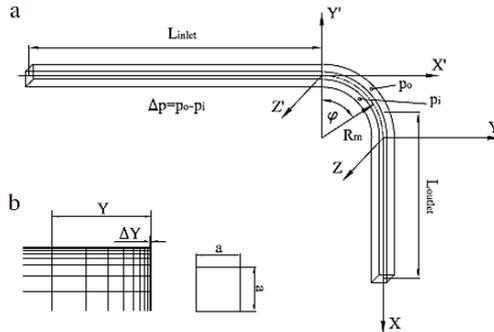
Dimana  $u_*$  adalah kecepatan gesekan aliran pada dinding terdekat,  $y$  adalah jarak menuju dinding terdekat,  $\nu$  adalah viskositas kinematik lokal fluida. Nilai  $y^+$  sering digunakan pada teori boundary layer untuk mendefinisikan hukum law of the wall. Kecepatan gesekan aliran pada dinding terdekat dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.14)$$

Dimana  $\tau_w$  adalah tegangan geser aliran pada dinding, dan  $\rho$  adalah massa jenis fluida.

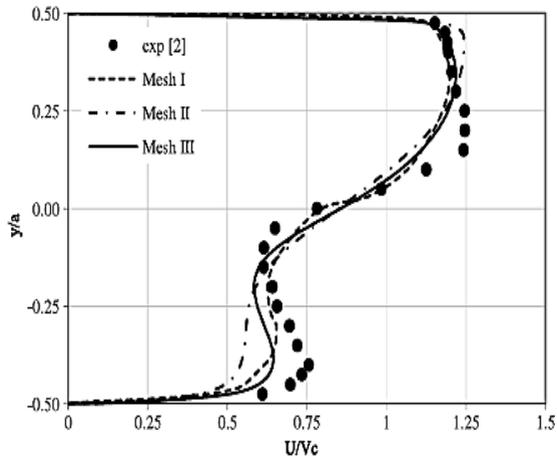
### 2.15 Penelitian Terdahulu

**Rup dan Sarna (2011)** melakukan penelitian yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct*. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada  $Re = 40000$  yang memiliki ukuran geometri  $a \times a = 80 \times 80$  mm,  $D_h = 80$  mm dan  $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$  mm seperti yang terlihat pada gambar 2.17. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh  $V_k = 553\ 052$ ,  $V_k = 1766\ 079$ , and  $V_k = 1034\ 775$



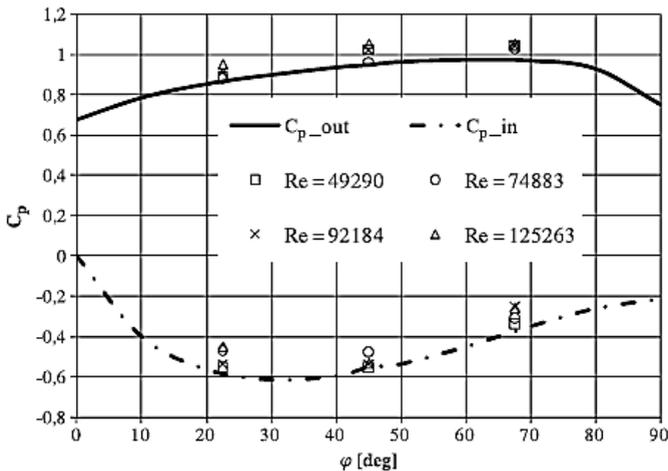
**Gambar 2.10** a) Posisi pengambilan data pada *domain uji* b) Mesh pada *Volume*. (Rup & Sarna 2011)

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



**Gambar 2.11** Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk  $x/D_h = 1.0$  dan  $z/D_h = 0.0$  (Rup & Sarna 2011)

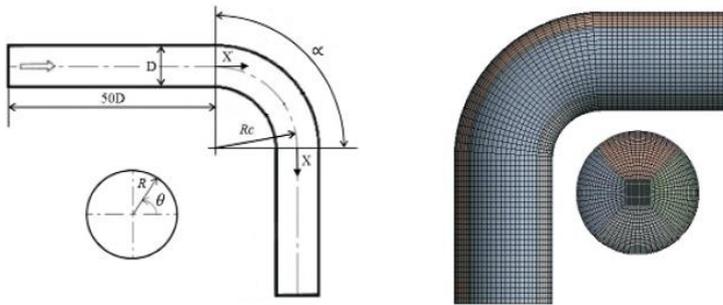
Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.14 yang menunjukkan profil kecepatan pada dengan lokasi  $x/Dh = 1.0$  dan  $z/Dh = 0.0$  hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ( $V_k = 1034\ 775$ ). Terjadi perbedaan kecepatan pada sisi *inner* dan sisi *outer* pada saluran setelah melewati *elbow*, hal itu dikarenakan adanya defisit momentum aliran pada sisi *inner* maupun *outer*, namun defisit momentum pada sisi *inner* jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sisi *outer*. Gambar 2.15 memberikan informasi tentang distribusi koefisien tekanan pada *elbow* yang, dapat diamati bahwa koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut  $\phi = 45^\circ$  ( $Z = 0.00$ ). Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar koefisien *losses* pada *elbow* tersebut.



**Gambar 2.12** Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen. (Rup & Sarna 2011)

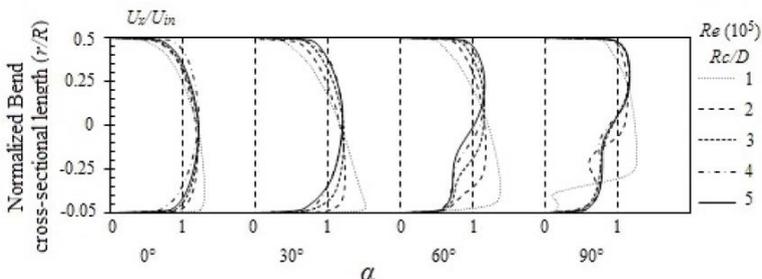
**Dutta dan Nandi (2015)** melakukan studi eksperimen dan numerik tentang pengaruh *Reynolds Number* dan *Curvature Ratio* pada aliran turbulen dalam pipa melengkung. Pada penelitian ini,

aliran turbulen mengalir melalui saluran sirkular dengan pipa melengkung  $90^\circ$  (*elbow*  $90^\circ$ ) menggunakan *curvature ratio* ( $Rc/D = 1$  sampai 5) dengan memiliki diameter inner yang sama yaitu 0,01 m serta menggunakan panjang *inlet*  $50D$  dan panjang *outlet*  $20D$ , dimana  $Rc$  adalah radius kelengkungan dan  $D$  adalah diameter pipa serta menggunakan bilangan  $Re$  dari  $1 \times 10^5$  sampai  $10 \times 10^5$ .



**Gambar 2.13** Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya (Dutta dan Nandi 2015)

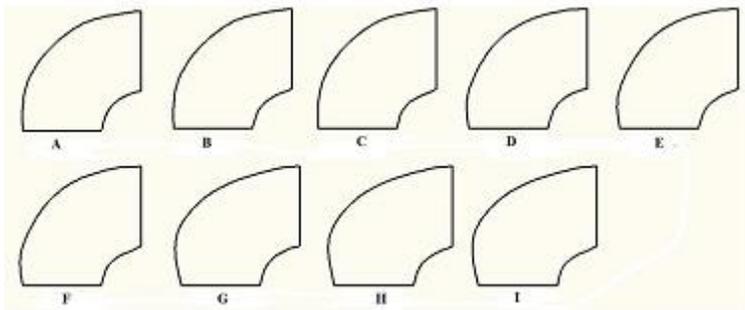
Dari penelitian ini didapatkan bahwa untuk nilai  $Re$  yang semakin tinggi, maka pengaruh kelengkungan akan menurun. Kecenderungan separasi aliran akan meningkat untuk lengkungan dengan *curvature ratio* yang rendah serta kemampuan melawan *unsteady* dan *complex flow* akan meningkat untuk lengkungan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



**Gambar 2.14** *Velocity profile* pada sudut  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$  dengan variasi *curvature ratio* ( $R_c/D = 1 - 5$ ) (Dutta dan Nandi 2015)

Gambar 2.17 adalah *velocity profile* untuk variasi 5 jenis *curvature ratio* ( $R_c/D = 1 - 5$ ) dengan menggunakan *Reynolds Number* ( $Re = 1 \times 10^5$ ). Pada outlet elbow ( $\alpha = 90^\circ$ ), terdapat aliran balik sebagai akibat dari *adverse pressure* pada outlet elbow dimana memiliki momentum aliran yang lebih rendah daripada momentum pada *freestream*, yang mana menurunkan kecepatan pada dekat dinding dan *boundary layer thickness*. Selain itu juga didapati bahwa percepatan yang lebih tinggi terjadi pada *curvature ratio* yang rendah.

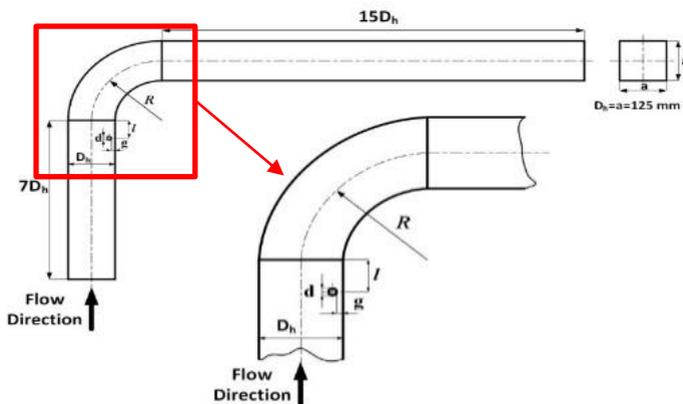
Ran Gao, dkk (2017) dimana membahas mengenai analisa aliran turbulen pada *square duct* dengan penambahan elbow  $90^\circ$ , dilakukannya perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen. Dimensi *square duct* 320 x 320 mm dengan radius kelengkungan sebesar  $R/Dh = 1.5$  dan fan mengalirkan udara dengan debit sebesar  $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ , sedangkan simulasi dilakukan dengan *velocity inlet* sebesar  $v=3, 4, 5, 6, 7,$  dan  $8 \text{ m/s}$  dengan model turbulen *RSM (Reynolds stress model)* untuk mendapatkan komponen *stress tensor*.



**Gambar 2.15** Variasi sisi *inner* dan *outer* pada elbow

Dengan memvariasikan sisi *outer* dan *inner wall* dari elbow  $90^\circ$ , menghasilkan data berupa tabel *total pressure loss* tiap variasi elbow dengan *standart elbow*, dimana dengan variasi pada *outer*

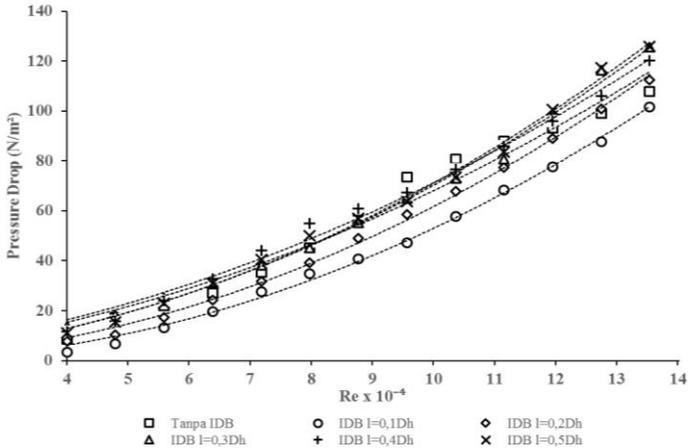
*elbow* dapat mengurangi *pressure drop* hingga 6.53%, sedangkan variasi pada *inner elbow* dapat mengurangi hingga 5.95%. Dan dengan variasi gabungan *inner* dan *outer* dapat mengurangi 9-10%. **Hardian (2017)** melakukan penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square ducting* dengan model saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*) dengan  $D_h = 125 \text{ mm}$  yang terdiri dari : *upstream duct (straight duct)* dengan panjang  $7D_h$ , *Inlet Disturbance Body* dengan  $D = 12,5 \text{ mm}$ , *elbow 90°*, dan dilengkapi *downstream duct (straight duct)* dengan panjang  $15D_h$ , serta *induced draft fan*. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan *pitot static tube*, *inclined manometer*, dan *pressure transducer*. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak  $0,1D_h$  sampai  $0,5D_h$  dengan  $Re_{D_h}$  sebesar  $8,74 \times 10^4$  untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang *downstream duct*, *pressure drop* antara *downstream duct* dan *upstream duct*, serta *pressure drop elbow 90°* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* berupa nilai *pressure coefficient*, koefisien *loss minor elbow 90°* pada variasi nilai  $Re_{D_h}$  sebesar  $3,94 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$ .



**Gambar 2.16** Skema Instalasi Penelitian (**Hardian,2017**)

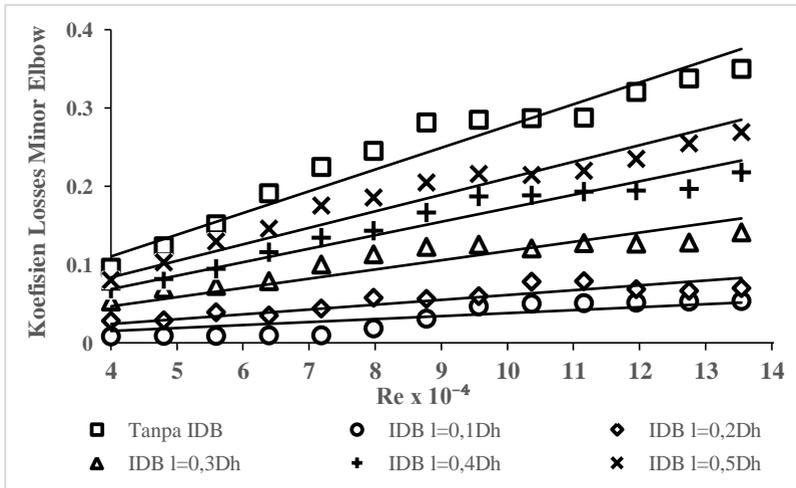
Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa penempatan jarak *inlet disturbance body* efektif untuk proses *recovery* aliran dan

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



**Gambar 2.17** *Pressure drop* pada *square duct* dengan *square elbow 90°* dengan variasi Reynolds Number  $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$  dan variasi jarak *inlet disturbance body*  $0,1D_h - 0,5D_h$  (Hardian, 2017)

Dari grafik gambar 2.20 dapat dilihat bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dimana nilai *pressure drop* akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya Reynolds Number pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*. Secara fungsi Reynolds Number, jarak *inlet disturbance body*  $0,1D_h$  memiliki nilai *koefisien losses elbow 90°* paling rendah .



**Gambar 2.18** Koefisien *Losses Elbow 90°* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number*  $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$  dan variasi jarak *inlet disturbance body*  $0,1D_h - 0,5D_h$  (Hardian, 2017)

Dari gambar 2.21 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds number* maka akan semakin meningkat pula nilai koefisien *losses elbow 90°* yang terjadi pada masing-masing pada masing-masing jarak peletakan *inlet disturbance body*. Sehingga dapat dikatakan jika kecepatan dari suatu fluida meningkat, maka koefisien *losses elbow 90°* akan meningkat.

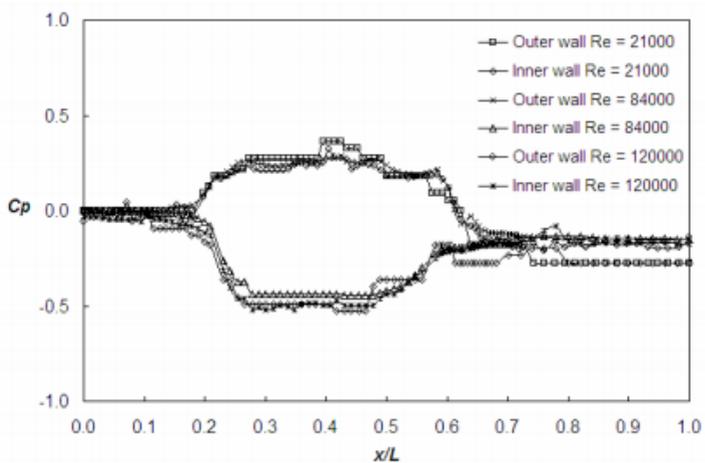
Sutardi dkk (2010) melakukan penelitian secara eksperimen aliran melewati sebuah *elbow*. *Elbow* yang digunakan berbentuk *rectangular* rasio radius lengkungan yang digunakan sebesar  $R/D_h = 1,875$  dengan atau tanpa *guide vane* serta sisi *rectangular ducting* dengan lebar 5 cm dan tinggi 10 cm. Uji eksperimen dilakukan dengan menggunakan 4 variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane*, satu *guide vane*, dua *guide vane*, dan tiga *guide vane*. Bilangan *Reynolds* yang digunakan mulai dari  $Re = 2.1 \times 10^4$ ,  $8.4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^5$ .

Hasil yang diperoleh dari penelitian secara eksperimen adalah, dengan penambahan *guide vane* baik satu, dua maupun tiga *guide vane* pada  $Re$  rendah dapat mengurangi *pressure drop*. Namun saat variasi  $Re$  aliran tinggi yaitu sekitar  $8.4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^5$  pada 4 variasi *guide vane* didapat hasil yang berbanding terbalik, dimana *pressure drop* yang dihasilkan semakin meningkat. Pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* diilustrasikan pada tabel 2.2.

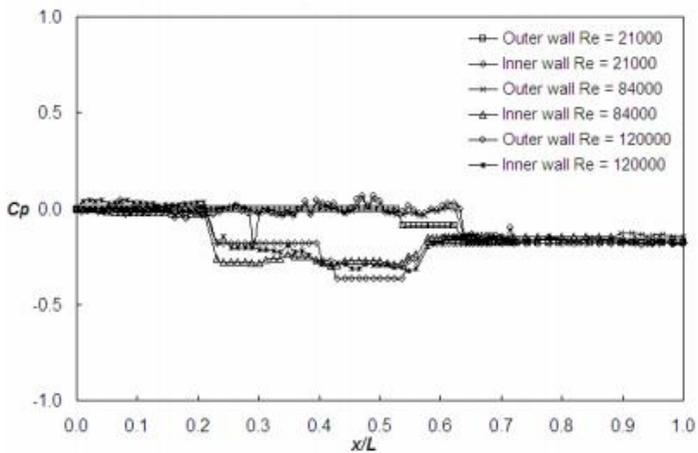
**Tabel 2.1** Pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* (Sutardi dkk, 2010)

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

Selain itu pada hasil penelitian ini didapatkan hasil distribusi  $C_p$  pada sisi *inner* dan *outer* tanpa penambahan *guide vane* dengan variasi  $Re_{Dh} = 2,1 \times 10^4$ ,  $8,4 \times 10^4$  dan  $12 \times 10^4$  dimana pada sisi *inner* terdapat perlambatan sampai dengan  $x/L = 0,25$  dilanjutkan dengan *separation loss* sampai dengan  $x/L = 0,5$  dan diteruskan dengan adanya percepatan, sedangkan sisi *outer* sebaliknya pada  $x/L = 0,25$  terjadi percepatan. Sehingga dapat diilustrasikan pada gambar 2.19.

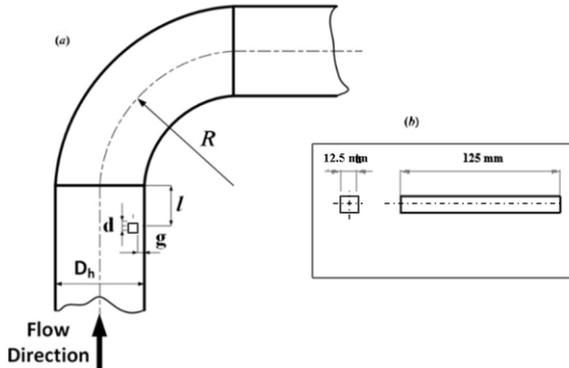


**Gambar 2.19** Distribusi  $C_p$  pada sisi *inner* dan *outer* tanpa *guide vane* (Sutardi dkk, 2010)



**Gambar 2.20** Distribusi  $C_p$  pada sisi *inner* dan *outer* dengan *guide vane* (Sutardi dkk, 2010)

Penelitian yang dilakukan oleh **Gigih(2017)** secara numerik pada *squaeduct* dengan *elbow*  $90^\circ$  da penempatan IDB pada daerah *inner upstream* dengan variasi jarak  $l/D_h$  sebesar 0.1, 0.3, dan 0.5.



**Gambar 2.21** Geometri simulasi (**Gigih,2017**)

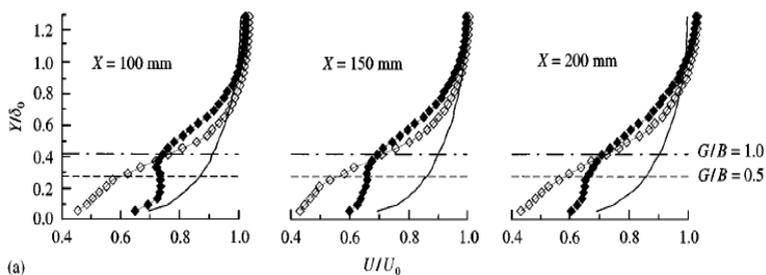
Dari hasil penelitian, penulis menyarankan untuk memperpanjang saluran hingga mencapai 25 sampai 40  $D_h$ , agar dapat terlihat sejauh mana aliran mencapai *fully developed*. Simulasi dilakukan pada *elbow* dengan  $R/D_h = 1$  atau 1.5, karena semakin besar  $R/D_h$  efek penambahan IDB tidak berpengaruh dalam mengurangi *pressure drop*.

**Choi & Lee (2010)** melakukan eksperimen pada sebuah *wind tunnel* dengan tinggi 0,6 m, lebar 0,72 m, dan panjang 6 m. Intensitas turbulensi *free-stream* pada bagian uji kurang dari 0,08% pada 10 m/s. Gambar 2.18 menunjukkan bentuk geometri silinder *elips* dan skema perlatan yang digunakan pada eksperimen ini. Sebuah plat datar dengan ketebalan 15 mm dan panjang 4,8 mm dipasang 100 mm diatas bagian permukaan dari bagian uji, dimana pada bagian depan plat datar tersebut berbentuk runcing membentuk sudut  $30^\circ$ . Silinder *elips* diletakkan pada 1,5m dari bagian depan plat datar tersebut. Selain itu, juga ditambahkan sebuah kawat pengganggu pada plat datar tersebut dengan diameter 3,5 mm yang diletakkan sejauh 100 mm dari

bagian ujung plat. *Boundary layer* terbentuk di atas bidang datar memiliki ketebalan 75 mm pada lokasi silinder. Selama eksperimen, kecepatan *free-stream* ( $U_o$ ) telah ditetapkan pada 10 m/s dan menggunakan *Reynolds Number* sesuai dengan tinggi dari penampang silinder yang digunakan, yaitu  $1,4 \times 10^4$ .

Dari eksperimen ini didapatkan bahwa untuk rasio *gap* yang kecil yaitu kurang dari  $G/B = 0,5$ , *drag coefficient* dari silinder *elips* ( $AR = 2$ ) meningkat secara perlahan seiring dengan peningkatan rasio *gap*. Selain itu, *drag coefficient* dari silinder sirkular meningkat secara cepat. Darisini dapat dilihat bahwa *drag coefficient* dari silinder *elips* adalah setengah dari silinder sirkular yang memiliki tinggi sama sebagai diameter silinder. Ketika silinder memiliki rasio *gap*  $G/B = 0$ , silinder tersebut memiliki *lift coefficient* positif. Untuk rasio *gap* kurang dari  $G/B = 0,5$  silinder *elips* memiliki *lift coefficient* yang lebih tinggi daripada silinder sirkular. Seiring dengan bertambahnya rasio *gap*, *lift coefficient* menurun dan konvergen menuju ke angka nol.

Gambar 2.22 menunjukkan *streamwise velocity profile* yang diukur pada  $X = 100, 150$ , dan  $200$  mm, serta *velocity profile* tanpa silinder. Dari situ, didapati bahwa pada silinder *elips* *vortex* terjadi di daerah mendekati *wake* ketika rasio *gap* lebih besar dari *critical value*, yaitu  $G/B = 0,4$  dimana seiring menurunnya rasio *gap*, frekuensi *vortex* juga tiba-tiba mengalami penurunan.



**Gambar 2.22** Mean streamwise velocity profiles pada  $X = 100, 150$ , dan  $200$  mm;  $AR = 1$ ; — tanpa silinder;  $\diamond$   $G/B = 0,5$ ;  $\blacklozenge$   $G/B = 1,0$  (Choi & Lee, 2010)

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas metode penelitian yang digunakan, metode penelitian yang digunakan yaitu secara numerik, menggunakan piranti lunak *CFD* komersial untuk menganalisis karakteristik aliran fluida tiga dimensi dalam *square duct* dan *square elbow 90° single guidevane*, dimana pada daerah *inner upstream* diletakkan *inlet disturbance body* dengan gap  $g/d=0.2$  dengan variasi jarak  $l/D_h = 0.1, 0.3, \text{ dan } 0.5$ .

Berikut metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

#### 1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari serta mempelajari beberapa literatur yang terkait dengan tema penelitian, seperti mengumpulkan informasi berupa artikel ilmiah, jurnal, *text book*, serta hasil penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya.

#### 2. Simulasi

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui adanya fenomena aliran tiga dimensi (*3D*) sesudah melewati *square elbow 90° single guidevane* dengan adanya penambahan *circular disturbance body(CDB)* pada sisi *inner wall upstream duct* dengan variasi  $l/D_h = 0.1, 0.3, \text{ dan } 0.5$  dan gap  $g/d = 0.2$ . Pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

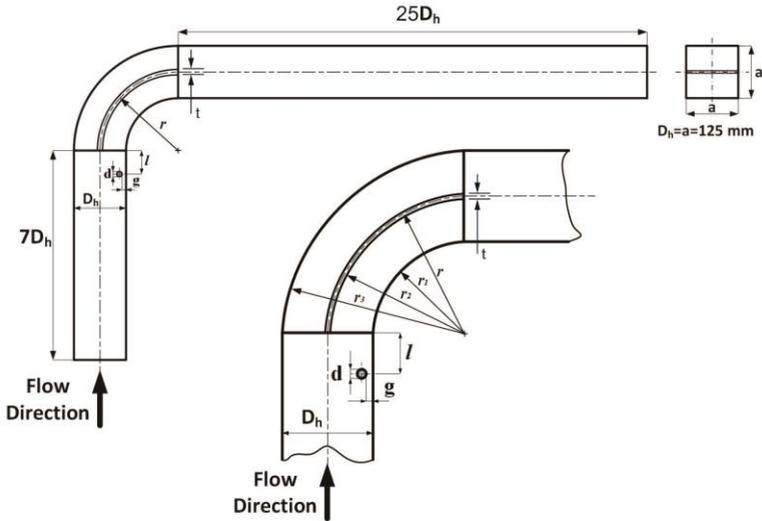
#### 3. Penyusunan Laporan

Laporan ini tersusun atas pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, analisa dan pembahasan serta kesimpulan dan saran.

### 3.1 Geometri Ducting

Penelitian secara numerik ini memiliki bentuk ducting berpenampang persegi (*square*), terbagi atas tiga bagian besar yang terhubung yaitu bagian *upstream duct*, *elbow 90°* dan

downstream duct. Pada bagian *upstream duct* terpasang *inlet disturbance body* berbentuk balok persegi panjang.

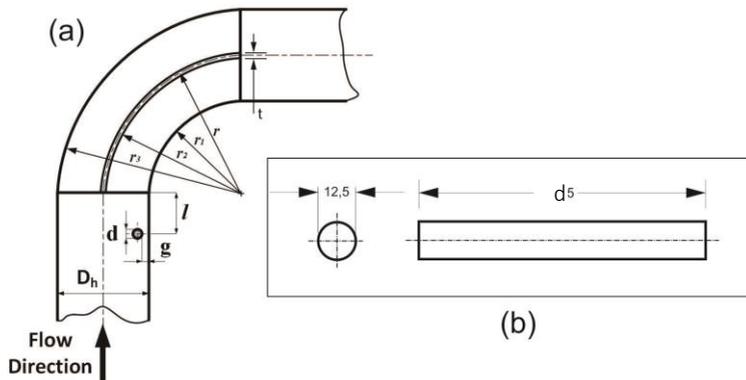


**Gambar 3.1** Geometri *straight duct*, *square elbow 90°*, serta bodi pengganggu

Spesifikasi dari geometri ini adalah sebagai berikut:

- Bentuk penampang : *square*
- $L_i$ (*upstream duct*) : 875 mm
- $L_o$ (*downstream duct*) : 3125 mm
- $R$ (*elbow 90° radius*) : 187.5 mm
- $D_h$ (*diameter hidrolis*) : 125 mm
- $l$  (*jarak IDB dengan elbow*) : 12.5, 37.5 dan 62.5 mm
- $g$  (*gap*) : 1 mm
- $t$  (*tebal guidevane*) : 3 mm
- $d$  (*diameter IDB*) : 5 mm

Berikut adalah gambar detail pada posisi bodi pengganggu, dapat diilustrasikan pada gambar 3.2 (a) dan (b).



**Gambar 3.2** Gambar detail posisi penempatan bodi silinder pengganggu (a) dan bentuk variasi diameter silinder sirkular (b)

### 3.2 Metode Numerik

Penelitian ini menggunakan piranti lunak komputasi fluida (*CFD*) komersial untuk melakukan pendekatan numerik dan membuat model geometri, serta melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada penelitian numerik dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap *pre-processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

#### 3.2.1 Tahap Pre-Processing

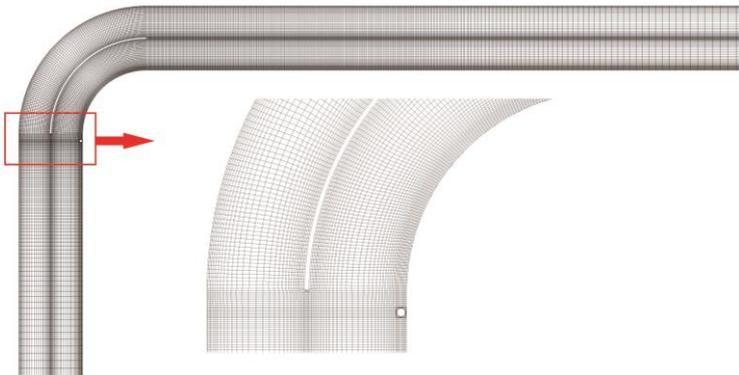
- Pembuatan model *3D* berupa *ducting* mengacu pada geometri gambar 3.1. Dimana model *ducting* dibuat dengan variasi jarak *circular disturbance body*. Pembuatan geometri dengan membuat beberapa koordinat serta *edge*.
- Pembuatan *meshing* dilakukan untuk setiap variasi diameter bodi pengganggu. *Meshing* dilakukan dengan membagi volume menjadi 3 bagian, yaitu *upstream straight duct*, *square elbow 90<sup>0</sup>*, dan *downstream straight duct*. *Meshing* volume yang digunakan dengan tipe *hexahedral-map*. Metode *meshing* yang digunakan adalah sistem *grading* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada sisi dekat dinding serta rapat pada sisi bodi pengganggu. Contoh hasil

dari *meshing* pada posisi  $l/D_h = 0.1$  diilustrasikan pada gambar 3.3.



**Gambar 3.3** *Meshing square ducting* tampak isometri

Untuk memperjelas *meshing* yang sudah dibuat sehingga diperlukan gambar detail dari tampak atas, dapat diilustrasikan pada gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Gambar detail *meshing square ducting* tampak atas

### 3.2.2 Tahap Processing

#### a) Grid

Langkah pertama yang dilakukan adalah *read* untuk *file* hasil *meshing* berbentuk *.msh*. Kemudian *grid checking* untuk melihat apakah grid pada *meshing* tersebut sudah bagus untuk dilakukan *post-processing* apabila tidak sesuai maka akan muncul tulisan *non-positive volume*, Setelah itu skala ditentukan dalam satuan milimeter(*mm*).

#### b) Models

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver pressure based, steady* dan menggunakan model turbulen *k-ε reliable*.

#### c) Materials

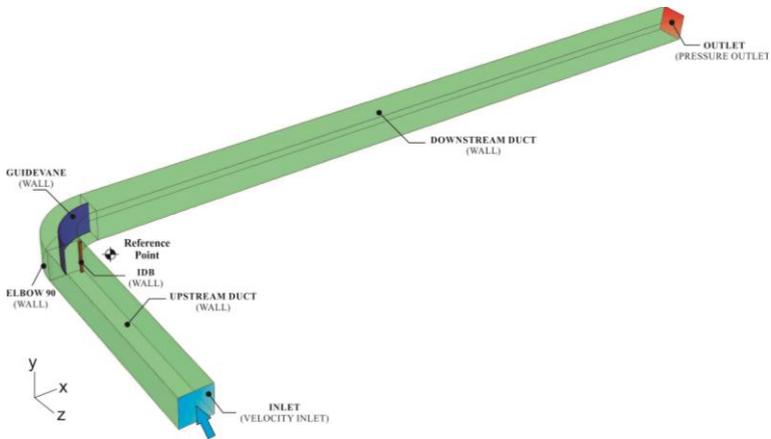
Data *properties* material fluida yaitu udara pada temperatur ruangan  $T = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan *density* ( $\rho$ )  $1,1698 \text{ kg/m}^3$  dan *viskositas absolute* ( $\mu$ )  $1,84 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$ .

#### d) Operating conditions

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar  $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$  (*pascal*).

#### e) Boundary conditions

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji pada *inlet, outlet* serta *wall*. Daerah *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dalam (*m/s*) dimana *velocity* yang diinputkan yaitu variasi 2, 6 dan 12 *m/s* serta *turbulence intensity* yang sudah dihitung dan diameter hidraulik 125 *mm*, kondisi batas *upstream straight duct, downstream straight duct, inlet disturbance body, square elbow 90<sup>0</sup>* didefinisikan sebagai *wall* dengan faktor kekasaran dibuat *default* dan *no slip condition*, sedangkan pada daerah *outlet* didefinisikan sebagai *pressure outlet* yang mana nilainya didapat dari eksperimen. Domain permodelan dapat digambarkan pada gambar 3.5 Berikut :



**Gambar 3.5** Domain permodelan *square duct*

f) *Solution*

*Solution* pada penelitian ini akan menggunakan metode *SIMPLE* serta *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*.

g) *Initialize*

Merupakan langkah awal untuk proses iterasi agar mudah mencapai *convergen*, langkah ini dapat dihitung dari *inlet*, *outlet*, atau daerah lainnya. Dalam kasus ini langkah awal dimulai dari sisi *inlet*.

h) *Monitor residual* dan *surface*

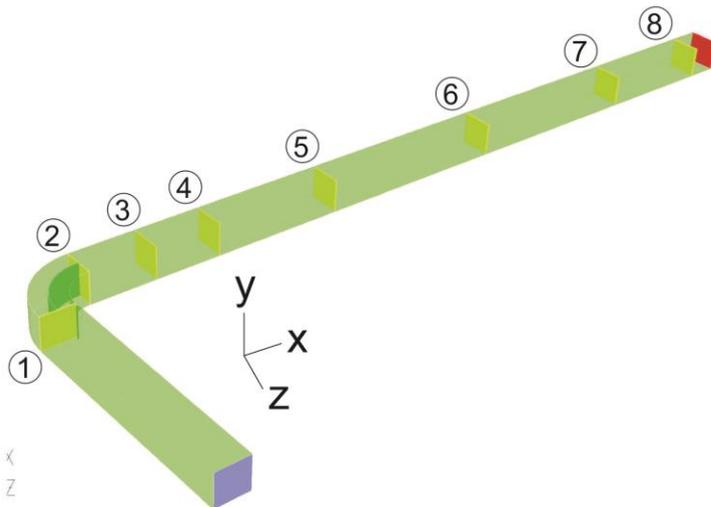
Pada proses iterasi berlangsung harga kriteria konvergensi ditentukan agar proses iterasi tidak berlangsung terlalu lama. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar  $1 \times 10^{-6}$  untuk *continuity*, *x-velocity*, *y-velocity*, *z-velocity*, *k* dan  $\omega$ . *Monitor surface* ditampilkan untuk mengetahui nilai *pressure drop* pada sisi *inlet* dan *outlet* saluran. Proses iterasi dinyatakan telah *convergen* setelah residualnya mencapai nilai lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan. Serta ditentukan juga *plot* proses iterasi.

i) *Iterate*

Langkah selanjutnya setelah penetapan harga *monitor residual* adalah *iterate*, yang merupakan langkah perhitungan pada piranti lunak simulasi *CFD* komersial. *Iterate* akan secara otomatis berhenti apabila semua nilai residualnya mencapai nilai lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan dapat dikatakan iterasi sudah *convergen*. Apabila tidak tercapai kriteria *convergen* maka dilakukan tahapan untuk memperbaiki pembuatan *meshing*.

j) *Post-processing*

Merupakan penampilan hasil setelah dilakukan iterasi. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa distribusi nilai  $C_p$  pada *inner* dan *outer elbow*, sedangkan *pressure drop* pada *upstream*, *elbow*, *downstream* serta *overall*. Data kualitatif berupa penampilan *velocity profile*, *countur velocity*, dan *streamline* pada setiap *cross section*. Posisi pengambilan data diilustrasikan pada gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Posisi pengambilan data (*cross section*).

Gambar 3.6 mengilustrasikan posisi pengambilan data mulai dari profil kecepatan serta kontur kecepatan pada sisi *elbow* serta *downstream*. Posisi pengambilan data pada *elbow* diambil di posisi  $0^0$  (1) dan  $90^0$  (2) serta pada *downstream* posisi pengambilan diambil pada jarak  $x/D_h = 2$  (3),  $x/D_h = 4$  (4),  $x/D_h = 8$  (5),  $x/D_h = 14$  (6),  $x/D_h = 20$  (7) dan  $x/D_h = 24$  (8) dimana referensi titik 0 terdapat di titik *center elbow*  $90^0$ .

### 3.3 Langkah-langkah Penelitian

Langkah-langkah penelitian numerik pada *square duct* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan tabel sehingga dapat diilustrasikan pada tabel 1.

**Tabel 3.1.** Urutan langkah penelitian

Langkah-langkah penelitian
Melakukan pembuatan geometri <i>ducting</i> .
Memodelkan <i>ducting</i> dengan menggunakan <i>gambit</i> ( <i>pre-processing</i> ).
Membuat <i>meshing</i> dengan metode pembuatan <i>meshing</i> berupa <i>grading mesh</i> . Menggunakan <i>mesh</i> tipe <i>hexedral map</i> .
Menentukan <i>boundary condition</i> pada model uji, serta batasan yang digunakan dalam penyelesaian simulasi seperti <i>inlet</i> , <i>outlet</i> , dan <i>wall</i> serta beberapa interior tambahan.
Menentukan batas operasi pada <i>fluent</i> dalam simulasi model uji, meliputi : <i>models</i> , <i>materials</i> , <i>boundary condition</i> , <i>solution</i> , <i>initialize</i> , <i>monitor residual</i> , dan <i>iterate</i> ( <i>post-processing</i> ).
Melakukan iterasi hingga mencapai konvergen. Bila simulasi belum konvergen, maka pembuatan <i>mesh</i> pada model uji diulangi lagi.

Setelah didapatkan hasil konvergen maka selanjutnya dilakukan analisa <i>grid independency</i> . Analisa <i>grid independency</i> divariasikan sebanyak 6 variasi jumlah <i>mesh</i> dengan model turbulensi. yaitu <i>k<math>\omega</math>-standart</i> .
Melakukan simulasi pada model uji dengan variasi yang ditentukan yaitu : variasi jarak ( $l/D_h = 0,1$ , 0,3 dan 0,5) serta variasi kecepatan dari 2 ,6 dan 12 m/s.
Melakukan <i>post-processing</i> tiap variasi.
Analisa hasil dan penarikan kesimpulan

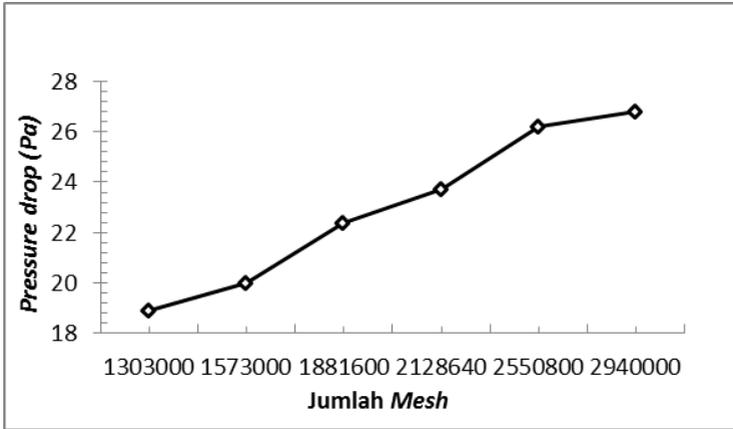
### 3.4 Analisa *Grid Independency*

Dari beberapa hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *CFD*, telah dilakukan variasi *mesh* pada *square ducting*. Variasi *mesh* dilakukan pada *square duct* tanpa diberi *inlet disturbance body*. Variasi *mesh* dibuat sebanyak enam buah dengan kerapatan *mesh* yang berbeda beda.

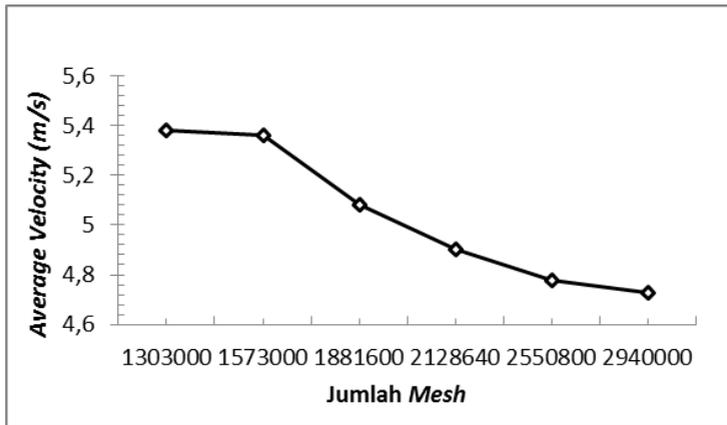
Analisa *grid independency*, dapat dilihat pada tabel 3.2

**Tabel 3.2** *Grid independency* ditinjau dari *Pressure drop* pada *ducting*

Variasi Mesh	Jumlah Mesh	$Y^+$	Pressure Drop (Pa)	Error (%)	Average Velocity (m/s)	Error (%)
1	$1.3 \times 10^6$	21.3	18.9	-	5.38	-
2	$1.57 \times 10^6$	20.9	20	5.89	5.36	0.37
3	$1.88 \times 10^6$	20.7	22.4	12	5.08	5.5
4	$2.12 \times 10^6$	20.9	23.7	5.8	4.90	3.6
5	$2.55 \times 10^6$	20.9	26.2	10.5	4.78	2.5
6	$2.94 \times 10^6$	20.8	27.1	3.43	4.73	1.05



**Gambar 3.7** *Pressure drop vs mesh Cells*



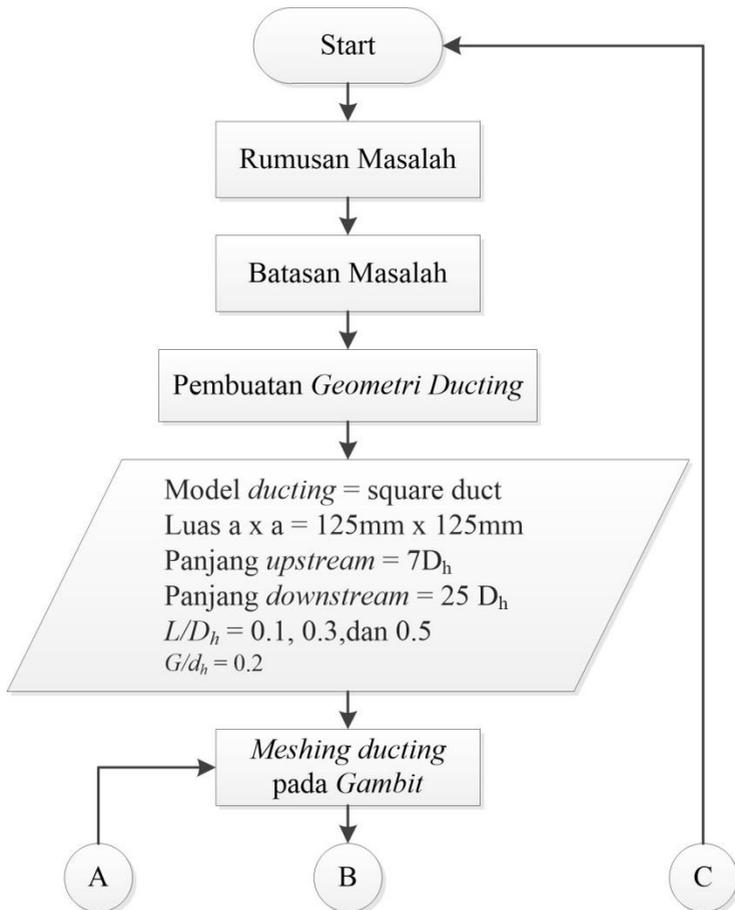
**Gambar 3.8** *Average velocity vs mesh Cells pada  $x/D_h=2$*

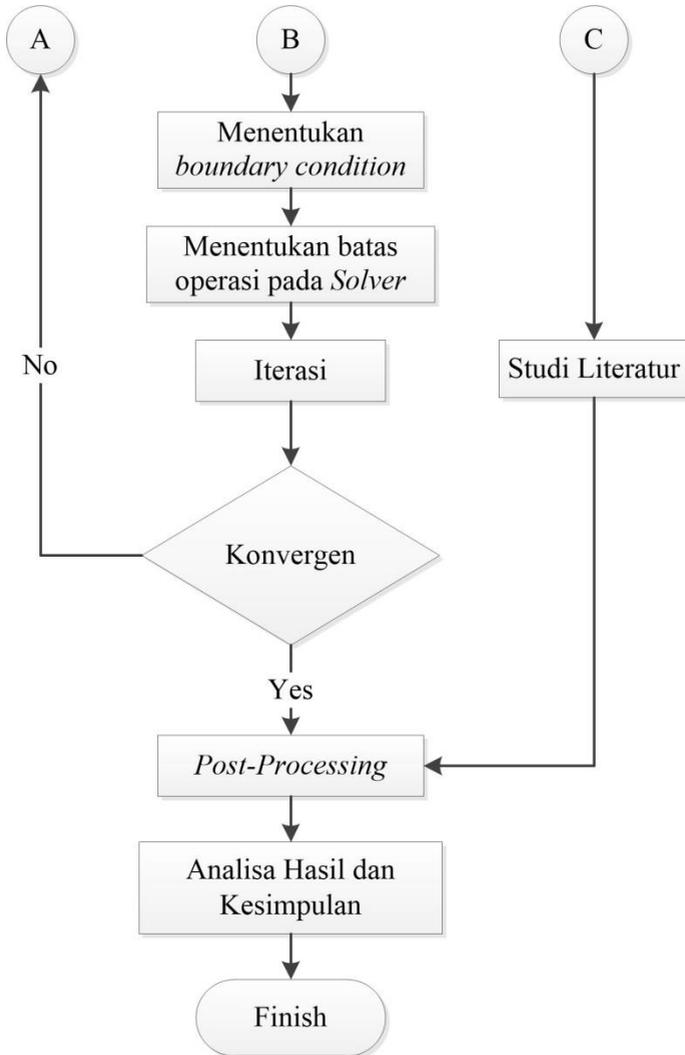
Dari hasil *grid independency test* yang telah dilakukan diperoleh data ke-enam variasi kerapatan *mesh* yang berupa *pressure drop*, *average velocity* pada *downstream* dengan jarak  $x/D_h=2$  dan jumlah *mesh*. Dari tabel 3.2, gambar 3.7 dan gambar 3.8 dapat diketahui bahwa perubahan nilai untuk *pressure drop* maupun *average velocity* pada variasi *mesh* ke 5 dan 6 tidak

terjadi perubahan nilai yang terlalu signifikan. Sehingga penelitian numerik ini menggunakan variasi *mesh* model ke-5.

### 3.5 Flowchart Penelitian

Secara singkat prosedur penelitian numerik pada *square duct* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *flow chart* yang ditunjukkan pada gambar 3.8





**Gambar 3.9** Flowchart penelitian numerik.

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditampilkan hasil studi numerik secara kuantitatif dan kualitatif. Data secara kuantitatif ditampilkan berupa grafik *velocity profile*, grafik *coefficient of pressure elbow 90<sup>0</sup>*, dan data *pressure drop*. Data secara kualitatif ditampilkan berupa visualisasi kontur kecepatan sepanjang ducting, vektor kecepatan pada *cross section* tertentu serta kontur *streamline* yang bertujuan untuk menunjukkan *secondary flow* maupun separasi aliran.

Analisa dan pembahasan dilakukan pada ducting tanpa *CDB* dan ducting dengan variasi *CDB* ( $l/D_h = 0.1; 0.3; 0.5$ ) dengan *Reynolds number* sebesar  $1.6 \times 10^4$ ,  $4.8 \times 10^4$  dan  $9.5 \times 10^4$  pada setiap variasi *ducting*. Hasil yang dibahas dalam penelitian ini diambil pada kecepatan 2 m/s atau pada  $Re = 1.6 \times 10^4$ , pembahasan tersebut meliputi pengambilan data secara kualitatif dan kuantitatif seperti profil kecepatan pada setiap *cross-section*, kontur kecepatan dan *strimeline* tanpa *CDB* dan dengan masing-masing variasi *CDB*, sedangkan untuk data *pressure drop* yang ditampilkan dalam tabel diambil pada semua variasi  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$ ,  $4.8 \times 10^4$  dan  $9.5 \times 10^4$  atau pada kecepatan 2, 6, dan 12 m/s, untuk *coefficient of pressure* diambil pada variasi  $Re_{D_h} = 4.8 \times 10^4$ . Untuk lebih jelasnya pembahasan akan dibahas dalam beberapa bab dan sub bab berikut.

### 4.1 Perbandingan Data Kuantitatif Setiap Variasi Model *Ducting* pada Setiap Variasi Kecepatan

Pada sub bab ini ini akan ditampilkan data nilai dari *pressure drop* dan *coefficient of pressure* secara keseluruhan dari masing-masing variasi *CDB*, data akan ditampilkan dalam bentuk tabel serta grafik.

#### 4.1.1 *Pressure Drop*

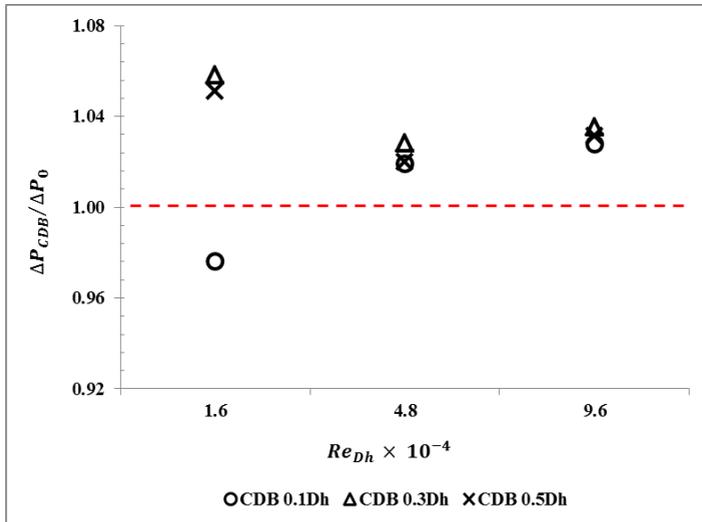
Data kuantitatif dari *pressure drop* di bagi atas empat bagian yaitu *pressure drop* pada *overall*, *upstream duct*, *elbow 90<sup>0</sup>*, serta *downstream duct*. Data akan ditampilkan dalam tabel dengan

hasil dari olahan perangkat lunak *CFD* komersial menggunakan *facet average static pressure*.

Pada tabel 4.1 menampilkan hasil dari *pressure drop overall* untuk semua variasi *ducting* maupun *Reynolds number*. Ditunjukkan dalam perbandingan antara  $\Delta P_{CDB}$  (*Pressure drop* pada *ducting* yang diberi *CDB*) dengan  $\Delta P_0$  (*Pressure drop* pada *ducting* tanpa *CDB*), dimana jika hasilnya kurang dari 1 maka terjadi penurunan *pressure drop* pada variasi tersebut. Dapat dilihat bahwa nilai *pressure drop* pada variasi penempatan *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.1$  dan  $Re = 1.6 \times 10^4$  mengalami penurunan dibandingkan dengan variasi *ducting* tanpa *CDB*. Hal ini terjadi karena pada penambahan *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.1$  meningkatkan intensitas *turbulent* pada dinding *inner elbow 90°*, sehingga mengakibatkan momentum aliran yang dapat menunda separasi aliran dan mampu untuk melawan *adverse pressure*. Untuk memudahkan pengamatan data dirubah dalam bentuk grafik pada gambar 4.1 dimana sumbu *x* sebagai variasi bilangan *Reynolds* dan sumbu *y* adalah dalam perbandingan antara  $\Delta P_{CDB}$  (*Pressure drop* pada *ducting* yang diberi *CDB*) dengan  $\Delta P_0$  (*Pressure drop* pada *ducting* tanpa *CDB*).

**Tabel 4.1** *Pressure drop overall section inlet dan outlet pada ducting* untuk semua variasi *Reynolds number*.

<i>Re</i>	<i>Pressure Drop Overall</i>		
	<i>Variasi</i>	$\Delta P$ ( $N/m^2$ )	$\Delta P_{CDB}/\Delta P_0$
$1.6 \times 10^4$	Tanpa <i>CDB</i>	2.93	1
	0.1 <i>Dh</i>	2.86	0.98
	0.3 <i>Dh</i>	3.1	1.06
	0.5 <i>Dh</i>	3.08	1.05
$4.8 \times 10^4$	Tanpa <i>CDB</i>	26.91	1
	0.1 <i>Dh</i>	27.43	1.02
	0.3 <i>Dh</i>	27.67	1.03
	0.5 <i>Dh</i>	27.45	1.02
$9.5 \times 10^4$	Tanpa <i>CDB</i>	81.58	1
	0.1 <i>Dh</i>	83.84	1.03
	0.3 <i>Dh</i>	84.46	1.04
	0.5 <i>Dh</i>	84.15	1.03

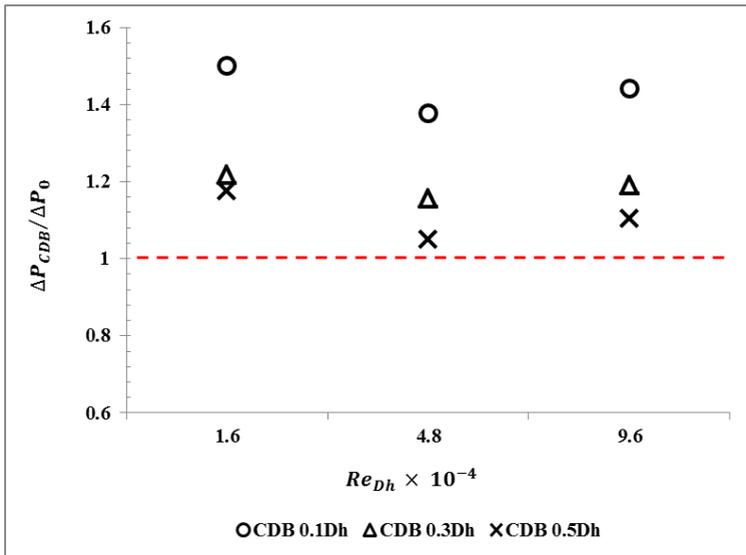


**Gambar 4.1** Grafik *Pressure drop* terhadap *Reynolds number* untuk semua variasi *ducting* untuk pengambilan *overall*

Pada tabel 4.2 menampilkan hasil dari *pressure drop* pada *section inlet* dan *outlet upstream duct*. Nilai *pressure drop* tanpa CDB hasilnya lebih kecil daripada diberikan CDB. *Pressure drop* tertinggi terjadi pada penempatan CDB dengan jarak  $l/D_h = 0.1$ . Hal ini terjadi akibat dari penambahan CDB maupun *guidevane* di dalam *elbow90°* yang membuat aliran pada sisi *outlet upstream duct* terganggu dan mempengaruhi *pressure* di sisi tersebut. Selain itu juga karena berkurangnya luas penampang yang dilewati aliran. Untuk memudahkan pengamatan data dirubah dalam bentuk grafik pada gambar 4.2 dimana sumbu *x* sebagai variasi bilangan *Reynolds* dan sumbu *y* adalah dalam perbandingan antara  $\Delta P_{CDB}$  (*Pressure drop* pada *ducting* yang diberi CDB) dengan  $\Delta P_0$  (*Pressure drop* pada *ducting* tanpa CDB).

**Tabel 4.2** *Pressure drop section inlet* dan *outlet* pada *upstream duct* untuk semua variasi *Reynolds number*.

$Re$	Variasi	Upstream		
		$P_{inlet}$	$P_{outlet}$	$\Delta P (N/m^2)$
$1.6 \times 10^4$	Tanpa CDB	-3.67	-4.41	0.74
	0.1 Dh	-3.96	-5.07	1.11
	0.3 Dh	-3.77	-4.67	0.9
	0.5 Dh	-4.16	-5.03	0.87
$4.8 \times 10^4$	Tanpa CDB	-9.13	-15.7	6.57
	0.1 Dh	-8.16	-17.21	9.05
	0.3 Dh	-8.1	-15.69	7.59
	0.5 Dh	-8.64	-15.54	6.9
$9.5 \times 10^4$	Tanpa CDB	-62.39	-82.36	19.97
	0.1 Dh	-29.37	-58.15	28.78
	0.3 Dh	-28.99	-52.77	23.78
	0.5 Dh	-29.46	-51.5	22.04

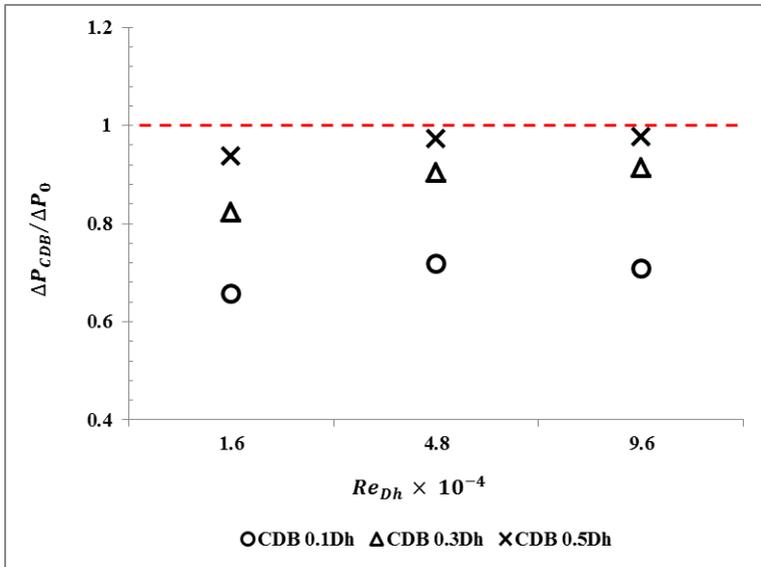


**Gambar 4.2** Grafik *Pressure drop* terhadap *Reynolds number* untuk semua variasi *ducting* untuk pengambilan di *upstream duct* Pada tabel 4.3 menampilkan hasil dari *pressure drop* pada *section inlet* dan *outlet elbow 90°*. Nilai *pressure drop* untuk semua

variasi penempatan *CDB* lebih kecil daripada tanpa *CDB* pada semua variasi *Reynolds number*. Hal ini terjadi karena dengan adanya *CDB* kecepatan aliran pada *inner elbow* semakin meningkat dan terjadi momentum aliran, sehingga menyebabkan tertundanya separasi aliran. Untuk memudahkan pengamatan data dirubah dalam bentuk grafik pada gambar 4.3 dimana sumbu *x* sebagai variasi bilangan *Reynolds* dan sumbu *y* adalah dalam perbandingan antara  $\Delta P_{CDB}$  (*Pressure drop* pada *ducting* yang diberi *CDB*) dengan  $\Delta P_0$  (*Pressure drop* pada *ducting* tanpa *CDB*).

**Tabel 4.3** *Pressure drop section inlet dan outlet pada elbow90°* untuk semua variasi *Reynolds number*.

<i>Re</i>	<i>Variasi</i>	<i>Elbow90°</i>		
		<i>P inlet</i>	<i>P outlet</i>	$\Delta P (N/m^2)$
$1.6 \times 10^4$	Tanpa <i>CDB</i>	-4.41	-5.37	0.96
	0.1 Dh	-5.07	-5.7	0.63
	0.3 Dh	-4.67	-5.46	0.79
	0.5 Dh	-5.03	-5.93	0.9
$4.8 \times 10^4$	Tanpa <i>CDB</i>	-15.7	-22.38	6.68
	0.1 Dh	-17.21	-22.01	4.8
	0.3 Dh	-15.69	-21.73	6.04
	0.5 Dh	-15.54	-22.04	6.5
$9.5 \times 10^4$	Tanpa <i>CDB</i>	-82.36	-103.71	21.35
	0.1 Dh	-58.15	-73.27	15.12
	0.3 Dh	-52.77	-72.27	19.5
	0.5 Dh	-51.5	-72.34	20.84

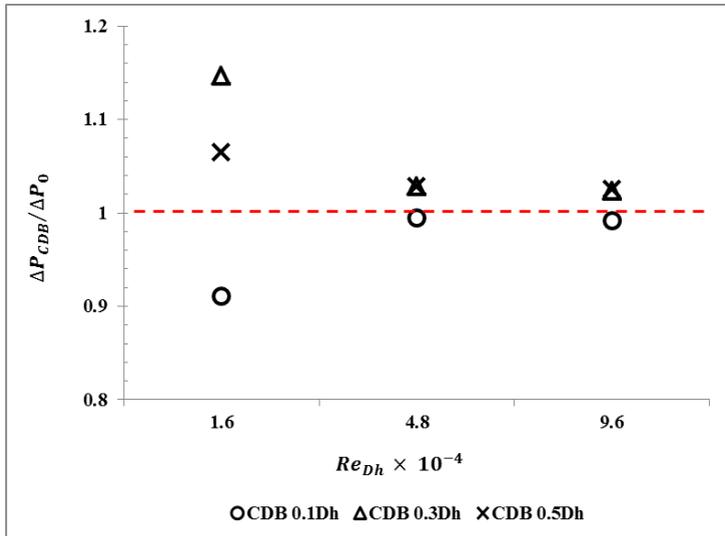


**Gambar 4.3** Grafik *Pressure drop* terhadap *Reynolds number* untuk semua variasi *ducting* untuk pengambilan di *elbow*  $90^\circ$

Pada tabel 4.4 menampilkan hasil dari *pressure drop* pada *section inlet* dan *outlet* pada *downstream duct*. Nilai *pressure drop* pada variasi penempatan CDB dengan jarak  $l/D_h = 0.1$  lebih kecil dibandingkan dengan variasi tanpa CDB untuk semua variasi *Reynolds number*. Hal ini terjadi karena pada variasi  $l/D_h = 0.1$  dapat menunda separasi aliran sehingga mampu melawan *adverse pressure* yang merupakan salah satu penyebab terjadinya *pressure drop* pada daerah *downstream duct*. Untuk memudahkan pengamatan data dirubah dalam bentuk grafik pada gambar 4.4 dimana sumbu  $x$  sebagai variasi bilangan *Reynolds* dan sumbu  $y$  adalah dalam perbandingan antara  $\Delta P_{CDB}$  (*Pressure drop* pada *ducting* yang diberi CDB) dengan  $\Delta P_0$  (*Pressure drop* pada *ducting* tanpa CDB).

**Tabel 4.4** Pressure drop section inlet dan outlet pada downstream duct untuk semua variasi Reynolds number.

Re	Variasi	Downstream		
		P <sub>inlet</sub>	P <sub>outlet</sub>	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )
$1.6 \times 10^4$	Tanpa CDB	-5.37	-6.6	1.23
	0.1 Dh	-5.7	-6.82	1.12
	0.3 Dh	-5.46	-6.87	1.41
	0.5 Dh	-5.93	-7.24	1.31
$4.8 \times 10^4$	Tanpa CDB	-22.38	-36.04	13.66
	0.1 Dh	-22.01	-35.59	13.58
	0.3 Dh	-21.73	-35.77	14.04
	0.5 Dh	-22.04	-36.09	14.05
$9.5 \times 10^4$	Tanpa CDB	-103.71	-143.97	40.26
	0.1 Dh	-73.27	-113.21	39.94
	0.3 Dh	-72.27	-113.45	41.18
	0.5 Dh	-72.34	-113.61	41.27



**Gambar 4.4** Grafik Pressure drop terhadap Reynolds number untuk semua variasi ducting untuk pengambilan di downstream duct

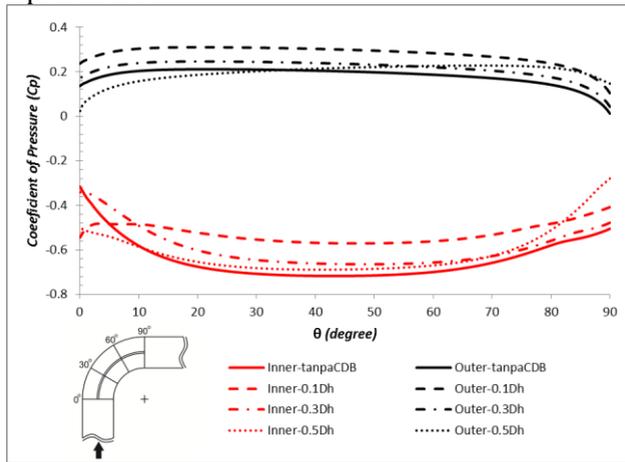
#### 4.1.2 *Coefficient of Pressure*

Data kuantitatif dari *coefficient of pressure* diambil pada semua variasi penempatan *CDB* dan semua variasi *Reynolds number*. Data akan ditampilkan dalam sebuah grafik yang sudah diolah sebelumnya. Pada gambar 4.5 ditampilkan grafik dari *coefficient of pressure* pada *elbow* 90° mulai dari sudut 0° yang merupakan sisi *inlet elbow* sampai dengan 90° yang merupakan sisi *outlet elbow*. *Coefficient of pressure* dihitung secara manual dengan mengambil data kecepatan dan tekanan referensi pada sisi *inlet elbow* serta *plot* data tekanan statis pada sisi *inner* dan *outer elbow*.

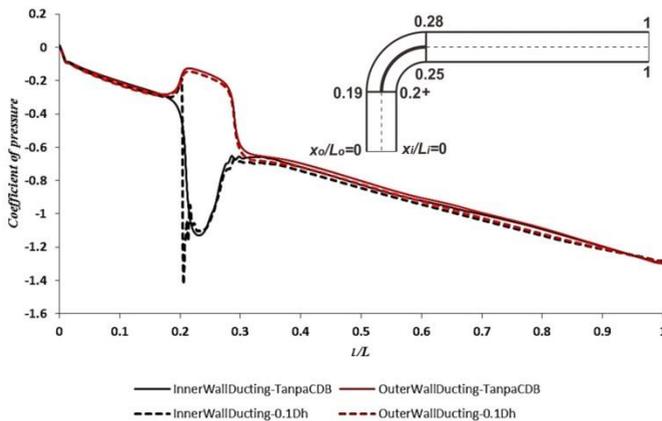
Dari data gambar 4.5, untuk variasi tanpa *CDB* pada sisi *inner wall elbow* terlihat *trendline* grafik menurun sampai sekitar sudut 25° ini menunjukkan aliran mengalami akselerasi dan kemudian *trendline* meningkat mulai dari sekitar sudut 70° sampai sudut 90° yang menunjukkan aliran mengalami deselerasi. Lalu pada sisi *outer wall* terlihat *trendline* meningkat dari sudut 0° sampai sekitar sudut 10° yang menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi, kemudian aliran mengalami akselerasi yang ditandai dengan menurunnya *trendline* pada sudut sekitar 80° sampai 90°. Pada *elbow* dengan penambahan *CDB* dengan  $l/D_h = 0.1$  pada sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami deselerasi sampai sekitar sudut 10° yang kemudian *trendline* grafik cenderung konstan sampai sudut 90°.

Penempatan *CDB* pada jarak  $l/D_h = 0.3$  pada sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami akselerasi pada sudut 0° sampai sekitar sudut 20° lalu aliran mengalami deselerasi kembali pada sudut sekitar 70° sampai sudut 90°. *Trendline* grafik hampir sama juga pada variasi penempatan *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.5$  yang membedakan hanya pada nilai dari *coefficient of pressure*. Sedangkan pada sisi *outer wall* untuk semua variasi penempatan *CDB* *trendline* grafik tidak jauh berbeda dengan variasi tanpa *CDB* perbedaannya hanya pada nilai dari *coefficient of pressure*. Akselerasi pada aliran menunjukkan bahwa aliran seolah-olah melewati *nozzle* pada *elbow* sedangkan aliran yang mengalami

deselerasi menunjukkan bahwa aliran seolah-olah melewati *diffuser* pada *elbow*.



**Gambar 4.5** *Coefficient of Pressure* pada *elbow*  $90^\circ$  dengan variasi jarak CDB  $l/D_h = 0.1; 0.3; 0.5$  dan variasi *Reynolds number* sebesar  $4.8 \times 10^4$ .



**Gambar 4.6** *Coefficient of Pressure* pada *ducting overall* dengan variasi tanpa dan dengan CDB  $l/D_h = 0.1$  dan variasi *Reynolds number* sebesar  $1.6 \times 10^4$

Pada gambar 4.6 ditampilkan tentang distribusi tekanan sepanjang saluran yaitu pada *upstream*, *elbow*90° dan *downstream*. Data disajikan dalam bentuk grafik antara sisi *inner wall* dan *outer wall*. Koordinat disajikan dalam bentuk  $l/L$  dimana  $l$  adalah panjang tertentu pada *wall* saluran sedangkan  $L$  adalah panjang total *wall*(*inner* ataupun *outer*). Dari grafik tersebut didapatkan data berupa  $\Delta C_p$  yaitu selisih antara  $C_{p_{inlet}}$  ( $C_p$  pada *inlet ducting*) dan  $C_{p_{outlet}}$  ( $C_p$  pada *outlet ducting*).

$$\Delta C_p = C_{p_{inlet}} - C_{p_{outlet}}$$

Pada *ducting* dengan variasi  $l/D_h = 0.1$  didapat  $C_{p_{inlet}} = -0.007$  dan  $C_{p_{outlet}} = -1.28$ . Dimana  $\rho = 1.1698 \text{ kg/m}^3$ ,  $U_{ref} = 1.95 \text{ m/s}^2$ , sehingga:

$$\Delta C_p = C_{p_{inlet}} - C_{p_{outlet}}$$

$$\Delta C_p = \frac{P_{c_{inlet}} - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} - \frac{P_{c_{outlet}} - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$$

$$\Delta C_p = -0.015 - (-2.875) = 2.859$$

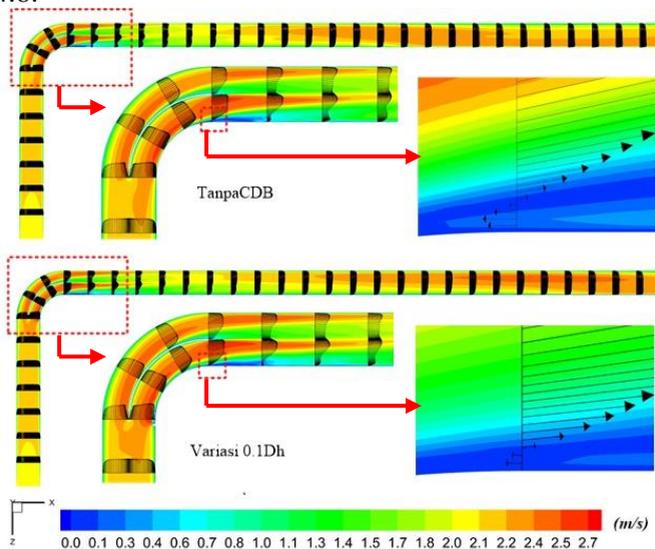
Nilai  $\Delta C_p$  tersebut sama dengan nilai  $\Delta P$  yang ditampilkan pada tabel 4.1 sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai  $\Delta C_p$  juga dapat menggambarkan  $\Delta P$ (*pressure drop*) pada saluran tersebut.

#### 4.2 Perbandingan Distribusi Velocity Profile sepanjang Ducting dengan Countur Velocity

Pada sub-bab yang ditampilkan vektor kecepatan tiap  $1D_h$  sepanjang *ducting* dengan *CDB* maupun tanpa *CDB* serta visualisasi aliran fluida berupa kontur kecepatan yang diambil pada posisi ( $y/D_h = 0.5$ ) sepanjang *ducting*. Data tersebut diambil dari hasil *post-processing* perangkat lunak *CFD* komersial.

#### 4.2.1 Perbandingan Distribusi Vektor Kecepatan Sepanjang *Ducting* dengan Kontur Kecepatan (tanpa *CDB* dan dengan *CDB* $l/D_h = 0.1$ )

Profil kecepatan fluida pada *ducting* dipengaruhi oleh radius kelengkungan *elbow*  $90^\circ$  serta variasi penempatan posisi *CDB*, ke-dua factor tersebut membuat profil kecepatan pada setiap *cross-section*nya berubah yang kemudian akan diamati bagaimana perkembangan aliran didalam *ducting* tersebut. Distribusi kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ) dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada satu titik dalam suatu *section* dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan udara masuk pada *ducting* yang telah ditentukan sebesar 2m/s. Berikut perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran, pada bidang horizontal pada setiap *cross section* ditampilkan pada gambar 4.7 dan 4.8.



**Gambar 4.7** Perbandingan profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran tanpa dan dengan *CDB* ( $l/D_h = 0.1$ ) pada bidang *horizontal* dengan variasi  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$ .

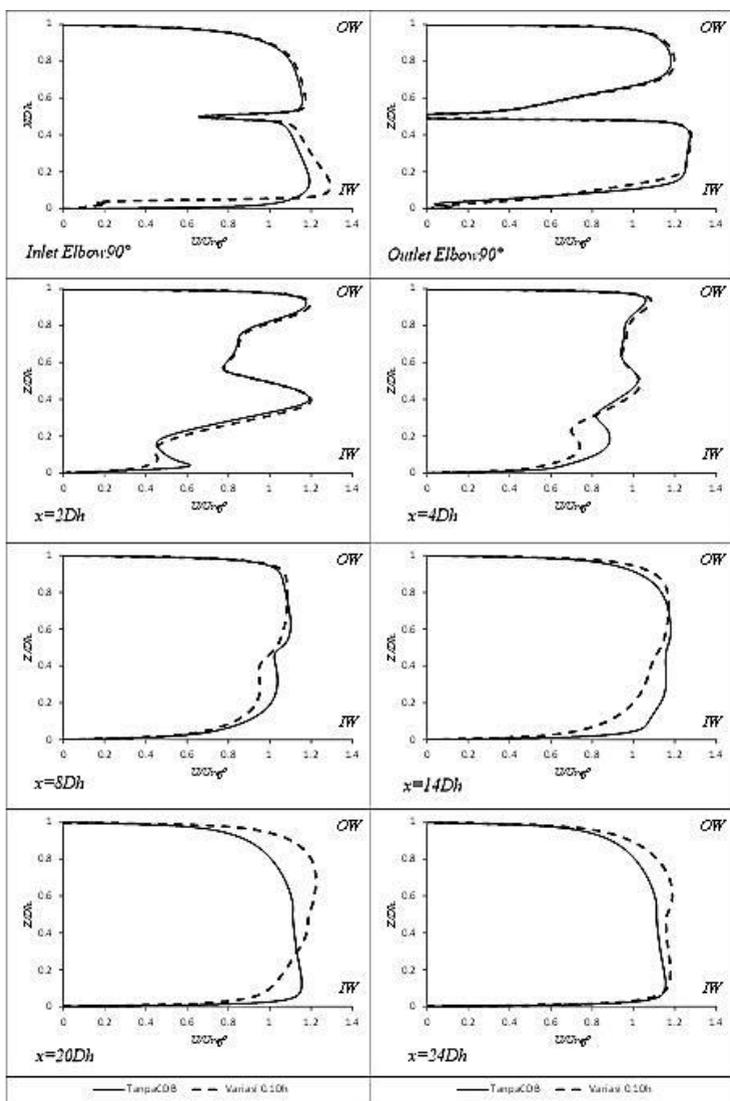
Pada gambar 4.7 terlihat bahwa aliran udara saat memasuki *ducting* mulai berkembang sampai dengan  $1D_h$  pada bagian *upstream duct* tanpa *CDB*, sedangkan *ducting* yang diberikan *CDB* pada bagian *upstream duct* aliran berkembang sampai dengan  $2D_h$ , kemudian profil aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *CDB* dan menabrak *guidevane*. Pada *ducting* tanpa *CDB* aliran udara pada bagian *elbow*  $90^0$  terlihat aliran memiliki kecepatan tertinggi pada bagian *inner wall* sedangkan pada bagian *outer wall* kecepatan mulai menurun hal ini terjadi karena efek dari kelengkungan *elbow*  $90^0$ . Pada bagian *downstream duct* pada posisi  $x/D_h = 1$  terlihat aliran mengalami defisit pada sisi *inner wall* ini terjadi karena adanya *secondary flow* yang terjadi sehingga aliran utama terhambat dengan aliran yang berpusar pada sisi *upper* dan *lower wall*. Pada *ducting* yang ditambahkan *CDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $l/D_h = 0.1$ , terlihat kecepatan tertinggi terdapat antara sisi *inner elbow*  $90^0$  dengan *guidevane* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow*  $90^0$  serta penambahan *CDB* ataupun *guidevane*, selain itu pada  $x/D_h = 1$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *CDB* defisit yang terjadi semakin besar.

Hasil dari profil kecepatan dengan dan tanpa *CDB* terlihat perbedaan yang cukup signifikan yaitu bila dilihat dari profil kecepatan yang disajikan dalam bentuk vektor. Pada *ducting* yang diberikan *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.1$  terlihat bahwa profil kecepatan mulai berbeda dengan tanpa *CDB* dimulai dari sisi *inlet elbow*. Profil kecepatan pada sisi *inner elbow* lebih besar untuk variasi dengan *CDB*, hal ini terjadi karena pemberian pengganggu yang berupa silinder (*CDB*) dapat meningkatkan intensitas turbulensi sehingga menghasilkan momentum aliran pada sisi *inner elbow*. Karena terjadinya momentum aliran pada sisi *inner elbow* maka dapat menunda separasi aliran yang terjadi, hal itu dapat dilihat pada sisi *outlet elbow* dimana pada sisi *inner* terlihat jumlah vektor kecepatan yang melawan aliran utama pada variasi *ducting* dengan *CDB* lebih sedikit dan pendek dibandingkan

dengan variasi *ducting* tanpa *CDB*. Karena aliran yang melawan aliran utama ini merupakan penyebab terjadinya *adverse pressure* ataupun *pressure drop*. Maka dari itu pada tabel 4.3 *pressure drop* pada *elbow* yang diberi *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.1$  lebih kecil dibandingkan dengan tanpa *CDB*.

Untuk memperjelas profil kecepatan pada *ducting* yang diberi penambahan *CDB* maupun tanpa *CDB*, dilakukan pengambilan data dalam bentuk grafik pada gambar 4.8. Pada absis dari grafik diambil pada posisi  $z/D_h = 0$  (posisi *inner wall*) sampai  $z/D_h = 1$  (posisi *outer wall*). Koordinat ditunjukkan dengan nilai  $u/U_{ref}$ , dimana  $u$  adalah kecepatan pada setiap bagian atau titik yang diambil datanya dan  $U_{ref}$  adalah nilai kecepatan pada sisi *inlet duct*. Aliran pada *inlet elbow* tanpa *CDB* mengalami perubahan perubahan distribusi profil kecepatan yaitu kecepatan pada sisi *inner wall elbow* dan sisi *outer guidevane* yang lebih besar bentuk profil ini akan berubah sampai sudut  $90^\circ$  atau *outlet elbow*, seperti yang terlihat pada gambar 4.4 sedangkan pada *ducting* dengan penambahan *CDB* kenaikan distribusi aliran pada sisi *inner elbow* lebih besar dibandingkan dengan tanpa *CDB*. Hal ini terjadi karena penambahan *CDB* dapat meningkatkan intensitas turbulensi dan memberikan momentum aliran pada sisi *inner elbow*. Ketika aliran telah melewati *elbow*  $90^\circ$  atau pada sisi *outlet elbow* dengan dan tanpa *CDB* profil kecepatan yang lebih besar ada pada posisi *outer wall* dan ditengah *ducting* karean pengaruh adanya *guidevane* namun pada sisi *inner wall* terjadi defisit aliran yang mana dengan adanya *CDB* defisit aliran hampir sama dengan tanpa *CDB*.

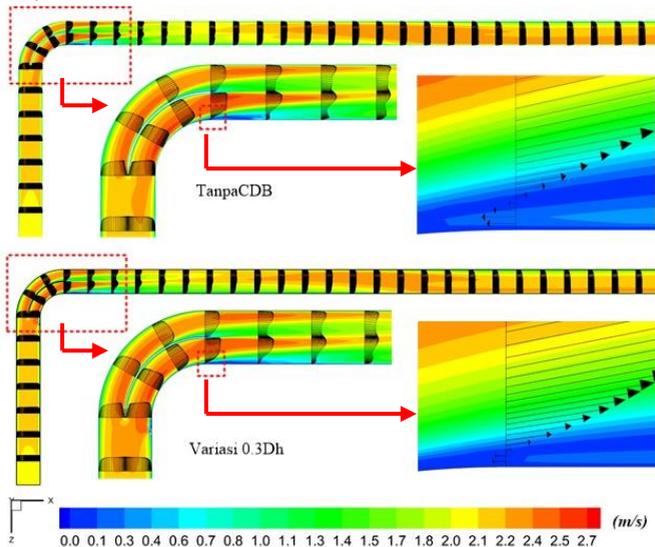
Defisit aliran mulai berpindah dari sisi *inner wall* menuju ke arah tengah seperti pada posisi  $x=14D_h$  dan sampai pada posisi  $x=24D_h$  aliran pada sisi *inner wall* sedikit lebih besar dibandingkan dengan *outer wall*.



**Gambar 4.8** Profil kecepatan tanpa dan dengan CDB ( $l/D_h = 0.1$ ) pada variasi  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

#### 4.2.2 Perbandingan Distribusi Vektor Kecepatan Sepanjang *Ducting* dengan Kontur Kecepatan (tanpa *CDB* dan dengan *CDB* $l/D_h = 0.3$ )

Profil kecepatan fluida pada *ducting* dipengaruhi oleh radius kelengkungan *elbow*  $90^\circ$  serta variasi penempatan posisi *CDB*, ke-dua factor tersebut membuat profil kecepatan pada setiap *cross-section*nya berubah yang kemudian akan diamati bagaimana perkembangan aliran didalam *ducting* tersebut. Distribusi kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ) dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada satu titik dalam suatu *section* dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan udara masuk pada *ducting* yang telah ditentukan sebesar 2m/s. Berikut perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran, pada bidang horizontal pada setiap *cross section* ditampilkan pada gambar 4.9 dan 4.10.



**Gambar 4.9** Perbandingan profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran tanpa dan dengan *CDB* ( $l/D_h = 0.3$ ) pada bidang *horizontal* dengan variasi  $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$ .

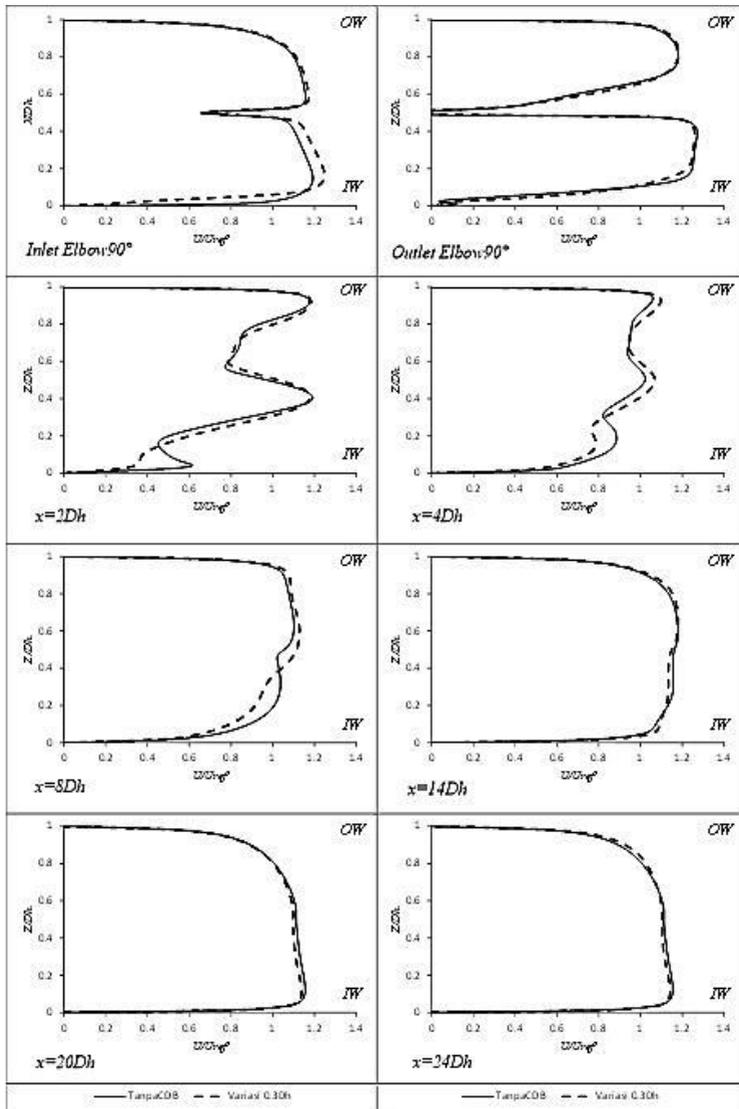
Pada gambar 4.9 terlihat bahwa aliran udara saat memasuki *ducting* mulai berkembang sampai dengan  $1D_h$  pada bagian *upstream duct* tanpa *CDB*, sedangkan *ducting* yang diberikan *CDB* pada bagian *upstream duct* aliran berkembang sampai dengan  $2D_h$ , kemudian profil aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *CDB* dan menabrak *guidevane*. Pada *ducting* tanpa *CDB* aliran udara pada bagian *elbow*  $90^0$  terlihat aliran memiliki kecepatan tertinggi pada bagian *inner wall* sedangkan pada bagian *outer wall* kecepatan mulai menurun hal ini terjadi karena efek dari kelengkungan *elbow*  $90^0$ . Pada bagian *downstream duct* pada posisi  $x/D_h = 1$  terlihat aliran mengalami defisit pada sisi *inner wall* ini terjadi karena adanya *secondary flow* yang terjadi sehingga aliran utama terhambat dengan aliran yang berpusar pada sisi *upper* dan *lower wall*. Pada *ducting* yang ditambahkan *CDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $l/D_h = 0.3$ , terlihat kecepatan tertinggi terdapat antara sisi *inner elbow*  $90^0$  dengan *guidevane* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow*  $90^0$  serta penambahan *CDB* ataupun *guidevane*, selain itu pada  $x/D_h = 1$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *CDB* defisit yang terjadi semakin besar.

Hasil dari profil kecepatan dengan dan tanpa *CDB* terlihat perbedaan yang cukup signifikan yaitu bila dilihat dari profil kecepatan yang disajikan dalam bentuk vektor. Pada *ducting* yang diberikan *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.3$  terlihat bahwa profil kecepatan mulai berbeda dengan tanpa *CDB* dimulai dari sisi *inlet elbow*. Profil kecepatan pada sisi *inner elbow* lebih besar untuk variasi dengan *CDB*, hal ini terjadi karena pemberian pengganggu yang berupa silinder (*CDB*) dapat meningkatkan intensitas turbulensi sehingga menghasilkan momentum aliran pada sisi *inner elbow*. Karena terjadinya momentum aliran pada sisi *inner elbow* maka dapat menunda separasi aliran yang terjadi, hal itu dapat dilihat pada sisi *outlet elbow* dimana pada sisi *inner* terlihat jumlah vektor kecepatan yang melawan aliran utama pada variasi *ducting* dengan *CDB* lebih sedikit dan pendek dibandingkan

dengan variasi *ducting* tanpa *CDB*. Karena aliran yang melawan aliran utama ini merupakan penyebab terjadinya *adverse pressure* ataupun *pressure drop*. Maka dari itu pada tabel 4.3 *pressure drop* pada *elbow* yang diberi *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.3$  lebih kecil dibandingkan dengan tanpa *CDB*.

Untuk memperjelas profil kecepatan pada *ducting* yang diberi penambahan *CDB* maupun tanpa *CDB*, dilakukan pengambilan data dalam bentuk grafik pada gambar 4.10. Pada absis dari grafik diambil pada posisi  $z/D_h = 0$  (posisi *inner wall*) sampai  $z/D_h = 1$  (posisi *outer wall*). Koordinat ditunjukkan dengan nilai  $u/U_{ref}$ , dimana  $u$  adalah kecepatan pada setiap bagian atau titik yang diambil datanya dan  $U_{ref}$  adalah nilai kecepatan pada sisi *inlet duct*. Aliran pada *inlet elbow* tanpa *CDB* mengalami perubahan distribusi profil kecepatan yaitu kecepatan pada sisi *inner wall elbow* dan sisi *outer guidevane* yang lebih besar bentuk profil ini akan berubah sampai sudut  $90^\circ$  atau *outlet elbow*, seperti yang terlihat pada gambar 4.6 sedangkan pada *ducting* dengan penambahan *CDB* kenaikan distribusi aliran pada sisi *inner elbow* lebih besar dibandingkan dengan tanpa *CDB*. Hal ini terjadi karena penambahan *CDB* dapat meningkatkan intensitas turbulensi dan memberikan momentum aliran pada sisi *inner elbow*. Ketika aliran telah melewati *elbow*  $90^\circ$  atau pada sisi *outlet elbow* dengan dan tanpa *CDB* profil kecepatan yang lebih besar ada pada posisi *outer wall* dan ditengah *ducting* karena pengaruh adanya *guidevane* namun pada sisi *inner wall* terjadi defisit aliran yang mana dengan adanya *CDB* defisit aliran hampir sama dengan tanpa *CDB*.

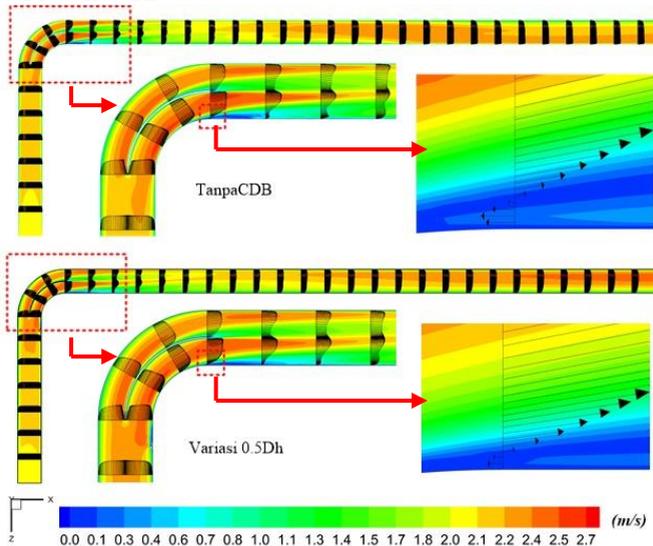
Defisit aliran mulai berpindah dari sisi *inner wall* menuju ke arah tengah seperti pada posisi  $x=14D_h$  dan sampai pada posisi  $x=24D_h$  aliran pada sisi *inner wall* sedikit lebih besar dibandingkan dengan *outer wall*. Profil kecepatan pada posisi  $x=24D_h$  antara *ducting* tanpa *CDB* hampir sama dengan diberikannya *CDB* pada jarak  $l/D_h = 0.3$



**Gambar 4.10** Profil kecepatan tanpa dan dengan CDB ( $l/D_h = 0.3$ ) pada variasi  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

### 4.2.3 Perbandingan Distribusi Vektor Kecepatan Sepanjang *Ducting* dengan Kontur Kecepatan (tanpa *CDB* dan dengan *CDB* $l/D_h = 0.5$ )

Profil kecepatan fluida pada *ducting* dipengaruhi oleh radius kelengkungan *elbow*  $90^\circ$  serta variasi penempatan posisi *CDB*, ke-dua factor tersebut membuat profil kecepatan pada setiap *cross-section*nya berubah yang kemudian akan diamati bagaimana perkembangan aliran didalam *ducting* tersebut. Distribusi kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ) dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada satu titik dalam suatu *section* dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan udara masuk pada *ducting* yang telah ditentukan sebesar 2m/s. Berikut perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran, pada bidang horizontal pada setiap *cross section* ditampilkan pada gambar 4.11 dan 4.12.



**Gambar 4.11** Perbandingan profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran tanpa dan dengan *CDB* ( $l/D_h = 0.5$ ) pada bidang *horizontal* dengan variasi  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$ .

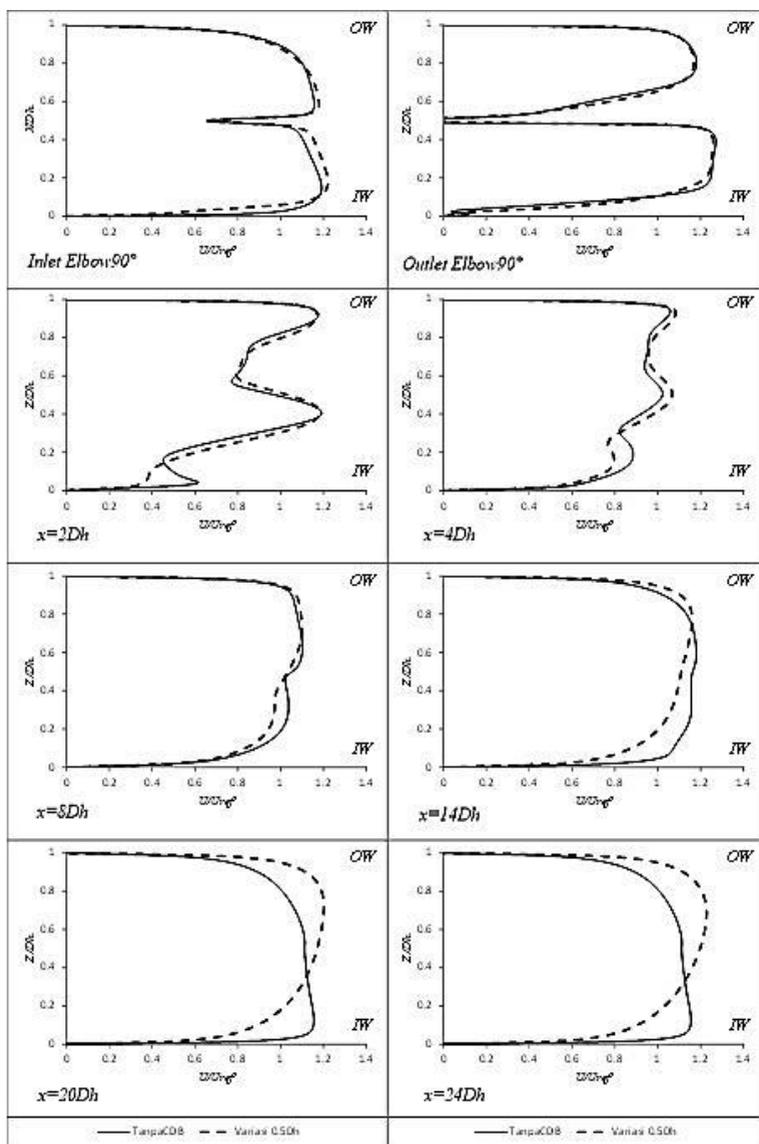
Pada gambar 4.11 terlihat bahwa aliran udara saat memasuki *ducting* mulai berkembang sampai dengan  $1D_h$  pada bagian *upstream duct* tanpa *CDB*, sedangkan *ducting* yang diberikan *CDB* pada bagian *upstream duct* aliran berkembang sampai dengan  $2D_h$ , kemudian profil aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *CDB* dan menabrak *guidevane*. Pada *ducting* tanpa *CDB* aliran udara pada bagian *elbow*  $90^0$  terlihat aliran memiliki kecepatan tertinggi pada bagian *inner wall* sedangkan pada bagian *outer wall* kecepatan mulai menurun hal ini terjadi karena efek dari kelengkungan *elbow*  $90^0$ . Pada bagian *downstream duct* pada posisi  $x/D_h = 1$  terlihat aliran mengalami defisit pada sisi *inner wall* ini terjadi karena adanya *secondary flow* yang terjadi sehingga aliran utama terhambat dengan aliran yang berpusar pada sisi *upper* dan *lower wall*. Pada *ducting* yang ditambahkan *CDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $l/D_h = 0.5$ , terlihat kecepatan tertinggi terdapat antara sisi *inner elbow*  $90^0$  dengan *guidevane* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow*  $90^0$  serta penambahan *CDB* ataupun *guidevane*, selain itu pada  $x/D_h = 1$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *CDB* defisit yang terjadi semakin besar.

Hasil dari profil kecepatan dengan dan tanpa *CDB* terlihat perbedaan yang cukup signifikan yaitu bila dilihat dari profil kecepatan yang disajikan dalam bentuk vektor. Pada *ducting* yang diberikan *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.5$  terlihat bahwa profil kecepatan mulai berbeda dengan tanpa *CDB* dimulai dari sisi *inlet elbow*. Profil kecepatan pada sisi *inner elbow* lebih besar untuk variasi dengan *CDB*, hal ini terjadi karena pemberian pengganggu yang berupa silinder (*CDB*) dapat meningkatkan intensitas turbulensi sehingga menghasilkan momentum aliran pada sisi *inner elbow*. Karena terjadinya momentum aliran pada sisi *inner elbow* maka dapat menunda separasi aliran yang terjadi, hal itu dapat dilihat pada sisi *outlet elbow* dimana pada sisi *inner* terlihat jumlah vektor kecepatan yang melawan aliran utama pada variasi *ducting* dengan *CDB* lebih sedikit dan pendek dibandingkan

dengan variasi *ducting* tanpa *CDB*. Karena aliran yang melawan aliran utama ini merupakan penyebab terjadinya *adverse pressure* ataupun *pressure drop*. Maka dari itu pada tabel 4.3 *pressure drop* pada *elbow* yang diberi *CDB* dengan jarak  $l/D_h = 0.5$  lebih kecil dibandingkan dengan tanpa *CDB*.

Untuk memperjelas profil kecepatan pada *ducting* yang diberi penambahan *CDB* maupun tanpa *CDB*, dilakukan pengambilan data dalam bentuk grafik pada gambar 4.12. Pada absis dari grafik diambil pada posisi  $z/D_h = 0$  (posisi *inner wall*) sampai  $z/D_h = 1$  (posisi *outer wall*). Koordinat ditunjukkan dengan nilai  $u/U_{ref}$ , dimana  $u$  adalah kecepatan pada setiap bagian atau titik yang diambil datanya dan  $U_{ref}$  adalah nilai kecepatan pada sisi *inlet duct*. Aliran pada *inlet elbow* tanpa *CDB* mengalami perubahan distribusi profil kecepatan yaitu kecepatan pada sisi *inner wall elbow* dan sisi *outer guidevane* yang lebih besar bentuk profil ini akan berubah sampai sudut  $90^\circ$  atau *outlet elbow*, seperti yang terlihat pada gambar 4.8 sedangkan pada *ducting* dengan penambahan *CDB* kenaikan distribusi aliran pada sisi *inner elbow* lebih besar dibandingkan dengan tanpa *CDB*. Hal ini terjadi karena penambahan *CDB* dapat meningkatkan intensitas turbulensi dan memberikan momentum aliran pada sisi *inner elbow*. Ketika aliran telah melewati *elbow*  $90^\circ$  atau pada sisi *outlet elbow* dengan dan tanpa *CDB* profil kecepatan yang lebih besar ada pada posisi *outer wall* dan ditengah *ducting* karena pengaruh adanya *guidevane* namun pada sisi *inner wall* terjadi defisit aliran yang mana dengan adanya *CDB* defisit aliran hampir sama dengan tanpa *CDB*.

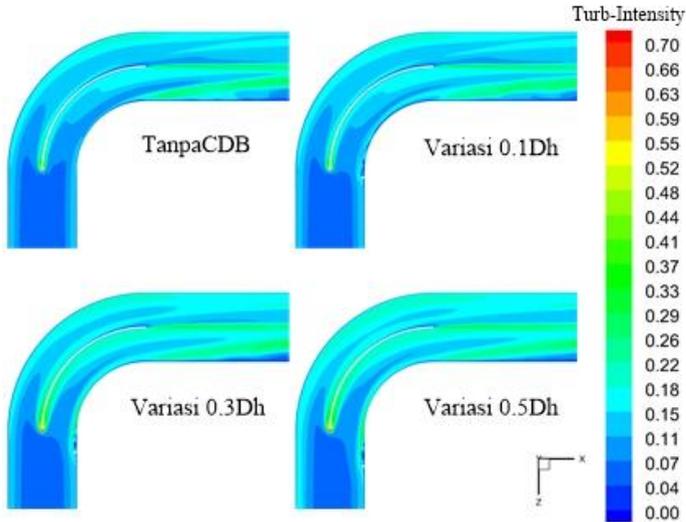
Defisit aliran mulai berpindah dari sisi *inner wall* menuju ke arah tengah seperti pada posisi  $x=14D_h$  dan sampai pada posisi  $x=24D_h$  aliran pada sisi *outer wall* lebih besar dibandingkan dengan *inner wall* berbeda dengan *ducting* tanpa *CDB*.



**Gambar 4.12** Profil kecepatan tanpa dan dengan CDB ( $l/D_h = 0.5$ ) pada variasi  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

#### 4.2.4 Perbandingan Distribusi Intensitas Turbulensi pada daerah $Elbow90^\circ$ (tanpa CDB dan dengan CDB $l/D_h = 0.1; 0.3$ dan $0.5$ )

Pada subbab ini menampilkan data visualisasi berupa pengaruh adanya *guidevane* dan penempatan CDB terhadap distribusi intensitas turbulensi. Data visualisasi ini ditampilkan pada variasi  $Re_{D_h}=1.6 \times 10^4$  dan intensitas turbulensi yang tidak berdimensi. Pada gambar 4.13 terlihat bahwa intensitas turbulensi tertinggi terjadi di sisi depan *guidevane* yang ditandai dengan kontur berwarna merah. Intensitas turbulensi yang tinggi tersebut terjadi karena aliran yang mengalami stagnasi yang kemudian berpengaruh terhadap intensitas pada dinding *guidevane* maupun  $elbow90^\circ$  yang ditandai dengan kontur berwarna biru muda terlihat pada variasi tanpa CDB. Pengaruh penempatan CDB terjadi pada sisi *inner wall elbow90^\circ* maupun pada daerah *downstream duct*. Semakin jauh penempatan CDB dari *inlet elbow90^\circ* maka distribusi intensitas turbulensi didalam  $elbow90^\circ$  semakin besar. Terlihat untuk variasi penempatan CDB  $l/D_h = 0.5$  dengan kontur berwarna biru muda yang lebih banyak dibandingkan dengan variasi yang lain. Penempatan CDB yang terlalu jauh juga berpengaruh pada sisi *outer wall elbow90^\circ* yang ditandai dengan kontur berwarna biru muda pada variasi CDB  $l/D_h = 0.5$  lebih banyak dibandingkan dengan variasi yang lain. Pada sisi *inlet elbow90^\circ* dan sisi *inner wall* pada variasi CDB  $l/D_h = 0.3$  dan  $0.5$  terjadi peningkatan intensitas turbulensi yang lebih besar dibandingkan dengan variasi CDB  $l/D_h = 0.1$  yang ditandai dengan kontur berwarna hijau. Hal ini terjadi karena aliran yang melewati CDB pada variasi  $l/D_h = 0.3$  dan  $0.5$  dengan *inner wall* lurus di *upstream duct*. Pengaruh penempatan CDB pada daerah *downstream duct* yaitu semakin jauh penempatan CDB maka semakin meratanya distribusi intensitas turbulensi yang ditandai dengan kontur berwarna biru muda yang lebih banyak.



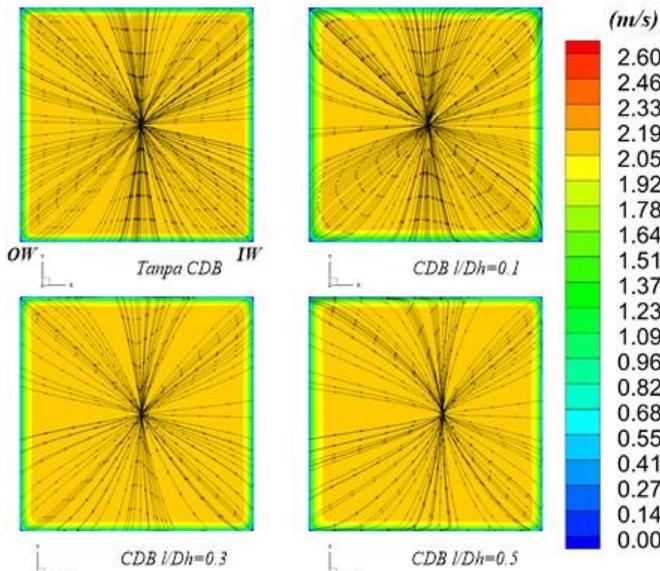
**Gambar 4.13** Intensitas turbulensi tanpa dan dengan CDB ( $l/D_h = 0.1; 0.3$  dan  $0.5$ ) pada variasi  $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$

#### 4.3 Perbandingan Kontur Kecepatan dan *Streamline* setiap *Surface Cross-section* dengan dan Tanpa CDB pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$

Pada bab ini akan ditampilkan data kualitatif berupa tampilan atau visualisasi aliran dengan kontur kecepatan dan *streamline* pada masing-masing *surface* disetiap *cross-section* yang diambil dari perangkat lunak CFD komersial dan *tecplot*. Visualisasi ini akan mempermudah pengamatan perilaku dari aliran yang terjadi pada ducting akibat dari aliran yang melewati *elbow*  $90^\circ$ . Pengambilan *streamline velocity* di tiap *cross section* dilakukan terhadap komponen vektor, dimana komponen vektor ( $x$ ,  $y$  dan  $z$ ) yang tegak lurus terhadap *cross section* di non-aktifkan. Hasil dari masing-masing *surface cross section* akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya.

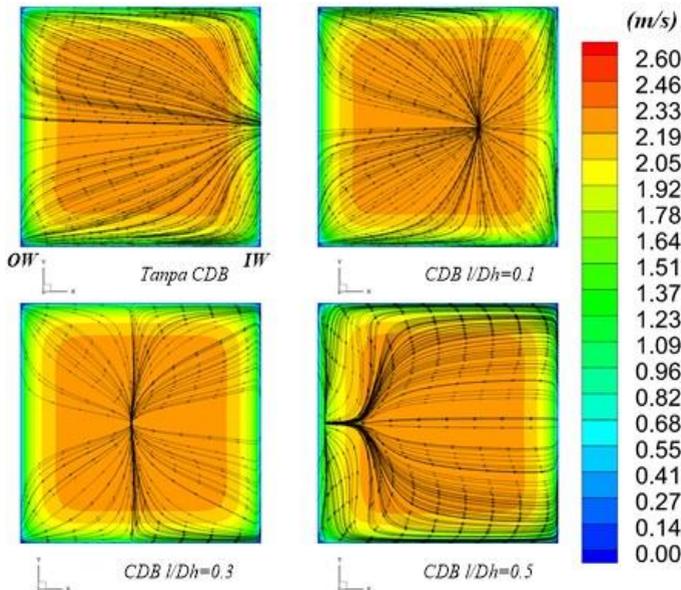
### 4.3.1 Visualisasi Kontur Kecepatan dan *streamline* pada posisi *upstream* dengan dan Tanpa CDB pada $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$

Sebelum membandingkan *streamline* pada setiap *surface cross-section*, akan ditampilkan dahulu *streamline* pada posisi  $z = 6D_h$  di *upstream duct* pada setiap variasi tanpa CDB maupun dengan CDB yang bertujuan untuk melihat pengaruh  $elbow90^\circ$  pada daerah *upstream*. Pada sisi ini komponen vektor yang di non-aktifkan adalah vektor kecepatan dengan arah sumbu  $z$ .



**Gambar 4.14** Kontur *streamline* pada *ducting* tanpa dan dengan CDB pada posisi  $6D_h$  *upstream duct* dengan  $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$

Dari gambar 4.13 dapat dilihat bahwa aliran pada posisi  $1D_h$  setelah *inlet* saluran belum terpengaruh dengan adanya  $elbow90^\circ$  untuk semua variasi *ducting*. Aliran sepenuhnya bergerak menuju sumbu  $Z$ , akan tetapi sedikit perbedaan *streamline* pada *ducting* dengan variasi  $l/D_h = 0.5$  dikarenakan penempatan CDB yang mulai dekat dengan sisi *inlet ducting*.



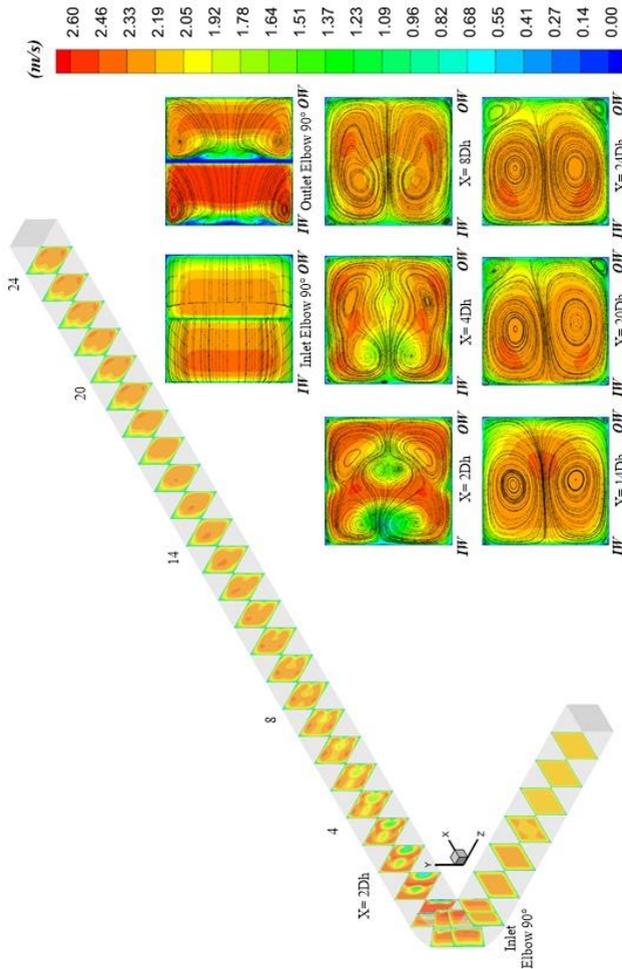
**Gambar 4.15** Kontur *streamline* pada *ducting* tanpa dan dengan CDB pada posisi  $1D_h$  *upstream duct* dengan  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

Dari gambar 4.14 dapat dilihat *streamline* aliran pada posisi  $1D_h$  sebelum *inlet elbow  $90^\circ$  yang merupakan posisi sesaat sebelum aliran melewati bodi pengganggu CDB. Pada *ducting* dengan variasi tanpa CDB dapat dilihat *streamline* aliran cenderung menuju ke sisi *inner wall*, hal ini diakibatkan karena pengaruh dari *elbow  $90^\circ$ . Sedangkan untuk *ducting* yang diberi CDB terjadi *streamline* aliran yang menuju ke sisi *outer wall* dan cenderung bertambah besar sampai *ducting* dengan CDB variasi  $l/D_h = 0.5$ .**

#### 4.3.2 Visualisasi Kontur Kecepatan dan *streamline* setiap *cross-section* Tanpa CDB pada $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

Visualisasi kontur kecepatan dan *streamline* akan ditampilkan pada setiap *surface-cross section* tanpa CDB. *Secondary flow* akan terlihat pada masing-masing *surface cross-section*, *surface* yang diambil untuk menampilkan kontur dan *streamline* yaitu

pada *section* dari *inlet elbow*, *outlet elbow*,  $x/Dh = 2$ ,  $x/Dh = 4$ ,  $x/Dh = 8$ ,  $x/Dh = 14$ ,  $x/Dh = 20$  dan  $x/Dh = 24$  untuk dan keseluruhan *surface cross-section* untuk kontur kecepatan.



**Gambar 4.16** Kontur kecepatan dan *streamline* pada *ducting* tanpa *CDB* setiap *cross-section* dengan  $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$   
 Gambar 4.15 menjelaskan tentang aliran udara yang melewati *ducting system* yang diberi *elbow* 90°. Aliran udara masuk pada

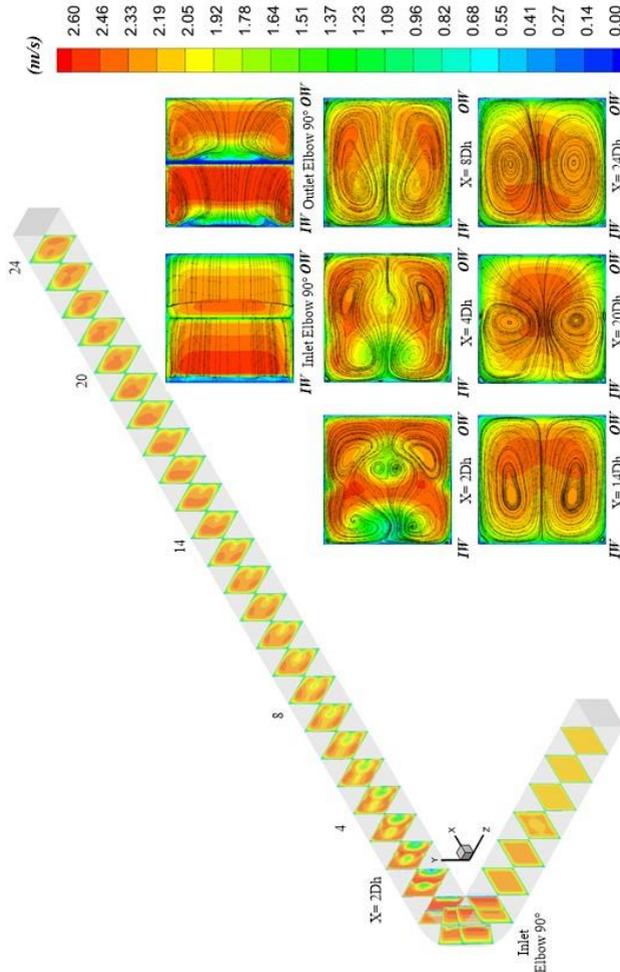
*inlet upstream duct*, dimana sepanjang bagian ini aliran tidak mengalami *secondary flow* dikarenakan masih melalui saluran lurus. Kemudian sesaat sebelum memasuki *inlet elbow* aliran cenderung mengalir dari sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* dan ketika aliran mulai memasuki *elbow* dan mengenai *guidevane* ada sebagian aliran yang menuju ke sisi *outer wall* yang kemudian aliran mulai terbentuk *secondary flow* didalam *elbow*, hal ini terjadi karena pengaruh dari kelengkungan *elbow*  $90^\circ$ . Aliran kemudian melalui bagian *downstream duct*, pada bagian *outlet elbow* aliran mengalami *secondary flow* yaitu pusaran yang terbentuk akibat aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* secara berulang-ulang. Terbentuk 4 *base vortex* pada saluran karena penambahan *guidevane* didalam *elbow* dan cenderung berada pada sisi *inner wall*. Pada *section*  $x/D_h=2$  di sisi sudut-sudut dari *ducting* juga terdapat *corner vortex*, dan bertambahnya *base vortex* di tengah *ducting* akibat penambahan *guidevane*. *Secondary flow*, *base vortex* dan *corner vortex* mulai berkurang sampai pada *section*  $x/D_h=14$  dan mulai terbentuk kembali *corner vortex* pada sisi *outer wall* sampai *section*  $x/D_h=24$ .

Selain *streamline* aliran juga ditampilkan kontur kecepatan tiap *surface cross-section* dimana pada *inlet elbow* kontur kecepatan tertinggi pada sisi *inner wall elbow* dan sisi *outer guidevane* yang ditandai dengan kontur berwarna *orange*. Sedangkan pada *outlet elbow* sisi *inner wall* terjadi kecepatan rendah karena akibat adanya aliran yang terseparasi saat melewati *elbow* serta munculnya *energy kinetic losses* dimana aliran tidak mampu melawan *adverse gradient* sehingga pada bagian tertentu ada aliran yang mengalami *backflow*. Selain itu pada *section*  $x/D_h=2$  sampai dengan *section*  $x/D_h=14$  kontur kecepatan tertinggi masih acak yang kemudian mulai berpindah menuju sisi *inner wall* pada *section*  $x/D_h=24$ .

#### **4.3.3 Visualisasi Kontur Kecepatan dan *streamline* setiap *cross-section* dengan *CDB* $l/D_h=0.1$ pada $Re_{D_h}=1.6 \times 10^4$**

Visualisasi kontur kecepatan dan *streamline* akan ditampilkan pada setiap *surface-cross section* dari *ducting* dengan  $CDB l/D_h = 0.1$ . *Secondary flow* akan terlihat pada masing-masing *surface cross-section*, *surface* yang diambil untuk menampilkan kontur dan *streamine* yaitu pada *section* dari *inlet elbow*, *outlet elbow*,  $x/D_h = 2$ ,  $x/D_h = 4$ ,  $x/D_h = 8$ ,  $x/D_h = 14$ ,  $x/D_h = 20$  dan  $x/D_h = 24$  untuk dan keseluruhan *surface cross-section* untuk kontur kecepatan.

Pada Gambar 4.16 menjelaskan tentang aliran udara yang melewati *ducting system* yang diberi *elbow*  $90^\circ$ . Aliran udara masuk pada *inlet upstream duct*, dimana sepanjang bagian ini aliran tidak mengalami *secondary flow* dikarenakan masih melalui saluran lurus. Kemudian sesaat sebelum memasuki *inlet elbow* aliran cenderung mengalir dari sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* dan ketika aliran mulai memasuki *elbow* dan mengenai *guidevane* ada sebagian aliran yang menuju ke sisi *outer wall* yang kemudian aliran mulai terbentuk *secondary flow* didalam *elbow*, hal ini terjadi karena pengaruh dari kelengkungan *elbow*  $90^\circ$ . Aliran kemudian melalui bagian *downstream duct*, pada bagian *outlet elbow* aliran mengalami *secondary flow* yaitu pusaran yang terbentuk akibat aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* secara berulang-ulang. Terbentuk 4 *base vortex* pada saluran karena penambahan *guidevane* didalam *elbow* dan cenderung berada pada sisi *inner wall*. Pada *section*  $x/D_h=2$  di sisi sudut-sudut dari *ducting* juga terdapat *corner vortex*, dan bertambahnya *base vortex* di tengah *ducting* akibat penambahan *guidevane*. *Secondary flow*, *base vortex* dan *corner vortex* mulai berkurang sampai pada *section*  $x/D_h=8$  dan mulai terbentuk kembali *corner vortex* pada *section*  $x/D_h=24$  tetapi lebih kecil dibandingkan dengan *ducting* tanpa *CDB*.



**Gambar 4.17** Kontur kecepatan dan *streamline* pada *ducting* dengan  $CDB/D_h = 0.1$  setiap *cross-section* dengan  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

Selain *streamline* aliran juga ditampilkan kontur kecepatan tiap *surface cross-section* dimana pada *inlet elbow* kontur kecepatan tertinggi pada sisi *outer guidevane* dan mendekati sisi *inner elbow* yang ditandai dengan kontur berwarna merah. Pada sisi *inner*

*elbow* terjadi kecepatan yang rendah akibat dari penempatan *CDB* dan kecepatan tinggi yang menuju *inner elbow* lebih besar daripada yang tanpa *CDB*, hal ini disebabkan karena adanya momentum aliran. Sedangkan pada *outlet elbow* sisi *inner wall* terjadi kecepatan rendah karena akibat adanya aliran yang terseparasi saat melewati *elbow* karena munculnya *energy kinetic losses*, dimana aliran sedikit mampu melawan *adverse gradient* sehingga pada bagian tertentu aliran yang mengalami *backflow* dapat ditunda. Selain itu pada *section*  $x/D_h=2$  sampai dengan *section*  $x/D_h=20$  kontur kecepatan tertinggi masih acak yang kemudian mulai berpindah menuju sisi *inner wall* pada *section*  $x/D_h=24$ .

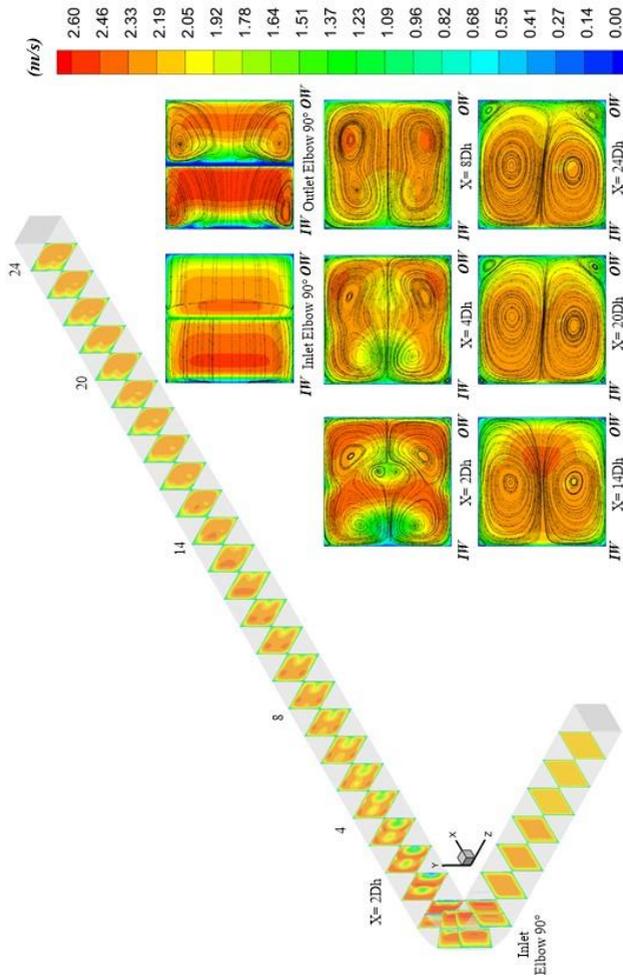
#### 4.3.4 Visualisasi Kontur Kecepatan dan *streamline* setiap *cross-section* dengan *CDB* $l/D_h=0.3$ pada $Re_{Dh}=1.6 \times 10^4$

Visualisasi kontur kecepatan dan *streamline* akan ditampilkan pada setiap *surface-cross section* dari *ducting* dengan *CDB*  $l/D_h=0.3$ . *Secondary flow* akan terlihat pada masing-masing *surface cross-section*, *surface* yang diambil untuk menampilkan kontur dan *streamline* yaitu pada *section* dari *inlet elbow*, *outlet elbow*,  $x/D_h=2$ ,  $x/D_h=4$ ,  $x/D_h=8$ ,  $x/D_h=14$ ,  $x/D_h=20$  dan  $x/D_h=24$  untuk dan keseluruhan *surface cross-section* untuk kontur kecepatan.

Pada Gambar 4.17 menjelaskan tentang aliran udara yang melewati *ducting system* yang diberi *elbow*  $90^\circ$ . Aliran udara masuk pada *inlet upstream duct*, dimana sepanjang bagian ini aliran tidak mengalami *secondary flow* dikarenakan masih melalui saluran lurus. Kemudian sesaat sebelum memasuki *inlet elbow* aliran cenderung mengalir dari sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* dan ketika aliran mulai memasuki *elbow* dan mengenai *guidevane* ada sebagian aliran yang menuju ke sisi *outer wall* yang kemudian aliran mulai terbentuk *secondary flow* didalam *elbow*, hal ini terjadi karena pengaruh dari kelengkungan *elbow*  $90^\circ$ . Aliran kemudian melalui bagian *downstream duct*, pada bagian *outlet elbow* aliran mengalami *secondary flow* yaitu

pusaran yang terbentuk akibat aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* secara berulang-ulang. Terbentuk 4 *base vortex* pada saluran karena penambahan *guidevane* didalam *elbow* dan cenderung berada pada sisi *inner wall*. Pada *section*  $x/D_h=2$  di sisi sudut-sudut dari *ducting* juga terdapat *corner vortex*, dan bertambahnya *base vortex* di tengah *ducting* akibat penambahan *guidevane*. *Secondary flow*, *base vortex* dan *corner vortex* mulai berkurang sampai pada *section*  $x/D_h=14$  dan mulai terbentuk kembali *corner vortex* pada sisi *outer wall* sampai *section*  $x/D_h=24$  sama seperti variasi tanpa *CDB*.

Selain *streamline* aliran juga ditampilkan kontur kecepatan tiap *surface cross-section* dimana pada *inlet elbow* kontur kecepatan tertinggi pada sisi *outer guidevane* dan mendekati sisi *inner elbow* yang ditandai dengan kontur berwarna merah. Pada sisi *inner elbow* terjadi kecepatan yang rendah akibat dari penempatan *CDB* dan kecepatan tinggi yang menuju *inner elbow* lebih besar daripada yang tanpa *CDB* tetapi lebih rendah daripada variasi *CDB*  $l/D_h = 0.1$ , hal ini disebabkan karena berkurangnya momentum aliran. Sedangkan pada *outlet elbow* sisi *inner wall* terjadi kecepatan rendah karena akibat adanya aliran yang terseparasi saat melewati *elbow* karena munculnya *energy kinetic losses*, dimana aliran sedikit mampu melawan *adverse gradient* sehingga pada bagian tertentu aliran yang mengalami *backflow* dapat ditunda. Selain itu pada *section*  $x/D_h=2$  sampai dengan *section*  $x/D_h=8$  kontur kecepatan tertinggi masih acak yang kemudian mulai berpindah menuju sisi *inner wall* pada *section*  $x/D_h=24$ .

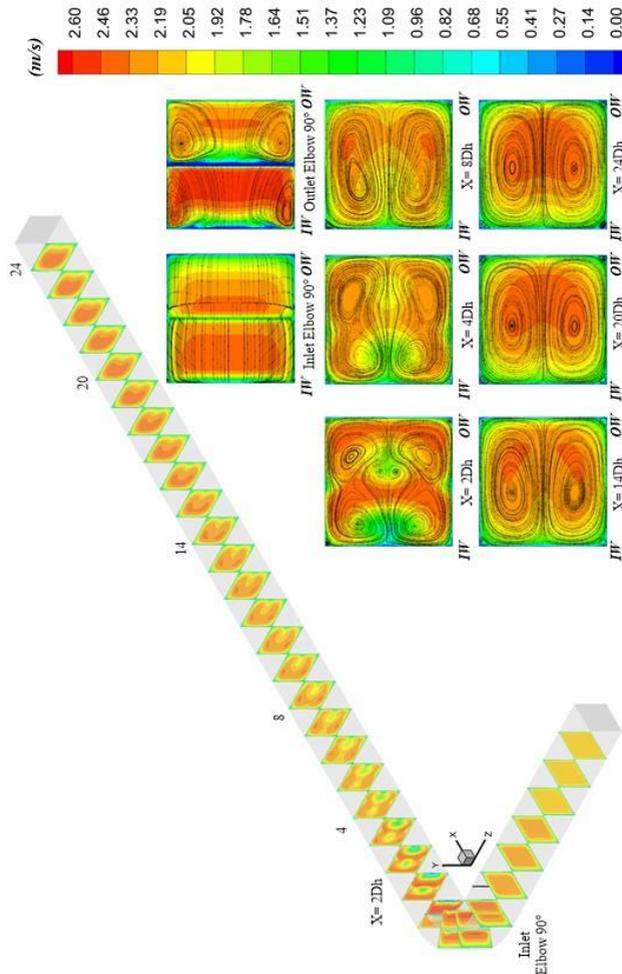


**Gambar 4.18** Kontur kecepatan dan *streamline* pada *ducting* dengan  $CDB \ l/D_h = 0.3$  setiap *cross-section* dengan  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

#### 4.3.5 Visualisasi Kontur Kecepatan dan *streamline* setiap *cross-section* dengan $CDB \ l/D_h = 0.5$ pada $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

Visualisasi kontur kecepatan dan *streamline* akan ditampilkan pada setiap *surface-cross section* dari *ducting* dengan  $CDB \ l/D_h = 0.5$ . *Secondary flow* akan terlihat pada masing-masing *surface cross-section*, *surface* yang diambil untuk menampilkan kontur dan *streamline* yaitu pada *section* dari *inlet elbow*, *outlet elbow*,  $x/D_h = 2$ ,  $x/D_h = 4$ ,  $x/D_h = 8$ ,  $x/D_h = 14$ ,  $x/D_h = 20$  dan  $x/D_h = 24$  untuk dan keseluruhan *surface cross-section* untuk kontur kecepatan.

Pada Gambar 4.18 menjelaskan tentang aliran udara yang melewati *ducting system* yang diberi *elbow*  $90^\circ$ . Aliran udara masuk pada *inlet upstream duct*, dimana sepanjang bagian ini aliran tidak mengalami *secondary flow* dikarenakan masih melalui saluran lurus. Kemudian sesaat sebelum memasuki *inlet elbow* aliran cenderung mengalir dari sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* dan ketika aliran mulai memasuki *elbow* dan mengenai *guidevane* ada sebagian aliran yang menuju ke sisi *outer wall* yang kemudian aliran mulai terbentuk *secondary flow* didalam *elbow*, hal ini terjadi karena pengaruh dari kelengkungan *elbow*  $90^\circ$ . Aliran kemudian melalui bagian *downstream duct*, pada bagian *outlet elbow* aliran mengalami *secondary flow* yaitu pusaran yang terbentuk akibat aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall* secara berulang-ulang. Terbentuk 4 *base vortex* pada saluran karena penambahan *guidevane* didalam *elbow* dan cenderung berada pada sisi *inner wall*. Pada *section*  $x/D_h=2$  di sisi sudut-sudut dari *ducting* juga terdapat *corner vortex*, dan bertambahnya *base vortex* di tengah *ducting* akibat penambahan *guidevane*. *Secondary flow*, *base vortex* dan *corner vortex* mulai berkurang sampai pada *section*  $x/D_h=14$  dan mulai terbentuk kembali *corner vortex* pada *section*  $x/D_h=24$  tetapi lebih kecil dibandingkan dengan *ducting* tanpa *CDB*.



**Gambar 4.19** Kontur kecepatan dan *streamline* pada *ducting* dengan  $CDB l/D_h = 0.5$  setiap *cross-section* dengan  $Re_{D_h} = 1.6 \times 10^4$

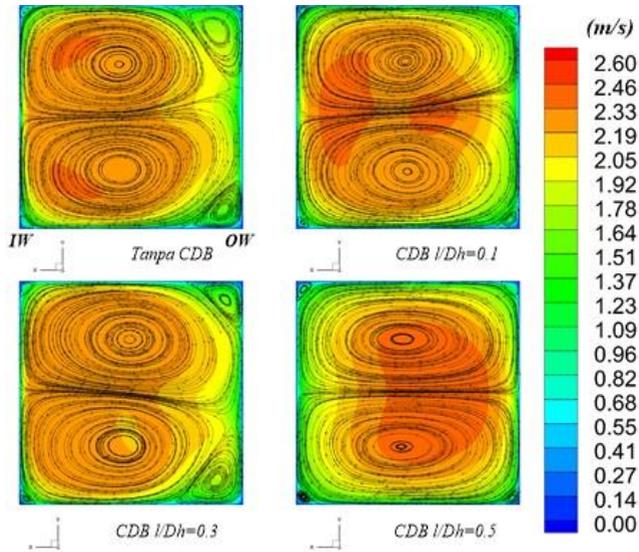
Selain *streamline* aliran juga ditampilkan kontur kecepatan tiap *surface cross-section* dimana pada *inlet elbow* kontur kecepatan

tertinggi pada sisi *outer guidevane* dan mendekati sisi *inner elbow* yang ditandai dengan kontur berwarna merah. Pada sisi *inner elbow* sedikit terjadi kecepatan yang rendah akibat dari penempatan *CDB* dan kecepatan tinggi yang menuju *inner elbow* lebih besar daripada yang tanpa *CDB* tetapi lebih rendah daripada variasi *CDB*  $l/D_h = 0.1$ , hal ini disebabkan karena berkurangnya momentum aliran. Sedangkan pada *outlet elbow* sisi *inner wall* terjadi kecepatan rendah karena akibat adanya aliran yang terseparasi saat melewati *elbow* karena munculnya *energy kinetic losses*, dimana aliran sedikit mampu melawan *adverse gradient* sehingga pada bagian tertentu aliran yang mengalami *backflow* dapat ditunda. Selain itu pada *section*  $x/D_h=2$  sampai dengan *section*  $x/D_h=8$  kontur kecepatan tertinggi masih acak yang kemudian mulai berpindah menuju sisi sisi tengah *ducting* pada *section*  $x/D_h=24$ .

#### **4.3.6 Visualisasi Kontur Kecepatan dan *streamline* pada posisi $x/D_h=24$ dengan dan Tanpa *CDB* pada $Re_{Dh}= 1.6 \times 10^4$**

Setelah membandingkan *streamline* dan kontur kecepatan pada setiap *surface cross-section*, maka akan ditampilkan kontur dan *streamline* pada posisi  $x/D_h=24$  posisi  $1D_h$  sebelum *outlet ducting*. Analisa dilakukan pada variasi tanpa *CDB* maupun dengan *CDB* yang bertujuan untuk melihat *secondary flow* yang terjadi.

Dari gambar 4.19 dapat ditunjukkan bahwa fenomena aliran pada posisi  $x/D_h=24$  masih menunjukkan adanya *secondary flow*, hal ini terjadi karena pengaruh dari kelengkungan *elbow*  $90^\circ$  itu sendiri. Oleh karena itu, meskipun panjang *downstream* sudah ditambah menjadi  $24D_h$  *secondary flow* yang terjadi masih ada, tetapi tidak menutup kemungkinan jika panjang *downstream* yang terlalu pendek akan mempengaruhi aliran yang melewati *elbow*  $90^\circ$  dan setelahnya.



**Gambar 4.20** Kontur *streamline* pada *ducting* tanpa dan dengan *CDB* pada posisi  $24D_h$  *downstream duct* dengan  $Re_{D_h}=1.6 \times 10^4$

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan numerik sehingga didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Nilai *pressure drop overall* yang terjadi sepanjang aliran yang melewati *ducting* dengan variasi penempatan *CDB*  $l/D_h=0.1$  mengalami reduksi daripada *ducting* tanpa *CDB* pada bilangan *Reynolds*  $Re_{D_h}=1.4 \times 10^4$ . Nilai *pressure drop* pada daerah *elbow90°* untuk semua variasi penempatan *CDB* sudah mengalami reduksi dibandingkan dengan tanpa *CDB*, hal ini dikarenakan pemberian *CDB* dapat meningkatkan intensitas turbulensi dan menghasilkan momentum aliran didalam *elbow90°* sehingga dapat menunda terjadinya separasi aliran dan mampu melawan terjadinya *adverse pressure*. Nilai *coefficient of pressure* didapat karena adanya distribusi tekanan akibat kelengkungan *elbow90°*, terlihat jelas bahwa dengan variasi *CDB*  $l/D_h=0.1$  *treadline* grafik pada sisi *inner wall* lebih konstan daripada tanpa *CDB*, hal ini disebabkan karena adanya momentum aliran kearah *inner wall*.
- 2) Profil kecepatan yang terjadi pada daerah *elbow90°* dan *downstream duct* sudah dapat menggambarkan bahwa saluran dengan variasi pemberian *CDB* mampu memberikan momentum aliran dan mampu menunda separasi aliran yang terjadi dibandingkan dengan variasi tanpa *CDB*. Profil kecepatan yang terjadi akibat penambahan *guidevane* tunggal didalam *elbow90°* terlihat berpengaruh terhadap sisi *outer elbow90°*.
- 3) Kontur kecepatan dan *streamline* sepanjang saluran yang sudah ditampilkan pada setiap *cross-section* sudah dapat menggambarkan terjadinya *secondary flow* didalam *elbow90°* dan *downstream duct* akibat dari pengaruh

kelengkungan *elbow90°* tersebut. Penambahan *guidevane* tunggal dapat memperkecil *secondary flow* seperti yang terlihat pada *section outlet elbow90°*. Sedangkan pada posisi  $x/Dh=24$  yaitu  $1Dh$  sebelum aliran mencapai sisi *outlet* saluran terlihat bahwa masih adanya *secondary flow* yang terbentuk, hal ini dapat diketahui bahwa pengaruh dari kelengkungan *elbow90°* tidak dapat dihilangkan meskipun dengan memperpanjang daerah *downstream*.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil dari pemodelan numerik yang dilakukan, terdapat beberapa hal yang perlu diperbaiki sehingga diperoleh hasil yang lebih baik untuk penelitian selanjutnya. Beberapa saran yang diajukan penulis diantaranya:

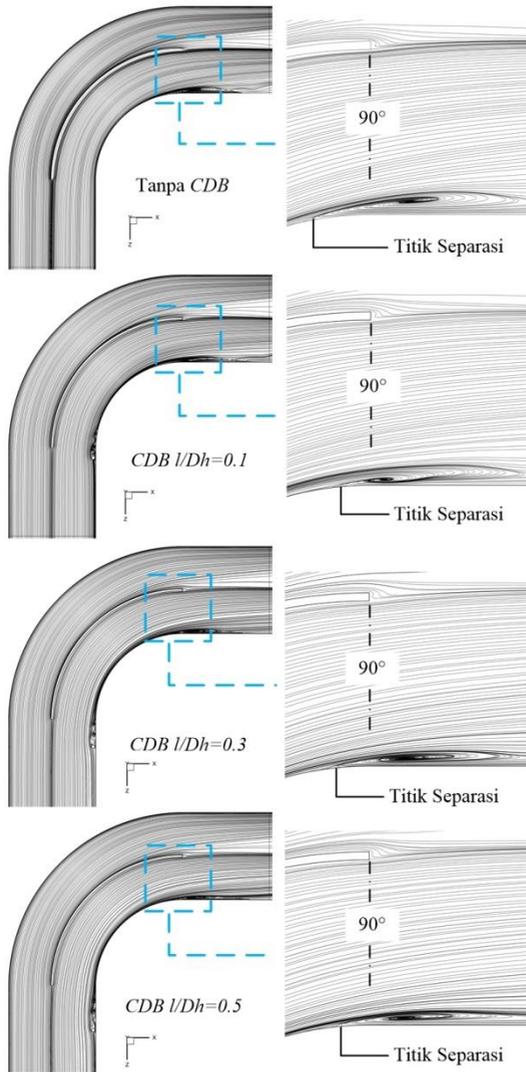
- 1) Perlu adanya sebuah data validasi yang didapat dari penelitian eksperimen, agar hasil yang didapat tidak terlalu jauh dengan yang diharapkan.
- 2) Penempatan *CDB* didalam sisi *inner elbow90°* , diharapkan dengan adanya *CDB* dapat menunda terjadinya separasi aliran yang lebih baik.
- 3) Dilakukannya pemodelan numerik secara *unsteady* agar didapat fenomena aliran yang lebih baik akibat pengaruh dari *elbow90°*.

## DAFTAR PUSTAKA

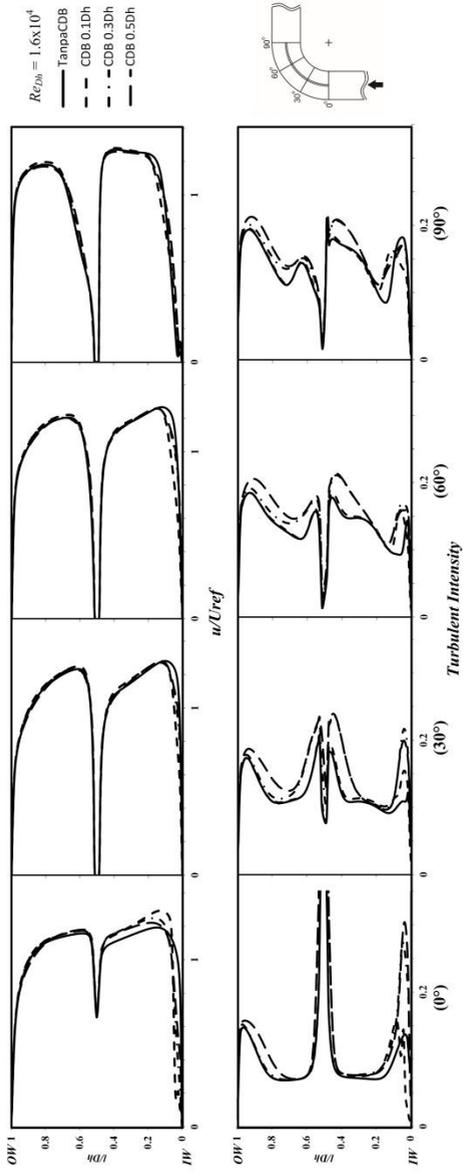
- Choi, J. H & Lee, S. J., 2000 “**Flow Characteristic Around an Inclined Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer**”, *Journal of Fluids and Structures* (2001) 15, 1123-1135
- Dutta, Prasun & Nandi, Nityananda. 2015. **Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends.** *Mechanics and Mechanical Engineering Vol. 19, No. 1 (2015) 5–16 Lodz University of Technology.*
- F. Danbon & C. Sollic. 2000. **Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque.** France: *Journal of Fluids Engineering*
- Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition.** New York : John Wiley & Sons Inc.
- Frank P. Incopera, David P Dewitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine. 2006. **Fundamental of Heat and Mass Transfer, 6<sup>th</sup> edition.** United States : John Wiley & Sons Inc.
- Hardian, Aqfha. 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Jarak Inlet Disturbance Body terhadap Aliran melalui Square Duct dengan Elbow 90°.** *JURNAL TEKNIK ITS Vol. 6 No. 1 (2017).* Tugas Akhir : Teknik Mesin ITS-Surabaya
- Miller, Donald S..1990. **Internal Flows System, 2<sup>nd</sup> edition.** BHRA (Information Services)
- Ran Gao, Zhiyu Fang. 2017. **Numerical Simulation and Experimental Study of the Drag Reduction of 90° Elbows for Ventilation and Air Conditioning Tubes in An Arc Form.** China: Elsevier Ltd.
- Rup, K., & Sarna, P. 2011. **Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-**

- degree Elbow.** *Flow Measurement and Instrumentation* 22 (2011) 383–391.
- Sutardi, Wawan A. W., Ibnu Affan, Iswati M. D. Sutrisno. 2010. **Experimental Study on the Effect of Guide Vane Insertion and Reynolds Numbers on the Flow Pressure Drop in a 90° Rectangular Elbow.** Indonesia : Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology
- Widodo, Wawan Aries & Bimantoro, Abdilah Gigih. 2017. **Studi Numerik Aliran Melalui Square Duct dan Square Elbow 90° dengan Square Disturbance Body pada Inner Upstream Duct.** *JURNAL TEKNIK ITS* Vol. 6 No. 1 (2017).  
Tugas Akhir : Teknik Mesin ITS-Surabaya
- Widodo, Wawan Aries & Hidayat, Nuzul. 2004. **Experimental Study of Drag Reduction on Circular Cylinder and Reduction of Pressure Drop in Narrow Channels by Using a Cylinder Disturbance Body** *Applied Mechanics and Materials* ISSN: 1662-7482, Vol. 493, pp 198-203

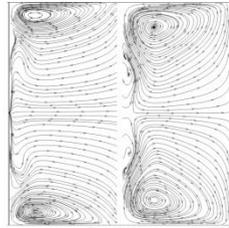
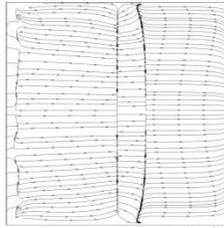
## LAMPIRAN



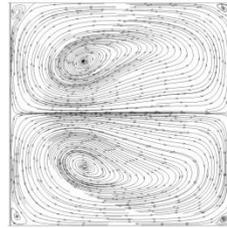
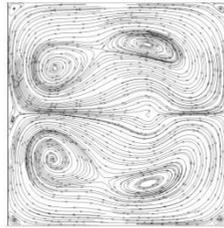
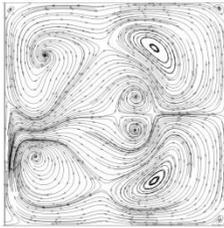
**Lampiran 1** STREAMLINE KECEPATAN DI ELBOW 90°  
PADA  $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$



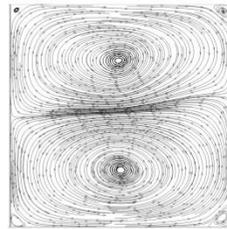
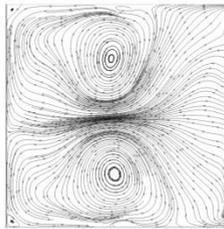
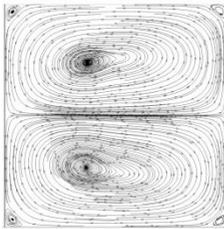
**Lampiran 2** PROFIL KECEPATAN DAN INTENSITAS TURBULENSI DI ELBOW 90°  
 PADA  $Re_{Dh} = 1.6 \times 10^4$



*IW* Inlet Elbow 90° *OW* *IW* Outlet Elbow 90° *OW*



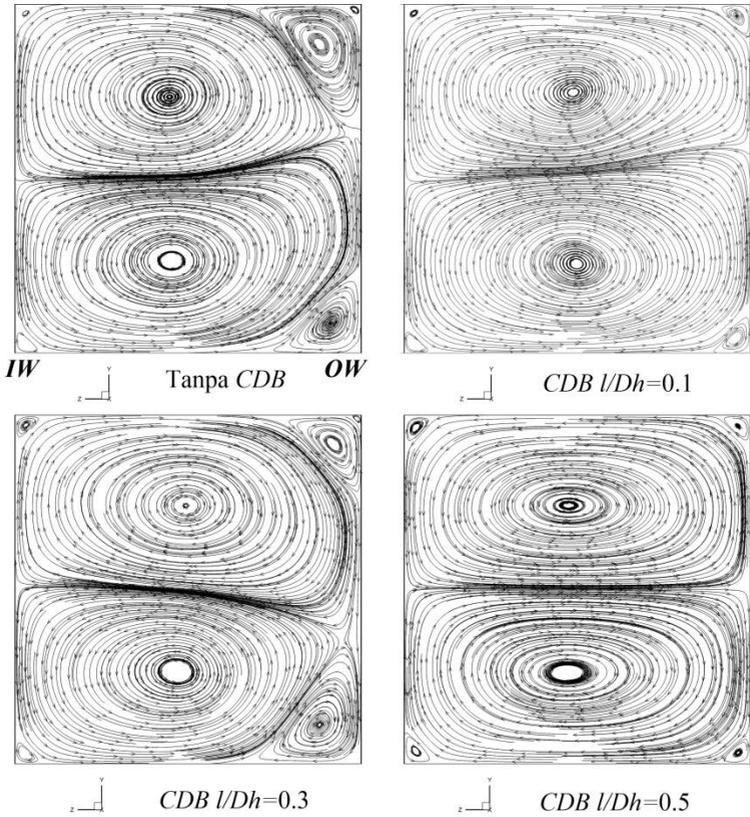
*IW* X= 2Dh *OW* *IW* X= 4Dh *OW* *IW* X= 8Dh *OW*



*IW* X= 14Dh *OW* *IW* X= 20Dh *OW* *IW* X= 24Dh *OW*

**Lampiran 3** STREAMLINE PADA DUCTING DENGAN

CDB  $L/D_d=0.1$  DENGAN  $Re_{D_h}=1.6 \times 10^4$



**Lampiran 4** STREAMLINE PADA DUCTING DENGAN  
 DAN TANPA CDB POSISI  $X/Dh=24$  DENGAN  
 $Re_{Dh}=1.6 \times 10^4$

## BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara yang dilahirkan pada tanggal 2 Juli 1995 di Banyuwangi, Provinsi Jawa Timur. Pendidikan formal yang pernah ditempuh meliputi SD Muhammadiyah 6 Genteng, SMPN 1 Genteng, SMAN 1 Genteng. Setelah itu penulis meneruskan pendidikan tingkat perguruan tinggi di Program Studi D3 Teknik Mesin dan mengambil bidang studi -

Manufaktur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013. Untuk mengasah pengetahuan tentang ilmu *mechanical* penulis melanjutkan ke jenjang Lintas Jalur S-1 Teknik Mesin ITS pada tahun 2016. Selain itu, ketertarikan penulis dalam bidang keorganisasian membuat penulis aktif dalam kegiatan-kegiatan organisasi di lingkungan kampus diantaranya di NOGOGENI ITS yang merupakan sebuah riset di bidang mobil listrik. Pada masa berorganisasi itu, penulis menjadi bagian di bidang *Design and Body Manufacturing*. Selain itu penulis juga pernah mengikuti perlombaan mobil listrik di skala nasional maupun internasional. Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. Dirgantara Indonesia dan PT. Ometrac Arya Samanta. Bagi pembaca yang ingin lebih mengenal penulis dan ingin berdiskusi lebih luas lagi dapat menghubungi email : [rahmanarif874@gmail.com](mailto:rahmanarif874@gmail.com) atau no. telp : 082333792332.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***