



**TESIS - TM142501**

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA MELALUI  
*RECTANGULAR ELBOW 90° DENGAN DIAMOND INLET  
DISTURBANCE BODY* ( $d/D_h = 0.064, 0.080, \text{ DAN } 0.100$ )**

**RIZKA NUR FAILA**

**NRP 02111550020201**

**DOSEN PEMBIMBING :**

**Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER**

**BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2018**



**TESIS - TM142501**

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA MELALUI  
*RECTANGULAR ELBOW 90° DENGAN DIAMOND INLET  
DISTURBANCE BODY* ( $d/D_h = 0.064, 0.080, \text{ DAN } 0.100$ )**

**RIZKA NUR FAILA**

**NRP 02111550020201**

**DOSEN PEMBIMBING :**

**Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER**

**BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2018**



**THESIS - TM142501**

**NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND  
ELBOW 90° WITH DIAMOND INLET DISTURBANCE BODY ( $d/D_h$   
= 0.064, 0.080, AND 0.100)**

**RIZKA NUR FAILA**

**NRP 02111550020201**

**ADVISOR**

**Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.**

**MAGISTER PROGRAM**

**ENERGY CONVERSION ENGINEERING**

**DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING**

**FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY**

**SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

**SURABAYA**

**2018**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:  
**Rizka Nur Faila**  
NRP. 02111550020201

Tanggal Ujian : 09 April 2018  
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:

  
1. **Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D**  
NIP. 196412281990031002

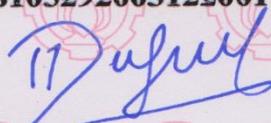
(Pembimbing)

  
2. **Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT**  
NIP. 197104051997021001

(Penguji)

  
3. **Vivien Suphandani, ST, M.Eng.Sc, Ph.D**  
NIP. 198105292003122001

(Penguji)

  
4. **Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, Ph.D**  
NIP. 197512062008011002

(Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Industri

  
**Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST, MT**  
NIP. 196905071995121001

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA MELALUI  
RECTANGULAR ELBOW 90° DENGAN DIAMOND INLET DISTURBANCE**

**BODY**

**( $d/D_h = 0.064, 0.080, \text{ DAN } 0.100$ )**

<b>Nama Mahasiswa</b>	<b>: Rizka Nur Faila</b>
<b>NRP</b>	<b>: 02111550020201</b>
<b>Departemen</b>	<b>: Teknik Mesin FTI - ITS</b>
<b>Dosen Pembimbing</b>	<b>: Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.</b>

**ABSTRAK**

*Elbow merupakan salah satu konstruksi yang mampu mengendalikan perilaku fluida. Salah satu aplikasi elbow adalah pada ducting system untuk central air conditioner. Penggunaan elbow dalam perancangan ducting system, akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut dikarenakan oleh perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran. Nilai penurunan tekanan (pressure drop) pada aliran yang melalui elbow tersebut dipengaruhi oleh besarnya jari-jari kelengkungan dan sudut belok dari elbow, yang menyebabkan terjadinya separasi dan aliran sekunder (secondary flow) pada elbow. Pemasangan diamond sebagai pengganggu pada inner wall upstream duct diharapkan dapat mengurangi pressure drop, serta melawan adverse pressure dan wall shear stress yang diakibatkan adanya elbow 90°.*

*Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran fluida di dalam rectangular elbow 90° dengan penambahan inlet disturbance body pada inner wall upstream duct berupa diamond. Variasi bodi diamond pengganggu  $d/D_h = 0.064, 0.080$  dan  $0.100$ . Model uji yang akan digunakan di dalam penelitian ini berupa rectangular elbow 90°. Sisi ducting elbow  $D_h = 125$  mm, upstream duct memiliki panjang  $7 D_h$  serta downstream duct memiliki panjang  $15 D_h$ . Penelitian ini menggunakan metode numerik 3D dengan software Fluent 6.3.26 dengan turbulence model  $k-\varepsilon$  standard.*

*Hasil yang diperoleh dari penelitian menunjukkan bahwa nilai pressure drop pada bagian inlet, outlet dan elbow 90° sangat dipengaruhi oleh adanya DIDB. Penambahan DIDB  $d/D_h = 0.100$  paling efektif menurunkan pressure drop pada rectangular elbow 90°. Hal ini disebabkan karena adanya DIDB membentuk shear layer yang cukup kuat melawan adverse pressure pada sisi inner dan outer wall elbow. Namun pada ducting secara keseluruhan, penambahan DIDB tidak efektif mengurangi pressure drop. Adanya DIDB seperti menambahkan minor losses pada saluran yang menyebabkan pressure drop naik.*

***Kata kunci : rectangular elbow 90°, diamond inlet disturbance body, pressure drop, metode numerik***

# NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND ELBOW 90° WITH DIAMOND INLET DISTURBANCE BODY

( $d/D_h = 0.064, 0.080, \text{ AND } 0.100$ )

**Student Name** : Rizka Nur Faila  
**NRP** : 02111550020201  
**Departement** : Mechanical Engineering FTI - ITS  
**Supervisor** : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

## ABSTRACT

*Elbow is one of the construction that capable of controlling fluid behavior. One of elbow application is on ducting system for central air conditioner. The use of elbow in the design of ducting system, will cause the loss of pressure of the flow. This is due to changes in the direction of fluid flow through the channel. The pressure drop in the flow through the elbow is influenced by the magnitude of the curvature radius and the turning angle of the elbow, causing separation and secondary flow to the elbow. Installation of the diamond as a disturbance in the inner wall upstream duct is expected to reduce pressure drop, as well as against adverse pressure and wall shear stress caused by 90° elbow.*

*This study aims to determine the fluid flow characteristics in the rectangular elbow 90° with the addition of inlet disturbance body on inner wall upstream duct with diamond form. Variations of diamond disturber body  $d/D_h = 0.064, 0.080$  and  $0.100$ . The test model to be used in this research is rectangular elbow 90°. Size ducting elbow  $D_h = 125$  mm, upstream duct has  $7 D_h$  length and downstream duct has  $15 D_h$  length. This research uses 3D numerical method with Fluent 6.3.26 software with turbulence of  $k-\epsilon$  standard model.*

*The results obtained from the research indicate that the pressure drop on the inlet, outlet and elbow 90° is greatly influenced by DIDB. Addition of DIDB  $d/D_h 0.100$  is most effective reducing the pressure drop at recrangular elbow 90°. Due to DIDB forms a strong enough shear layer against adverse pressure on the inner side and outer wall elbow. However in overall ducting, the addition of*

*DIDB is not effective in reducing pressure drop. The existence of DIDB such as adding minor losses on the channel that causes pressure drop increase.*

***Keywords : rectangular elbow 90°, diamond inlet disturbance body, pressure drop, numerical method***

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D, selaku dosen pembimbing tesis yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
2. Pemerintah Republik Indonesia, dalam hal ini adalah LPDP, atas beasiswa diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat melanjutkan ke jenjang pendidikan magister ini.
3. PT. Barata Indonesia (Persero) yang telah memberikan izin kuliah di Pasca Sarjana ITS sehingga penulis berkesempatan melanjutkan studinya.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc. Eng. Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Mesin yang telah memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
5. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng selaku Kepala Program Studi Pasca Sarjana Departemen Teknik Mesin memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
6. Kedua orang tua tercinta (Bapak Mahmud dan Ibu Samiati) dan mertua (Bapak Zarno dan Ibu Siti Sumarni) yang senantiasa memberi semangat, dukungan dan doa hingga penulis bisa menyelesaikan tesis ini.
7. Suami penyabar “Tegar Prakarsa Mz” yang selalu memberi semangat, perhatian dan doanya untuk penulis sehingga bisa menyelesaikan tesis ini.
8. Putri tercinta “ALMAHYRA ZOYA ZAKIRA”, terima kasih sudah hadir di kehidupan ibuk ya nak.

9. Bapak Dedy Zulhidayat, S.T., M.T., Ph.D., Bapak Dr. Ir. Wawan Aries Widodo, MT, Ibu Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku dosen penguji tesis penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
10. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D selaku Dosen wali penulis, terima kasih atas kebaikan dan kesabaran bapak selama ini.
11. Rekan satu tim tesis penulis, Yogi Eka Fernandes yang selalu memberikan dukungan, semangat dan kerja sama dalam menyelesaikan tesis ini.
12. Sahabat terbaik penulis Kumaro Elli Sya Bana, terima kasih atas segala bantuan, semangat, dan kelucuan mu.
13. Pak Randi sebagai dosen pembimbing bayangan,. Terima kasih atas ilmu, saran, dan motivasi yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
14. Teman-teman Pasca Sarjana ITS RKE 2015, mas Royan, Dedet, Pak Thomi, mas Ibnu, mas Hernawan, mas Ghafur, mas Feri dan mas Bachtiar, terima kasih atas bantuan dan dukungannya.
15. Teman-teman Pasca Sarjana Teknik Mesin ITS, Zain, Dila, Rizqi, dan teman-teman bapak – bapak S3 semuanya terima kasih atas bantuan dan dukungannya.
16. Seluruh Dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin ITS,
17. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.
18. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tesis ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Mei 2018

**Penulis**

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	vx
DAFTAR TABEL .....	xxi
DAFTAR SIMBOL .....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Persamaan Euler pada Koordinat Streamline.....	5
2.2 Fenomena terjadinya Separasi pada <i>Boundary Layer</i> .....	6
2.3 <i>Secondary Flow</i> pada <i>Elbow</i> .....	7
2.4 Bilangan <i>Reynolds</i> .....	8
2.5 <i>Pressure Coefficient (Cp)</i> .....	9
2.6 Analisa Aliran di dalam <i>Elbow</i> .....	10
BAB III METODE PENELITIAN .....	25
3.1 Geometri <i>elbow</i> .....	25
3.2 Metode Numerik.....	27
3.3.1 Tahap <i>pre-processing</i> menggunakan <i>software</i> GAMBIT 2.4.6...27	
3.3.2 Tahap <i>post-processing</i> menggunakan <i>software</i> Fluent 6.3.26...29	

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....	35
4.1 Distribusi Profil Kecepatan.....	35
4.2 Visualisasi Kecepatan Aliran.....	45
4.3 Visualisasi Aliran Sekunder pada Bidang Melintang.....	64
4.3.1 Visualisasi Aliran Sekunder pada Bidang Melintang $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	64
4.3.2 Visualisasi Aliran Sekunder pada Bidang Melintang $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	71
4.4 Pressure Drop .....	78
4.5 Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) .....	82
4.6 Diskusi .....	85
4.6.1 Evaluasi <i>Near Wall Treatment</i> pada <i>Turbulence Model</i> .....	85
4.6.2 Evaluasi kontur <i>Pathline</i> pada <i>Near Wall Treatment</i> yang berbeda.....	87
4.6.3 Perbandingan <i>Pressure Drop</i> Hasil Penelitian.....	89
 BAB V PENUTUP .....	 93
5.1 Kesimpulan .....	93
5.2 Saran .....	93
 DAFTAR PUSTAKA .....	 95
LAMPIRAN.....	97
RIWAYAT PENULIS.....	99

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> .....	5
Gambar 2.2 Separasi lapisan batas .....	7
Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan .....	7
Gambar 2.4 Aliran Sekunder .....	8
Gambar 2.5 Separasi aliran pada <i>curved pipe</i> .....	11
Gambar 2.6 Distribusi tekanan pada <i>curved pipe</i> .....	11
Gambar 2.7 Skema eksperimen dengan DPIV .....	12
Gambar 2.8 Perbandingan vortisitas dan pola fase aliran rata-rata .....	12
Gambar 2.9 (a) <i>Geometry and the flow configuration</i> , (b) <i>grid arrangement near the cylinder and the plane wall</i> . .....	13
Gambar 2.10 Perbandingan struktur <i>vorticity</i> pada $Re = 175$ (a) simulasi <i>3D</i> (b) simulasi <i>2D</i> .....	14
Gambar 2.11 Perbandingan nilai (a) <i>strouhal number</i> , (b) <i>coefficient drag</i> , (c) <i>coefficient lift</i> , dengan variasi <i>gap</i> dan <i>Reynolds numbers</i> .....	15
Gambar 2.12 (a) Posisi pengambilan data pada <i>domain uji</i> (b) Mesh pada <i>Volume</i> .....	16
Gambar 2.13 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $\phi = 30^\circ$ ( $z/D_h = 0.0$ ) .....	17
Gambar 2.14 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $\phi = 60^\circ$ ( $z/D_h = 0.0$ ) .....	17
Gambar 2.15 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ and $z/D_h = 0.0$ .....	18
Gambar 2.16 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen .....	18
Gambar 2.17 Geometri pipa melengkung .....	19
Gambar 2.18 <i>Computational grid meshing</i> .....	19
Gambar 2.19 <i>Velocity profile</i> pada sudut $0^\circ$ , $30^\circ$ , $60^\circ$ , dan $90^\circ$ dengan variasi <i>curvature ratio</i> ( $R_c/D = 1 - 5$ ) .....	20
Gambar 2.20 Gambar detail posisi penempatan bodi pengganggu .....	21
Gambar 2.21 Meshing <i>hexahedral-map</i> di sekitar <i>IDB</i> dengan $l/D_h = 0.1$ .....	22

Gambar 2.22 Visualisasi profil kecepatan objek penelitian dengan $IDB l/D_h = 0.1$ .....	23
Gambar 2.23 <i>Pressure Drop Elbow</i> . Variasi <i>Reynolds Number</i> $1,59 \times 10^4$ , $6,37 \times 10^4$ , $13,5 \times 10^4$ dan Variasi jarak <i>Inlet Disturbance Body</i> $l/D_h = 0.1, 0.3, 0,5$ .....	23
Gambar 3.1 Geometri penelitian.....	27
Gambar 3.2 Detail posisi penempatan <i>diamond inlet disturbance body</i> .....	27
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> pada saluran dengan <i>elbow</i> $90^\circ$ tanpa pengganggu tipe <i>hexahedral-map</i> pada GAMBIT .....	29
Gambar 3.4 <i>Meshing</i> pada saluran dengan <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan <i>DDB</i> tipe <i>hexahedral-map</i> pada GAMBIT .....	29
Gambar 3.5 <i>Boundary condition elbow</i> $90^\circ$ pada GAMBIT .....	31
Gambar 3.6 <i>Meshing</i> pada <i>symmetric flat-walled diffuser</i> 3D dengan tipe <i>hexahedral-map</i> untuk sudut divergensi $(2\theta_1) = 12^\circ$ pada GAMBIT.....	25
Gambar 3.7 <i>Flowchart penelitian elbow</i> $90^\circ$ dengan <i>diamond inlet disturbance body</i> .....	34
Gambar 4.1 Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>DIDB</i> 0.064 pada $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ .....	38
Gambar 4.2 Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>DIDB</i> 0.064 pada $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .....	39
Gambar 4.3 Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>DIDB</i> 0.080 pada $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ .....	41
Gambar 4.4 Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>DIDB</i> 0.080 pada $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .....	42
Gambar 4.5 Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>DIDB</i> 0.100 pada $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ .....	44
Gambar 4.6 Profil kecepatan tanpa dan dengan <i>DIDB</i> 0.100 pada $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .....	45
Gambar 4.7 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	48
Gambar 4.8 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan <i>DIDB</i> $d/D_h$ 0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	48

Gambar 4.9 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	49
Gambar 4.10 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	49
Gambar 4.11 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	51
Gambar 4.12 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	51
Gambar 4.13 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	52
Gambar 4.14 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	52
Gambar 4.15 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	54
Gambar 4.16 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	54
Gambar 4.17 <i>Pathline</i> ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	55
Gambar 4.18 <i>Pathline</i> ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	55
Gambar 4.19 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	57
Gambar 4.20 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	57
Gambar 4.21 <i>Pathline</i> ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	58
Gambar 4.22 <i>Pathline</i> ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	58
Gambar 4.23 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	60
Gambar 4.24 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB d/D_h$ 0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	60

Gambar 4.25 <i>Pathline</i> ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> 90° tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .....	61
Gambar 4.26 <i>Pathline</i> ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> $d/D_h$ 0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .....	61
Gambar 4.27 Vektor kecepatan ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> $d/D_h$ 0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{WI} = 13,5 \times 10^4$ .....	63
Gambar 4.28 Vektor kecepatan ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> $d/D_h$ 0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{WI} = 13,5 \times 10^4$ .....	63
Gambar 4.29 <i>Pathline</i> ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> $d/D_h$ 0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .....	64
Gambar 4.30 <i>Pathline</i> ( <i>m/s</i> ) di dalam <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> $d/D_h$ 0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .....	64
Gambar 4.31 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> 90° tanpa pengganggu untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	66
Gambar 4.32 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> dengan <i>DIDB</i> $d/D_h = 0.064$ untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	66
Gambar 4.33 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> dengan <i>DIDB</i> $d/D_h = 0.080$ untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	67
Gambar 4.34 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> dengan <i>DIDB</i> $d/D_h = 0.100$ untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	67
Gambar 4.35 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( <i>m/s</i> ) <i>elbow</i> 90° tanpa untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	70
Gambar 4.36 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( <i>m/s</i> ) <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> 0.064 untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	70
Gambar 4.37 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( <i>m/s</i> ) <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> 0.080 untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	71
Gambar 4.38 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( <i>m/s</i> ) <i>elbow</i> 90° dengan <i>DIDB</i> 0.100 untuk $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .....	71
Gambar 4.39 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> 90° tanpa pengganggu untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	73
Gambar 4.40 Kontur kecepatan ( <i>m/s</i> ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> dengan <i>DIDB</i> $d/D_h = 0.064$ untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	73

Gambar 4.41 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> dengan $DIDB$ $d/D_h = 0.080$ untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	74
Gambar 4.42 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada <i>elbow</i> dengan $DIDB$ $d/D_h = 0.100$ untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	74
Gambar 4.43 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( $m/s$ ) <i>elbow</i> $90^\circ$ tanpa untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	77
Gambar 4.44 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( $m/s$ ) <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB$ $0.064$ untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	77
Gambar 4.45 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( $m/s$ ) <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB$ $0.08$ untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	78
Gambar 4.46 Vektor kecepatan bidang melintang pada $z/D_h = 4.5$ ( $m/s$ ) <i>elbow</i> $90^\circ$ dengan $DIDB$ $0.1$ untuk $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .....	78
Gambar 4.47 <i>Pressure Drop Square Duct</i> dengan <i>elbow</i> $90^\circ$ . Variasi <i>Reynolds Number</i> $6,37 \times 10^4$ , $13,5 \times 10^4$ dan Variasi <i>Diamond Inlet Disturbance Body</i> $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .....	79
Gambar 4.48 <i>Pressure Drop Upstream Duct</i> . Variasi <i>Reynolds Number</i> $6,37 \times 10^4$ , $13,5 \times 10^4$ dan Variasi <i>Diamond Inlet Disturbance Body</i> $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .....	80
Gambar 4.49 <i>Pressure Drop Elbow</i> $90^\circ$ . Variasi <i>Reynolds Number</i> $6,37 \times 10^4$ , $13,5 \times 10^4$ dan Variasi <i>Diamond Inlet Disturbance Body</i> $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .....	81
Gambar 4.50 <i>Pressure Drop Downstream</i> . Variasi <i>Reynolds Number</i> $6,37 \times 10^4$ , $13,5 \times 10^4$ dan Variasi <i>Diamond Inlet Disturbance Body</i> $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .....	82
Gambar 4.51 Distribusi Nilai Koefisien Tekanan <i>Square Duct</i> dengan <i>elbow</i> $90^\circ$ . Variasi <i>Reynolds Number</i> $6,37 \times 10^4$ dan Variasi <i>Diamond Inlet Disturbance Body</i> $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .....	83
Gambar 4.52 Distribusi Nilai Koefisien Tekanan <i>Square Duct</i> dengan <i>elbow</i> $90^\circ$ . Variasi <i>Reynolds Number</i> $13,5 \times 10^4$ dan Variasi <i>Diamond Inlet Disturbance Body</i> $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .....	85

Gambar 4.53 <i>Pathline (m/s)</i> di dalam <i>elbow 90°</i> tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik dengan <i>k – ε standart - Standart Wall Function</i> untuk $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ .....	88
Gambar 4.54 <i>Pathline (m/s)</i> di dalam <i>elbow 90°</i> tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik dengan <i>k – ε standart - Enhanced Wall Treatment</i> untuk $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ .....	89
Gambar 4.55 Perbandingan <i>Pressure Drop Square Duct</i> dengan <i>elbow 90°</i> . <i>Reynolds Number</i> $6.37 \times 10^4, 13.5 \times 10^4$ .....	90
Gambar 4.56 Perbandingan <i>Pressure Drop Upstream Duct</i> dengan <i>elbow 90°</i> . <i>Reynolds Number</i> $6.37 \times 10^4, 13.5 \times 10^4$ .....	91
Gambar 4.57 Perbandingan <i>Pressure Drop elbow 90°</i> . <i>Reynolds Number</i> $6.37 \times 10^4, 13.5 \times 10^4$ .....	92
Gambar 4.58 Perbandingan <i>Pressure Drop Downstream Duct</i> . <i>Reynolds Number</i> $6.37 \times 10^4, 13.5 \times 10^4$ .....	93

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Data perbandingan antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang dilakukan.....	25
Tabel 3.1 Analisa <i>grid independency pressure drop</i> pada <i>ducting</i> .....	32
Tabel 4.1 <i>Pressure Drop</i> hasil simulasi <i>k – ε standart</i> dengan <i>Near Wall Treatment – Standart Wall Function</i> .....	87
Tabel 4.2 <i>Pressure Drop</i> hasil simulasi <i>k – ε standart</i> dengan <i>Near Wall Treatment – Enhanced Wall Treatment</i> .....	87
Tabel 4.3 Perbandingan <i>Pressure Drop</i> hasil simulasi <i>k – ε standart</i> dengan <i>Near Wall Treatment</i> yang berbeda.....	87

*~ halaman ini sengaja dikosongkan ~*

## DAFTAR SIMBOL

Simbol geometri dari *elbow* 90° :

- $L_1$  : Panjang *upstream duct*, mm
- $L_2$  : Panjang *downstream duct*, mm
- $R$  : Jarak sumbu imajiner, mm
- $R/D_h$  : Jari-jari kelengkungan *elbow* 90°, mm
- $d_1 \times d_1$  : Ukuran *diamond disturbance body* I, mm
- $d_2 \times d_2$  : Ukuran *diamond disturbance body* II, mm
- $d_3 \times d_3$  : Ukuran *diamond disturbance body* III, mm
- $D_h$  : *Hydraulic diameter*, mm
- $g$  : gap, mm
- $l$  : Jarak *diamond* dengan inlet *elbow*, mm

$C_p$  : *wall Pressure Coefficient*, ( $C_p = \frac{p_{s,i} - p_{s,o}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$ ), tak berdimensi

$g$  : percepatan gravitasi, m/s<sup>2</sup>

$p_{s,i}$  : tekanan statis dinding pada  $x/D_h = i$ , Pa

$p_{s,o}$  : tekanan statis pada *inlet elbow* 90°, Pa

$p_{s,e}$  : tekanan statis pada *outlet elbow* 90°, Pa

$Re_{DH}$  : bilangan *Reynolds* berdasarkan *diameter hydraulic ducting*,  $Re_{DH} = \frac{\rho U_{maks} D_H}{\mu}$ , bilangan tak berdimensi

$T$  : temperatur ruang kerja (°C)

$u$  : kecepatan lokal, m/s

$U_{ref}$  : kecepatan *freestream*, m/s

$\mu$  : *viskositas absolut udara*, N.s/m<sup>2</sup>

$\rho$  : massa jenis udara, kg/m<sup>3</sup>

$\nu$  : viskositas kinematis udara, m<sup>2</sup>/s

*~ halaman ini sengaja dikosongkan ~*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi yang semakin berkembang berdampak pada kemajuan yang sangat pesat dalam industri global. Sehingga manusia dituntut dapat berpikir serta berinovasi agar segala sesuatu yang sudah ada menjadi lebih efektif dan efisien. Maka dari itu diperlukan usaha untuk meningkatkan efisiensi sebagai bentuk pengembangan teknologi baru dengan cara melakukan penelitian yang bermanfaat. Penelitian pada bidang ilmu mekanika fluida mempelajari karakteristik aliran fluida, sehingga dapat diketahui faktor penyebab rugi-rugi pada suatu konstruksi yang tidak bersesuaian dengan sifat alami fluida. Salah satu konstruksi yang mampu mengendalikan perilaku fluida adalah *elbow*.

Peninjauan lanjutan studi karakteristik aliran fluida pada *elbow* ditujukan karena aplikasi dari *elbow* ini telah banyak digunakan di gedung-gedung ataupun kompleks pertokoan di perkotaan. Salah satu aplikasi *elbow* adalah pada *ducting system* untuk *central air conditioner*. Dengan adanya *elbow*, aliran udara dapat didistribusikan secara merata sesuai dengan arah yang diinginkan dengan pembelokan aliran, penggabungan aliran, ataupun percabangan aliran.

*Elbow* merupakan sebuah saluran tertutup yang digunakan untuk membelokkan fluida sesuai dengan arah yang diinginkan. Pembelokkan arah aliran fluida menyebabkan terjadinya penurunan tekanan yang besar sehingga mengakibatkan kerugian energi (*head losses*) yang besar. Hal yang mempengaruhi terjadinya kerugian energi karena adanya perkembangan *boundary layer* pada sisi *inner* dan *outer wall* sehingga mengakibatkan terjadinya separasi aliran. Separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran fluida melawan *friction loss* dan *adverse pressure gradient (APG)* pada dinding (*wall*) sehingga aliran akan berbalik arah dari aliran utamanya dan akan terbentuk *secondary flow (vortex)* yang dapat mengurangi energi aliran.

Salah satu usaha untuk mengurangi kerugian aliran serta penurunan tekanan pada saluran berpenampang persegi dengan menggunakan penghubung

*elbow* 90° adalah menambahkan suatu gangguan yaitu bodi pengganggu berbentuk *diamond (inlet disturbance body)* pada sisi *inner wall* dengan jarak tertentu. Penambahan suatu bodi pengganggu berbentuk *diamond* diharapkan meningkatkan intensitas turbulensi aliran dan dapat menunda terjadinya aliran terseparasi pada *elbow* sehingga dapat mengurangi *pressure drop*.

Beberapa upaya pendekatan dilakukan untuk mengamati perilaku aliran fluida pada saluran *elbow*. **Dutta dkk (2015)** melakukan pengamatan tentang bentuk *velocity profile* pada aliran *elbow* pada  $Re$   $10^5$  dengan variasi  $R_c/D_h$  dari 1 s/d 5. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa saluran *elbow* akan mengubah bentuk aliran yang awalnya uniform menjadi bentuk yang tak beraturan dikarenakan adanya separasi sehingga muncul aliran balik.

**Ozgoren (2006)** melakukan eksperimen dengan teknik *digital particle image velocimetry* (DPIV) yang digunakan untuk mengetahui karakteristik aliran pada daerah *downstream*. Bentuk yang diteliti yaitu *circular cylinder*, *square cylinder*, dan *diamond cylinder* pada aliran yang seragam. *Strouhal number* diambil pada rentang  $Re$  antara  $550 \leq Re \leq 3400$  dihitung dari bentuk pola aliran. Hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa struktur atau pola aliran tergantung oleh geometri atau bentuk dari benda dan besarnya *reynold number*. Dari masing-masing geometri yaitu *circular cylinder*, *square cylinder*, dan *diamond cylinder* diperoleh *strouhal number* 0.21, 0.13, 0.17.

**Bimantoro (2017)** melakukan penelitian secara numerik 3D untuk menganalisa karakteristik aliran di dalam saluran udara berpenampang bujur sangkar dengan variasi penambahan *Inlet Disturbance Body (IDB)* berupa *square cylinder*. Model turbulensi yang digunakan dalam penelitian adalah *k-ε standard*. Hasil penelitian menunjukkan adanya penambahan *IDB* mempengaruhi nilai *pressure drop* pada bagian *inlet*, *outlet* dan *elbow* 90°.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan di dalam latar belakang, didapatkan penjelasan bahwa *friction loss* dan *secondary flow* di dalam saluran yang menyebabkan *pressure drop* meningkat sehingga mempengaruhi performa *elbow*. Rumusan masalah di dalam penelitian ini antara lain:

1. Penambahan *inlet disturbance body* menghasilkan proses percepatan aliran fluida yang besar sehingga meningkatkan *intensitas turbulensi*.
2. Penempatan *disturbance body* pada *inlet upstream* memberikan percepatan aliran antara *body* dengan dinding sehingga meningkatkan momentum aliran fluida di *inner elbow* sampai dengan *downstream duct*.

Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut secara numerik *3D* mengenai evaluasi karakteristik *boundary layer turbulent* pada *elbow 90°* dengan penambahan *diamond inlet disturbance body* variasi  $(d/D_h) = 0.064, 0.080$  dan  $0.100$ .

## 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran fluida di dalam *rectangular elbow 90°* dengan penambahan *inlet disturbance body* pada *inner wall upstream duct* berupa *diamond* dan dengan jarak  $0.100 D_h$ . Parameter-parameter aliran fluida yang ditentukan meliputi:

1. Profil kecepatan
2. Koefisien tekanan ( $C_p$ )
3. *Pressure drop* antara *outlet duct* dan *inlet duct*
4. Struktur *streamline* dari aliran yang terseparasi

Penelitian dilakukan secara numerik dengan menggunakan *software* Fluent 6.3.26 dimana analisa dilakukan secara tiga dimensi (3D).

#### **1.4. Batasan Masalah**

Pada penelitian ini digunakan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

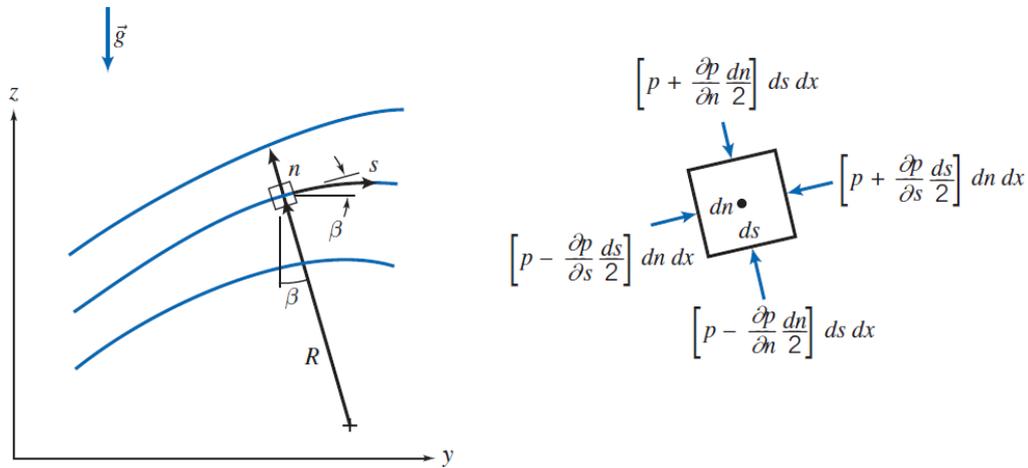
1. Kondisi aliran pada *inlet test section* adalah *steady, incompressible* dan *uniform*.
2. Pengaruh perpindahan panas diabaikan.
3. Pengaruh kekasaran permukaan pada dinding *elbow* dapat diabaikan

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Persamaan Euler Pada Koordinat Streamline

Pada aliran fluida di sepanjang *streamline* pada kondisi *steady flow*, maka setiap partikel fluida berurutan yang melewati titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. Persamaan gerakannya dinyatakan dalam koordinat *streamline* yang dibangun dari persamaan *Euler* untuk aliran *inviscid*.

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



Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline*  
(Fox et al, 2011)

Gerakan partikel fluida di dalam medan aliran diilustrasikan pada gambar 2.1, dimana persamaan gerak di sepanjang *streamline* dinyatakan sebagai:

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

Dengan mengabaikan efek ketinggian, *steady flow* dan gaya body maka persamaan (2.2) menjadi

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 menunjukkan hubungan antara tekanan dengan kecepatan. Hal ini memenuhi hukum kekekalan energi, dimana jika aliran diasumsikan tanpa

gesekan maka penjumlahan komponen tekanan dan kecepatan pada setiap titik adalah sama. Sedangkan persamaan gerak untuk aliran *steady* pada arah normal terhadap *streamline* dinyatakan sebagai:

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

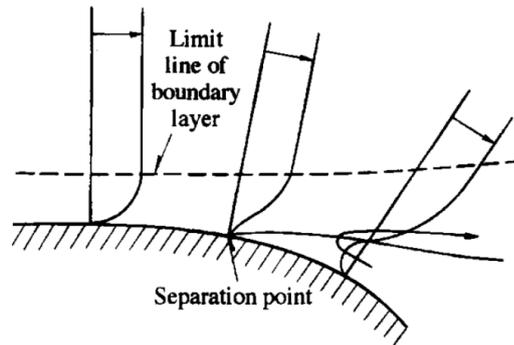
Untuk aliran pada bidang horizontal maka persamaannya menjadi

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

Persamaan 2.5 menyatakan perubahan tekanan di sepanjang normal *streamline* akan terjadi jika terdapat perubahan jari-jari kelengkungan. Semakin besar jari-jari kelengkungan maka tekanan yang terjadi juga semakin besar. Perbedaan tekanan ini digunakan untuk mengimbangi gaya sentrifugal. Namun jika *streamlinenya* lurus ( $R = \infty$ ) maka tidak ada perubahan tekanan pada normal *streamline*. Oleh karena itu aliran di dalam pipa lurus, tekanan pada arah normalnya konstan.

## 2.2 Fenomena terjadinya Separasi pada *Boundary Layer*

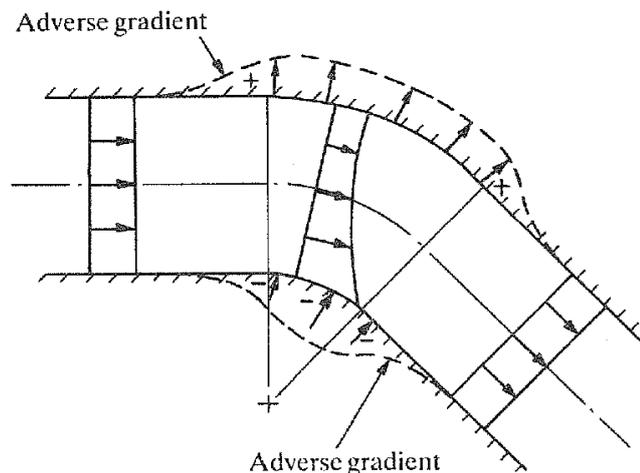
Separasi aliran merupakan salah satu fenomena yang terjadi pada *elbow* yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan berupa *pressure drop*. Proses separasi diawali dengan adanya fluida yang secara kontinyu melawan gaya gesek dan hambatan berupa *adverse pressure gradient*. Interaksi langsung antara aliran fluida secara kontinyu dengan dinding *elbow* menyebabkan terjadinya gesekan, dimana gesekan yang timbul dapat mengurangi momentum aliran. Saat momentum aliran tidak mampu lagi untuk mengatasi hambatan berupa *adverse pressure gradient*, maka aliran akan terseparasi dari kontur aliran utamanya dan terbentuk aliran dengan arah berlawanan yang merugikan. Hal ini ditunjukkan dengan perubahan besarnya kecepatan dalam aliran dan terjadinya *vortex* disekitar dinding *elbow*. Besarnya *vortex region* dapat merugikan. Ini terjadi karena adanya penurunan momentum aliran dimana luas penampang aliran utama akan semakin menyempit yang dapat menyebabkan aliran mengalami percepatan pada sisi dengan radius kelengkungan lebih kecil dan terjadinya *pressure drop*. Separasi aliran diilustrasikan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Separasi lapisan batas (Nakayama, 1999)

### 2.3 Secondary Flow pada Elbow

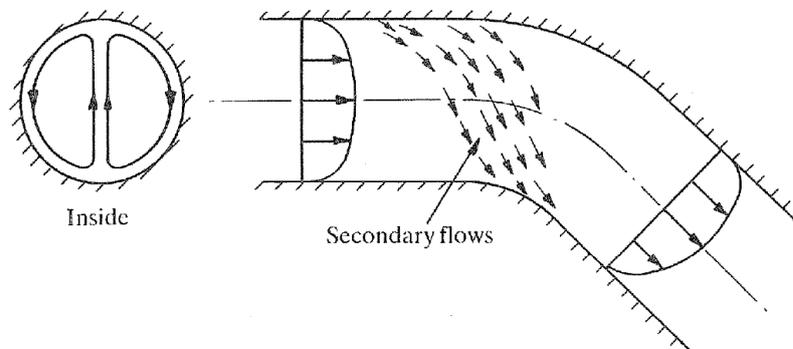
Suatu aliran yang melalui *elbow* tentunya akan terjadi perubahan arah aliran. Adanya perubahan arah aliran ini akan mempengaruhi perubahan tekanan statis dan distribusi kecepatan aliran tersebut, setidaknya dapat menimbulkan dua *adverse pressure gradient* seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Dengan adanya dua *adverse pressure gradient*, maka aliran harus mampu mengatasi kedua *adverse pressure gradient* ini. Apabila aliran tidak mampu mengatasinya, kemudian akan terjadi aliran sekunder dan turbulensi pada struktur aliran yang disebabkan oleh bentuk saluran yang melengkung.



Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan (Miller, 1990)

Variasi kecepatan aliran dari nol di dekat permukaan saluran hingga kecepatan maksimum pada daerah inti, aliran aktual melalui saluran belok melibatkan distribusi energi yang tidak *uniform*. Pada sisi *inner* dan *outer wall*

terjadi perbedaan distribusi kecepatan, ini terjadi karena aliran yang bergerak menuju sisi luar memiliki tekanan statis semakin besar. Adanya perbedaan tekanan pada kedua sisi ini menyebabkan aliran di dalam *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama. Aliran sekunder ini merupakan fenomena aliran tiga dimensi dapat diilustrasikan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Aliran Sekunder (Miller, 1990)

Namun pada *elbow* dengan penampang berbentuk persegi, aliran sekunder yang terjadi berbeda dengan *elbow* dengan penampang lingkaran. Aliran sekunder terjadi karena pada *elbow* dengan penampang persegi terjadi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping sedangkan pada *circular elbow* tidak dijumpai fenomena seperti ini. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi sudut penampang dan sisi samping inilah yang menyebabkan terjadinya aliran sekunder. Ini terjadi karena pada *elbow* dengan penampang persegi timbul aliran sekunder pada sisi yang membentuk sudut penampang.

## 2.4 BILANGAN *REYNOLDS*

Bilangan *Reynolds* merupakan salah satu faktor dalam proses terbentuknya suatu aliran. Semakin besar bilangan *Reynolds*, maka aliran yang terbentuk akan semakin turbulen. Aliran turbulen memiliki bentuk lebih *blunt* dibandingkan dengan aliran laminar, sehingga momentum aliran turbulen di dekat dinding lebih besar. Hal ini mengakibatkan aliran lebih tahan terhadap tegangan geser dan *adverse pressure gradient*. Persamaan bilangan *Reynolds* dapat dituliskan sebagai:

$$Re = \frac{\bar{v}.D}{\nu} \quad (2.6)$$

dimana :  $\bar{V}$  = Kecepatan fluida yang mengalir  $\left(\frac{m}{s}\right)$   
 $D$  = Diameter dalam pipa (m)  
 $\nu$  = Kekentalan/*viskositas* kinematik fluida  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

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

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.7)$$

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

## 2.5 Coefficient Pressure ( $C_p$ )

Koefisien tekanan ( $C_p$ ) adalah koefisien yang menyatakan distribusi tekanan pada kontur permukaan suatu *elbow*. Koefisien tekanan diperoleh dari selisih antara tekanan statis lokal disatu titik dengan tekanan statis referensi pada *inlet elbow* yang kemudian dibandingkan dengan tekanan dinamis yang juga diukur pada *inlet elbow*.  $C_p$  didefinisikan sebagai :

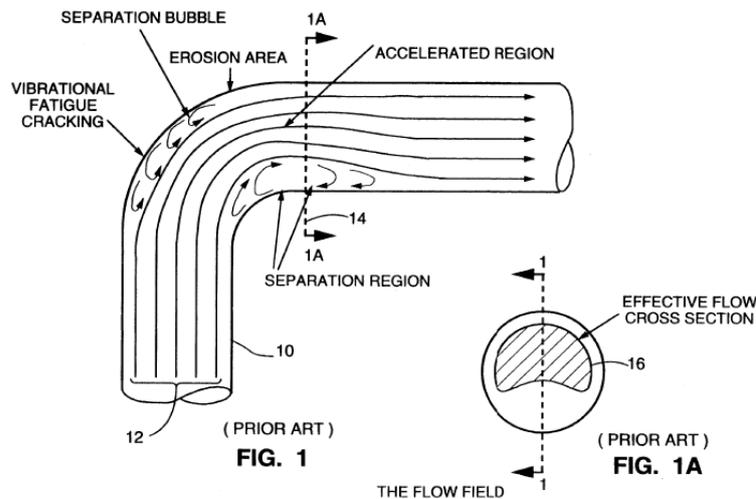
$$C_p = \frac{p_{s,i} - p_{s,o}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}, \quad (2.8)$$

dimana:  $p_{s,i}$  : tekanan statis dinding pada  $x/D_h = i$   
 $p_{s,o}$  : tekanan statis referensi pada *elbow inlet*  
 $\rho$  : massa jenis fluida pada kondisi kerja  
 $U_{ref}$  : kecepatan *freestream*

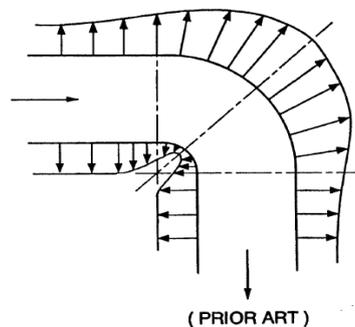
Harga  $C_p$  sebagai selisih antara *inlet* dengan *outlet elbow* tidak dapat menjelaskan besarnya *pressure drop* secara di sepanjang aliran. Semakin besar selisih harga  $C_p$  antara *inlet* dengan *outlet* maka *pressure drop* yang terjadi akan semakin besar.

## 2.6 Analisa Aliran di dalam Elbow

Cheng (1994) melakukan penelitian dengan menginjeksikan cairan berwarna pada pipa transparan untuk memperoleh ilustrasi streamline di dalam *elbow*. Gambar 2.5 menunjukkan separasi aliran pada *curved pipe* di sisi *inner* dan *outer wall elbow*. Separasi aliran yang terjadi pada sisi *inner wall* dan *outer wall* menyebabkan *effective flow area* berkurang. Gambar 2.6 menunjukkan distribusi tekanan pada *curved pipe*. Terlihat bahwa terjadi kenaikan tekanan (*adverse pressure gradient*) di sepanjang sisi *inner wall* dan *outer wall elbow* 90°.

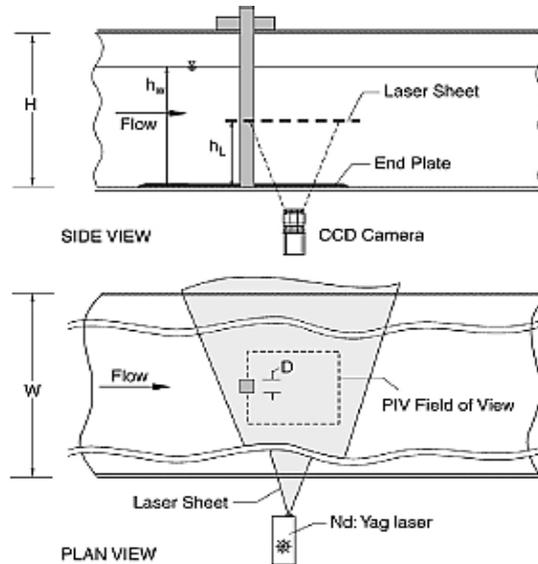


Gambar 2.5 Separasi aliran pada *curved pipe* (Cheng, 1994)



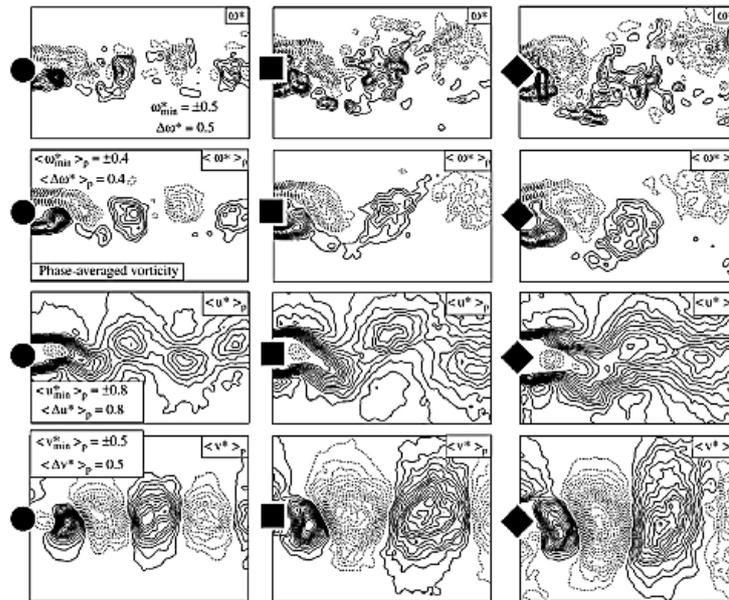
Gambar 2.6 Distribusi tekanan pada *curved pipe* (Cheng, 1994)

Ozgoren (2006) melakukan eksperimen untuk mengetahui karakteristik aliran pada daerah *downstream*. Gambar 2.7 menunjukkan skema eksperimen dengan teknik *digital particle image velocimetry* (DPIV) yang digunakan. Bentuk yang diteliti yaitu *circular cylinder* (CC), *square cylinder* (SC), dan *45° square cylinder* (OSC) pada aliran yang seragam.



Gambar 2.7 Skema eksperimen dengan DPIV (Ozgoren, 2006)

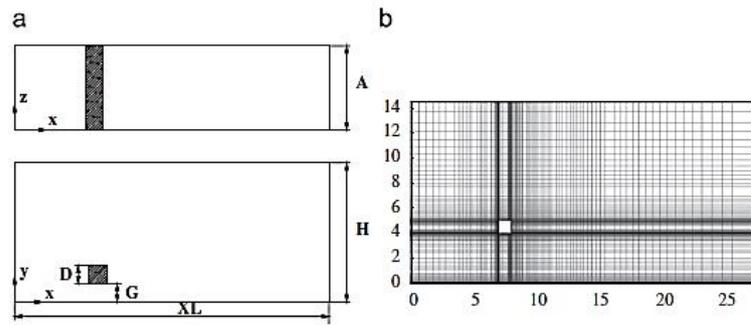
Percobaan dilakukan pada *closed-loop free surface* dalam saluran air, dengan lebar  $W = 1000$  mm, panjang 8000 dan tinggi  $H = 750$  mm. *Reynolds number* yang digunakan pada rentang  $550 \leq Re \leq 3400$ , intensitas turbulensi pada 0,2 %. Diameter dan lebar dari geometri yang diteliti yaitu 20 mm. Gambar 2.8 menunjukkan perbandingan vortisitas dan pola fase aliran rata-rata.



Gambar 2.8 Perbandingan vortisitas dan pola fase aliran rata-rata (Ozgoren, 2006)

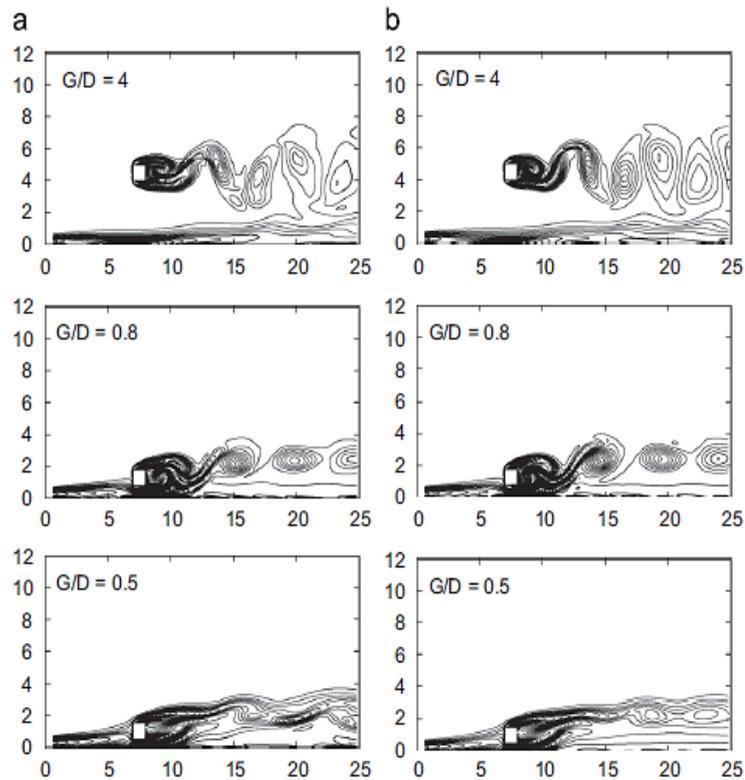
Hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa struktur atau pola aliran tergantung oleh geometri atau bentuk dari benda dan besarnya *reynold number*. Dari masing-masing geometri yaitu *circular cylinder*(CC), *square cylinder*(SC), dan  $45^0$  *square cylinder*(OSC) diperoleh *strouhal number* 0.21, 0.13, 0.17. Gambar 2.8 menunjukkan bahwa geometri OSC memiliki konsentrasi aliran yang tertinggi, karena gerakan dari rotasi fluida yang sangat kuat dibanding CC dan SC.

Mahir (2009) melakukan penelitian secara numerik, dengan simulasi 2D dan 3D yang bertujuan untuk mengetahui struktur aliran pada area wake yang terjadi pada *square cylinder* yang diletakkan pada near a plane wall dengan metode finite *navier stoke equation*. Rasio antara *gap* dengan dinding (*wall*), G/D antara 0.2 sampai 4. *Reynolds numbers* yang digunakan yaitu 175, 185, dan 250. Pada simulasi 3D data yang dapat dilihat adalah *coefficient lift*, *coefficient drag* dan *strouhal number*, dan hasilnya akan dibandingkan dengan simulasi 2D. geometri, konfigurasi aliran dan meshing ditampilkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 (a) *Geometry and the flow configuration*, (b) *grid arrangement near the cylinder and the plane wall*. (Mahir, 2009)

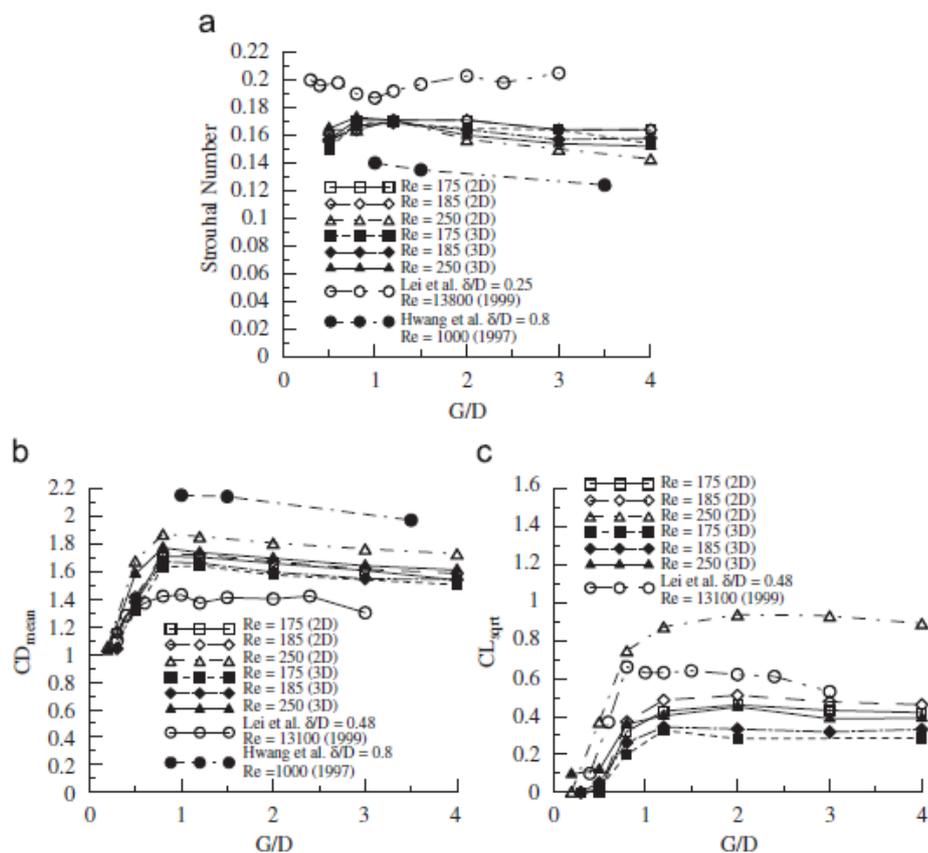
Hasil dari simulasi 3D dan 2D dibandingkan dan diperoleh hasil bahwa tidak ada perubahan yang signifikan pada kedua simulasi tersebut, dimana daerah yang diteliti pada kedua simulasi terletak pada *downstream* yang ditekankan pada terbentuknya *vorticity* pada aliran. Pada gambar 2.10 menunjukkan perbandingan dari kedua simulasi tersebut.



Gambar 2.10 Perbandingan struktur *vorticity* pada  $Re = 175$  (a) simulasi 3D (b) simulasi 2D (Mahir, 2009)

Hasil dari simulasi ini yaitu tidak ada perbedaan yang signifikan antara simulasi 2D dan 3D, *vorticity* yang terbentuk pada masing-masing variasi *gap* berbeda pada variasi *gap* yang besar yaitu  $G/D = 0,2$  dan 4 struktur *vorticity* yang terbentuk pada daerah *wake* sama seperti yang terjadi pada *single cylinder* pada daerah *free stream* semakin kecil *gap* nya maka *vorticity* terbentuk akan semakin merapat ke *wall*.

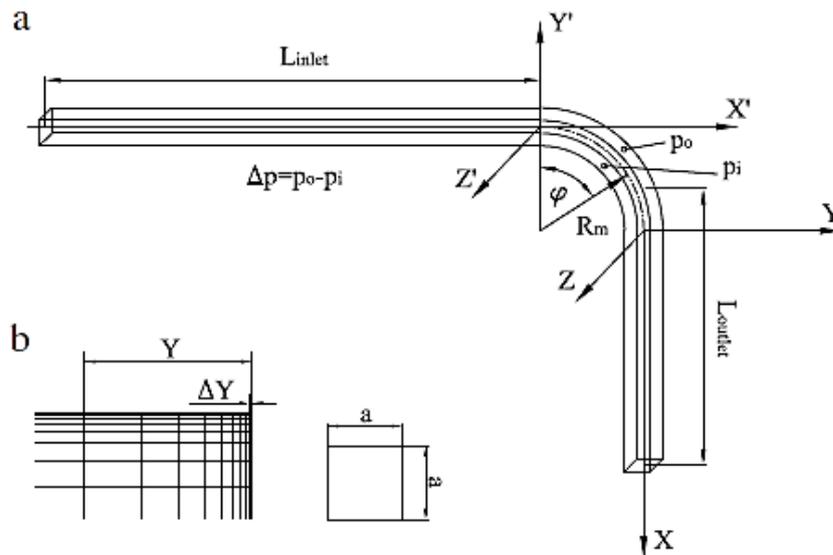
Gambar 2.11 menunjukkan perbandingan nilai *strouhal number*, *coefficient drag* dan *coefficient lift* dalam bentuk grafik. Nilai *strouhal number* dan *coefficient drag* memiliki nilai tertinggi pada variasi  $G/D = 1$  dengan  $Re = 250$ , sedangkan nilai *coefficient lift* tertinggi terdapat pada variasi  $G/D = 2$  dengan  $Re = 250$ .



Gambar 2.11 Perbandingan nilai (a) *strouhal number*, (b) *coefficient drag*, (c) *coefficient lift*, dengan variasi *gap* dan *Reynolds numbers* (Mahir, 2009)

Rup dan Sarna (2011) melakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik aliran fluida melalui *rectangular duct* secara eksperimen dan numerik. Penelitian secara numerik yang dilakukan menggunakan model turbulensi *RSM (Reynolds Stress Model)* pada  $Re = 40000$ .

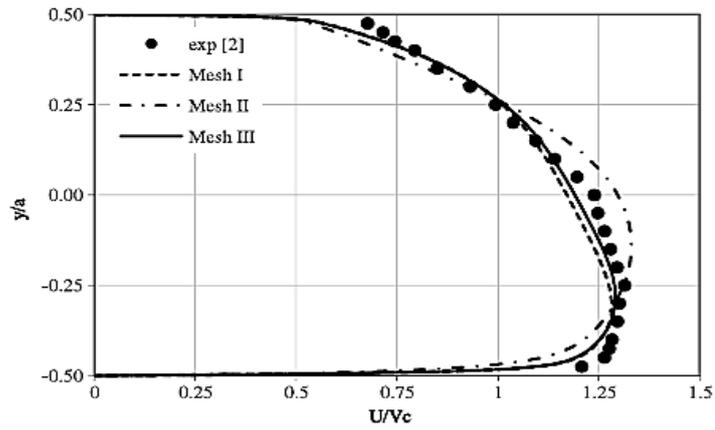
Gambar 2.12.(a) menunjukkan posisi pengambilan data pada domain uji. Ukuran geometri *rectangular duct* yang digunakan  $a \times a = 80 \times 80$  mm,  $D_h = 80$  mm dan  $L_{inlet} = L_{outlet} = 20 D_h = 1600$  mm. Gambar 2.12.(b) menunjukkan mesh volume yang digunakan dimana variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh  $V_k = 553\ 052$ ,  $V_k = 1766\ 079$ , and  $V_k = 1034\ 775$ .



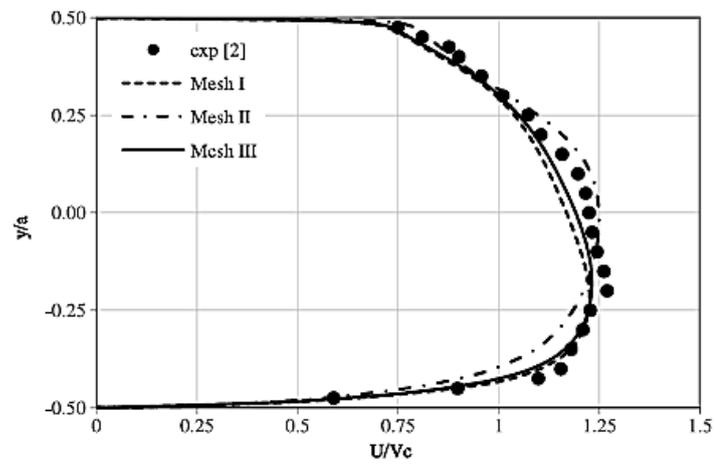
Gambar 2.12 (a) Posisi pengambilan data pada *domain* uji (b) Mesh pada *Volume*  
(Rup dan Sarna, 2011)

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

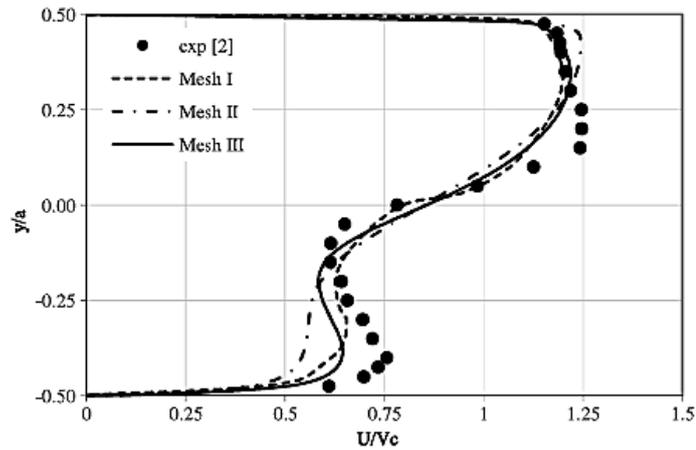
Gambar 2.13 dan 2.14 menunjukkan bahwa hasil yang didapat dari simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada lokasi  $\phi = 30^\circ$  dan  $60^\circ$ . Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.15 yang menunjukkan profil kecepatan pada dengan lokasi  $x/D_h = 1.0$  and  $z/D_h = 0.0$  hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ( $V_k = 1034\ 775$ ).



Gambar 2.13 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk  $\phi = 30^\circ$  ( $z/D_h = 0.0$ ) (Rup dan Sarna, 2011)

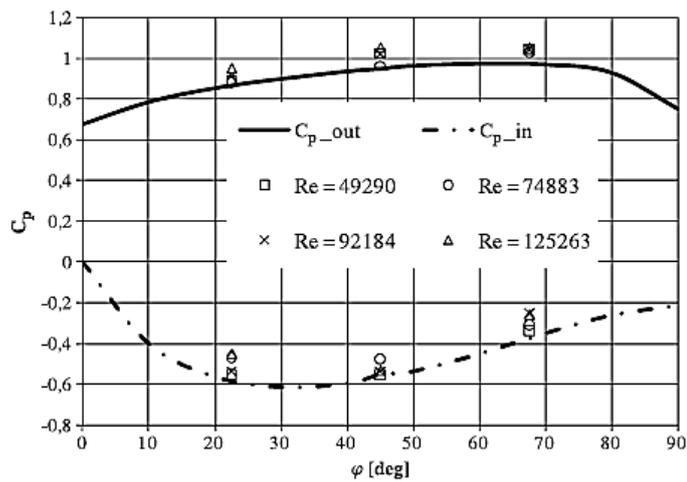


Gambar 2.14 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk  $\phi = 60^\circ$  ( $z/D_h = 0.0$ ) (Rup dan Sarna, 2011)



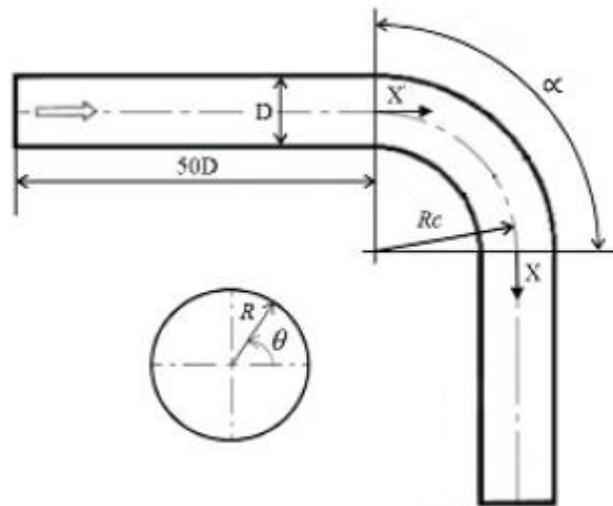
Gambar 2.15. Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk  $x/D_h = 1.0$  and  $z/D_h = 0.0$  (Rup dan Sarna, 2011)

Gambar 2.16 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada *elbow*. Terlihat 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.



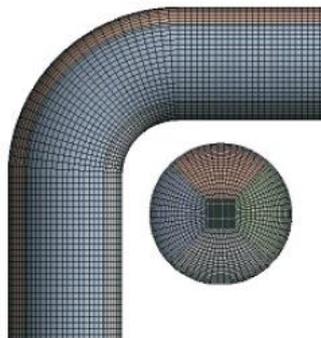
Gambar 2.16. Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen (Rup dan Sarna, 2011)

Dutta dkk (2015) melakukan penelitian secara eksperimen dan numerik tentang pengaruh *Reynolds Number* dan *Curvature Ratio* pada aliran di dalam *elbow 90°*. Variasi yang digunakan dengan *curvature ratio*  $R_c/D = 1$  sampai 5 serta bilangan  $Re$  dari  $1 \times 10^5$  sampai  $10 \times 10^5$ . Geometri penelitian yang digunakan yaitu diameter *ducting* 0.01 m, panjang *inlet*  $50 D$  dan panjang *outlet*  $20 D$  seperti ditunjukkan gambar 2.17.



Gambar 2.17 Geometri pipa melengkung (Dutta dkk, 2015)

*Meshing* digunakan dalam penelitian numerik adalah tipe *hexahedral map* sebagai elemen *meshing* dengan ketentuan  $y^+ < 3$  seperti ditunjukkan gambar 2.18.



Gambar 2.18. *Computational grid meshing* (Dutta dkk, 2015).

Boundary condition yang digunakan yaitu inlet velocity ( $U_{in}$ ), energi kinetic pada aliran *turbulent* dirumuskan pada persamaan 2.9.

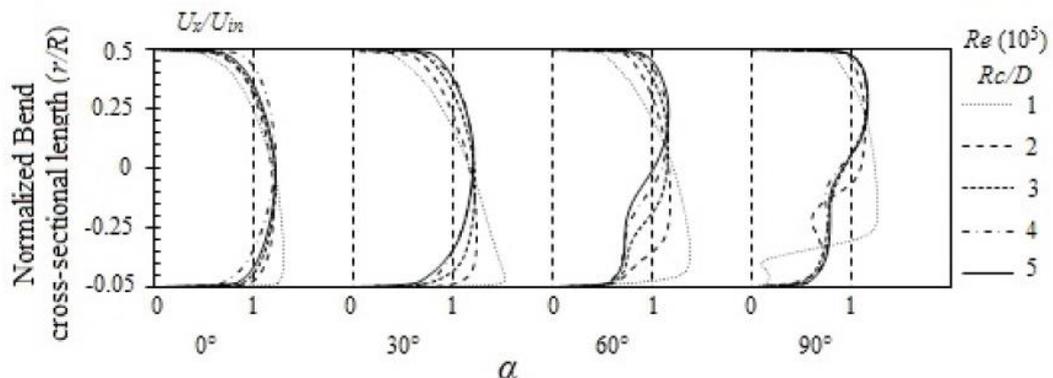
$$k_{in} = 1.5(I*U_{in})^2 \quad (2.9)$$

Dimana,  $I$  merupakan intensitas turbulensi. Sedangkan *specific dissipation* dirumuskan pada persamaan 2.10. Serta untuk menghitung intensitas turbulen dirumuskan pada persamaan 2.11.

$$\epsilon_{in} = (C_{\mu} k^{3/2})/0.3D \quad (2.10)$$

$$I = 0.16(Re)^{-0.125} \quad (2.11)$$

Wall dianggap tidak *slip*, sedangkan pada *outlet gradient* alirannya dianggap nol. Gambar 2.19 menunjukkan profil kecepatan pada sudut  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$  dengan variasi *curvature ratio* ( $R_c/D = 1 - 5$ ).



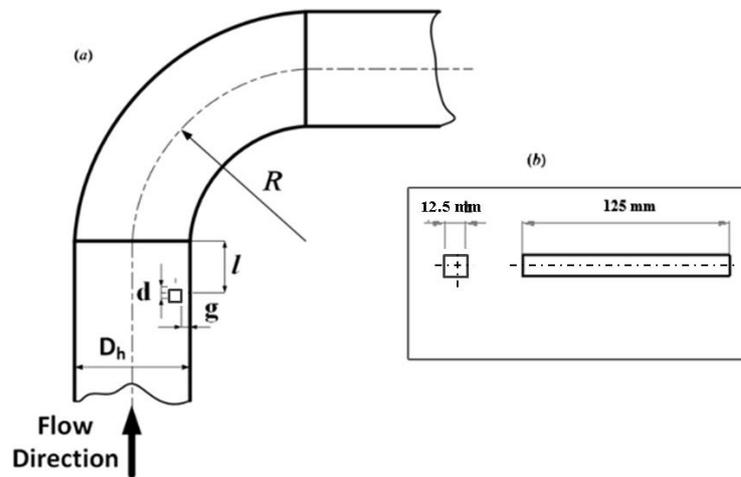
Gambar 2.19 Velocity profile pada sudut  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$  dengan variasi *curvature ratio* ( $R_c/D = 1 - 5$ ) (Dutta dkk, 2015)

Hasil penelitian menunjukkan pada outlet *elbow* ( $\alpha = 90^\circ$ ), terdapat aliran balik sebagai akibat dari *adverse pressure gradient* pada *outlet elbow*. Hal itu dikarenakan 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.

Sedangkan nilai  $Re$  yang semakin tinggi, maka pengaruh kelengkungan akan menurun. Kecenderungan separasi aliran akan meningkat untuk lengkung dengan *curvature ratio* yang rendah serta kemampuan melawan *unsteady* dan

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

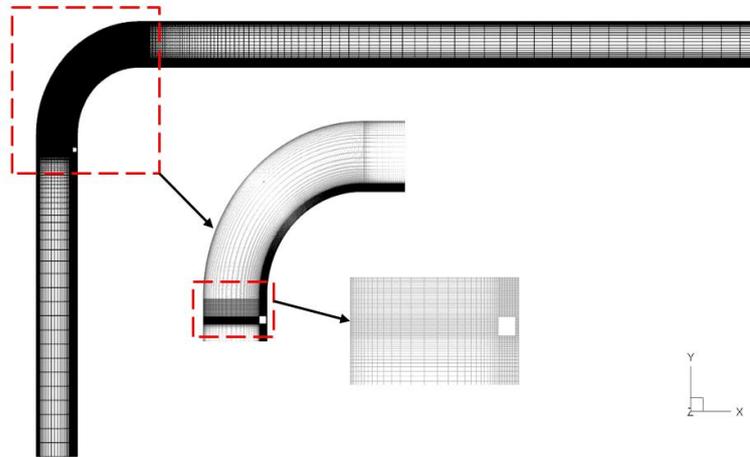
Bimantoro (2017) melakukan penelitian secara numerik 3D untuk menganalisa karakteristik aliran di dalam saluran udara berpenampang bujur sangkar dengan variasi penambahan *Inlet Disturbance Body (IDB)* berupa *square cylinder* pada  $d/D_h = 0.64$ , *elbow*  $90^\circ$  dengan  $R/D_h = 2$ . Gambar 2.20 menunjukkan gambar detail posisi penempatan bodi silinder pengganggu.



Gambar 2.20 Gambar detail posisi penempatan bodi pengganggu.

(Bimantoro, 2017)

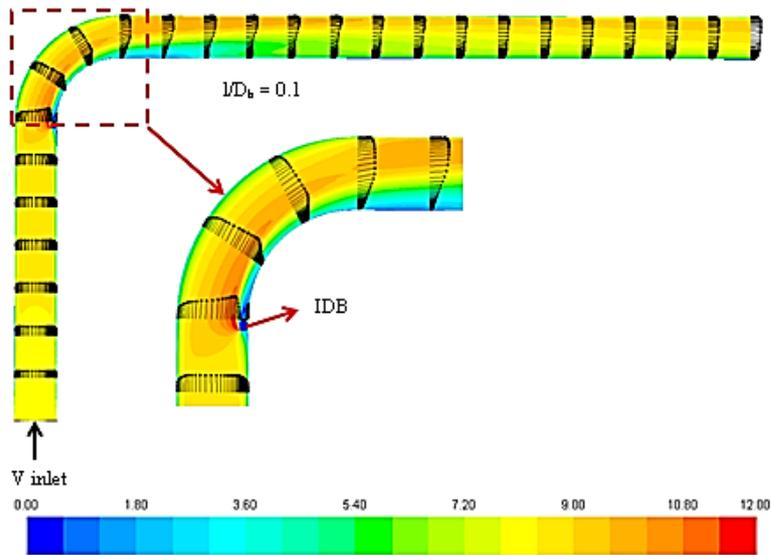
Model turbulensi yang digunakan dalam penelitian adalah *k-ε standard* pada  $Re$   $1,59 \times 10^4$ ;  $6,37 \times 10^4$  dan  $13,5 \times 10^4$ . *Meshing* volume yang digunakan tipe *hexahedral-map* seperti ditunjukkan gambar 2.21.



Gambar 2.21 Meshing *hexahedral-map* di sekitar *IDB* dengan  $l/D_h = 0.1$

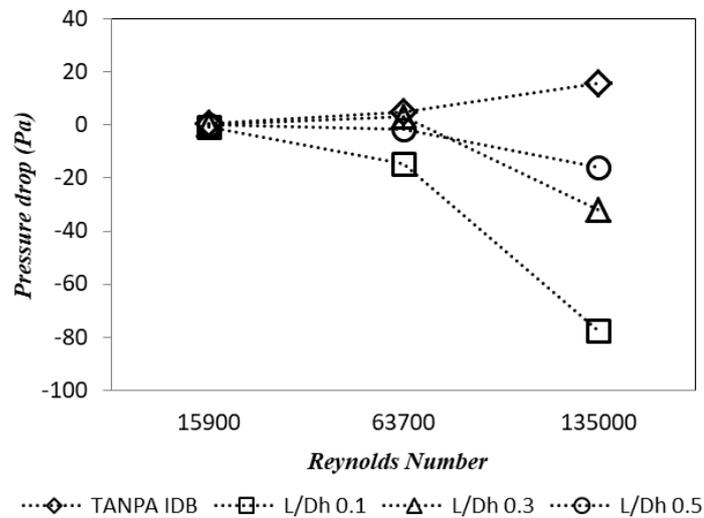
(Bimantoro, 2017)

Gambar 2.22 menunjukkan visualisasi profil kecepatan dengan penambahan *IDB* ( $l/D_h = 0.1$ ) (Bimantoro, 2017). Struktur aliran menunjukkan bahwa aliran terpecah menjadi 3 bagian, yaitu mengarah ke sisi *outer wall*, aliran mengarah pada sisi *inner wall* dan terjadi aliran balik (*backflow*). Penambahan *IDB* membuat aliran lebih kuat mengarah ke sisi *outer wall* sehingga aliran utama tidak bisa terpengaruh *adverse pressure* yang diakibatkan oleh kelengkungan *elbow*. Sedangkan aliran balik (*backflow*) akibat adanya *IDB* yang berbentuk silinder membentuk *vortex* pada daerah wake.



Gambar 2.22 Visualisasi profil kecepatan objek penelitian dengan  $IDB \ l/D_h = 0.1$   
(Bimantoro, 2017)

Gambar 2.23 menunjukkan *pressure drop* yang terjadi pada *elbow*. Variasi *Reynolds Number* yang digunakan  $1,59 \times 10^4$ ;  $6,37 \times 10^4$  dan  $13,5 \times 10^4$  dan variasi jarak inlet  $IDB \ l/D_h = 0,1$ ;  $0,3$ ; dan  $0,5$ .



Gambar 2.23 *Pressure Drop Elbow*. *Reynolds Number*  $1,59 \times 10^4$ ,  $6,37 \times 10^4$ ,  $13,5 \times 10^4$  dan jarak *Inlet Disturbance Body*  $l/D_h = 01$ ;  $0,3$ ;  $0,5$  (Bimantoro, 2017)

Gambar 2.23 menunjukkan bahwa nilai *pressure drop* tanpa *IDB* hasilnya lebih besar daripada yang menggunakan *IDB*, *pressure drop* terkecil terjadi pada

variasi  $l/D_h = 0.1$ . Dengan adanya *IDB pressure drop* menjadi turun, ini terjadi karena dengan adanya IDB kecepatan aliran pada *elbow* semakin meningkat dan momentum pada aliran pun semakin meningkat yang membuat separasi aliran mengecil sehingga *pressure drop* tereduksi.

Berdasarkan pemaparan diatas maka perlu dikaji secara mendalam berkenaan dengan perkembangan *boundary layer* aliran, perkembangan profil kecepatan, koefisien tekanan ( $C_p$ ) terhadap aliran pada *square duct elbow 90°* dengan penambahan *inlet disturbance body* berupa *diamond*  $d/D_h = 0,064$ ;  $0,08$  dan  $0,1$  pada  $d/D_h = 0.1$  berdasarkan metode numerik. Metode numerik ini akan menggunakan analisa 3 dimensi (3D) yang diharapkan dapat menggambarkan perkembangan *boundary layer* lebih baik dari pada analisa 2 dimensi (2D). Dengan begitu diharapkan akan didapatkan hasil yang lebih teliti, terutama tegangan geser pada dinding.

Tabel 2.1 menjelaskan secara singkat perbedaan antara penelitian-penelitian terdahulu dan penelitian yang akan dilakukan.

Tabel 2.1. Data perbandingan antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang dilakukan

No	Penelitian Terdahulu	
1	Cheng (1994)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eksperimen</li> <li>• <i>Curved pipe elbow 90°</i></li> </ul>
2	Mahir (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerik 2D dan 3D</li> <li>• <i>Square cylinder near plan wall</i></li> <li>• <math>Re_{wI} = 175</math>, <math>Re_{wI} = 185</math> dan <math>Re_{wI} = 250</math></li> </ul>
3	Rup & Sarna (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerik dan eksperimen</li> <li>• <i>Rectangular duct elbow 90°</i></li> <li>• <math>Re_{wI} = 4.0 \times 10^4</math></li> </ul>
4	Duta & Nandi (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eksperimen dan numerik</li> <li>• <i>Pipe elbow 90° dengan Curvature Ratio</i></li> <li>• <math>Re_{wI} = 1. \cdot 10^5</math> sampai <math>Re_{wI} = 10. \cdot 10^5</math></li> </ul>
5	Bimantoro (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerik 3 dimensi</li> <li>• <i>Rectangular duct elbow 90°</i></li> <li>• Penambahan <i>square cylinder</i> pada <i>Inlet Disturbance Body</i></li> <li>• <math>Re_{wI} = 1.59 \times 10^4</math>, <math>Re_{wI} = 6.37 \times 10^4</math> dan <math>Re_{wI} = 13.5 \times 10^4</math></li> </ul>
<b>Penelitian yang dilakukan</b>		
• Metode	:	Numerik 3 dimensi
• Model	:	<i>Rectangular duct elbow 90°</i>
• Modifikasi	:	Penambahan <i>Diamond</i> pada <i>Inlet disturbance body</i>
• $Re_{wI}$	:	$6.37 \times 10^4$ dan $13.5 \times 10^4$

## BAB III

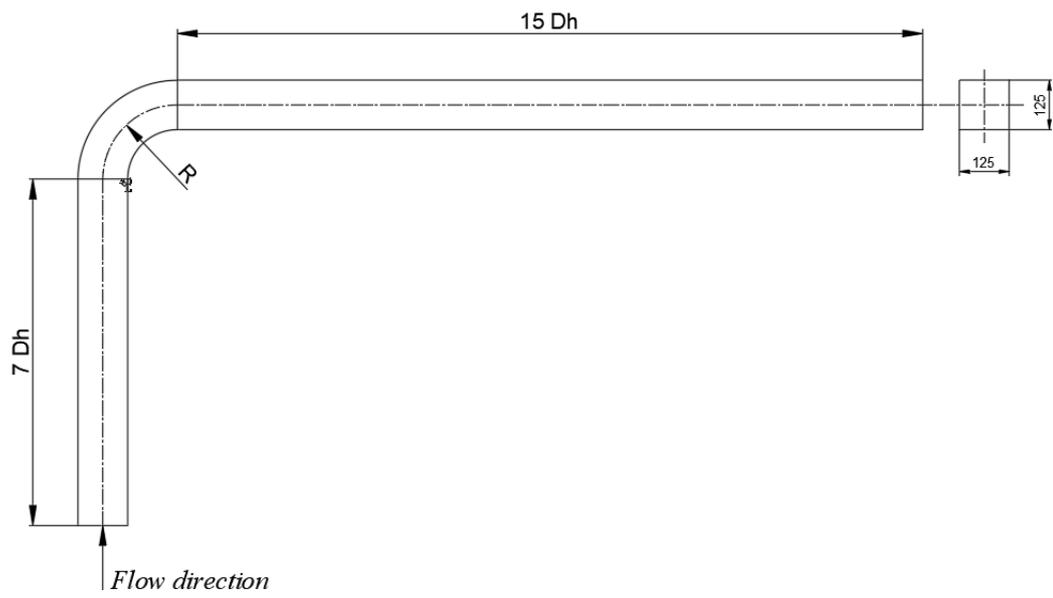
### METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai metode penelitian yang akan digunakan, yaitu metode penelitian numerik. Metode penelitian numerik menggunakan *software Fluent 6.3.26*. untuk menganalisa karakteristik aliran fluida melalui *square duct elbow 90°* dengan penambahan *diamond inlet disturbance body*.

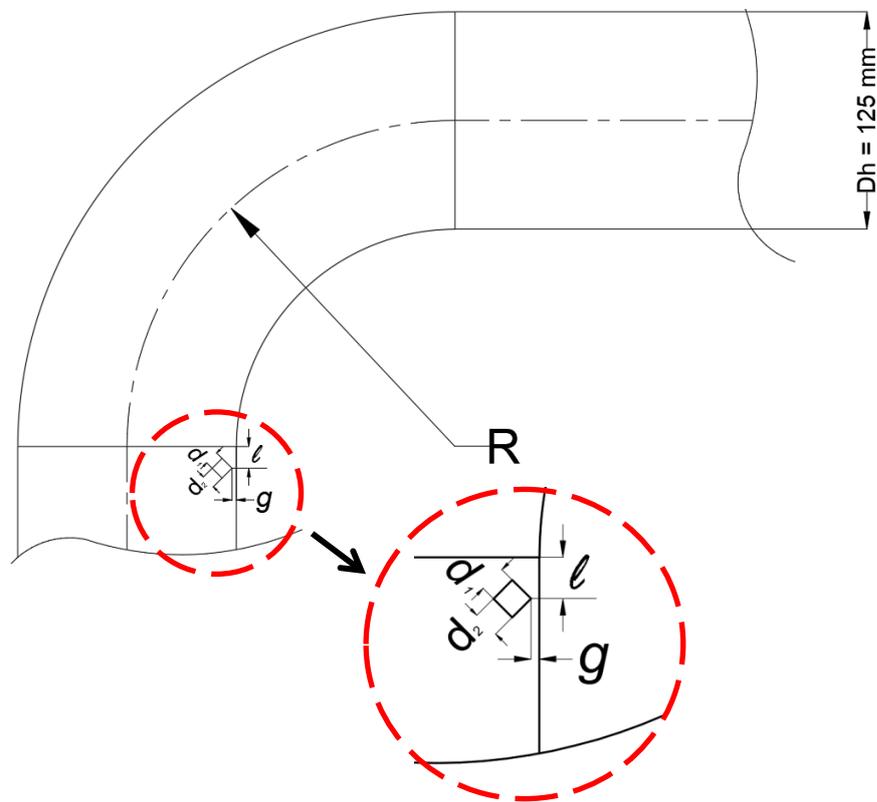
#### 3.1 Geometri *elbow*

Geometri *elbow* pada penelitian ini berupa *square duct elbow 90°* dengan dengan penambahan *diamond inlet disturbance body*. Geometri penelitian ditunjukkan seperti gambar 3.1. Gambar detail posisi penempatan *diamond inlet disturbance body* dapat ditunjukkan seperti gambar 3.2. Spesifikasi dari *test section* penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

- Panjang *upstream duct* ( $L_1$ ) :  $7 D_h$
- Panjang *downstream duct* ( $L_2$ ) :  $15 D_h$
- Sisi *square duct* :  $125 \times 125$  mm
- Jarak sumbu imajiner ( $R$ ) :  $250$  mm
- Jari-jari kelengkungan *elbow 90°* ( $R/D_h$ ) :  $2$
- *Hydraulic diameter* ( $D_h$ ) :  $125$  mm
- Ukuran *diamond disturbance body I* ( $d_1 \times d_1$ ) :  $8 \times 8$  mm
- Ukuran *diamond disturbance body II* ( $d_2 \times d_2$ ) :  $10 \times 10$  mm
- Ukuran *diamond disturbance body III* ( $d_3 \times d_3$ ) :  $12.5 \times 12.5$  mm
- Gap ( $g$ ) :  $2.5$  mm
- Jarak *diamond* dengan inlet *elbow* ( $l$ ) :  $12.5$  mm



Gambar 3.1 Geometri Penelitian



Gambar 3.2 Detail posisi penempatan *diamond inlet disturbance body*

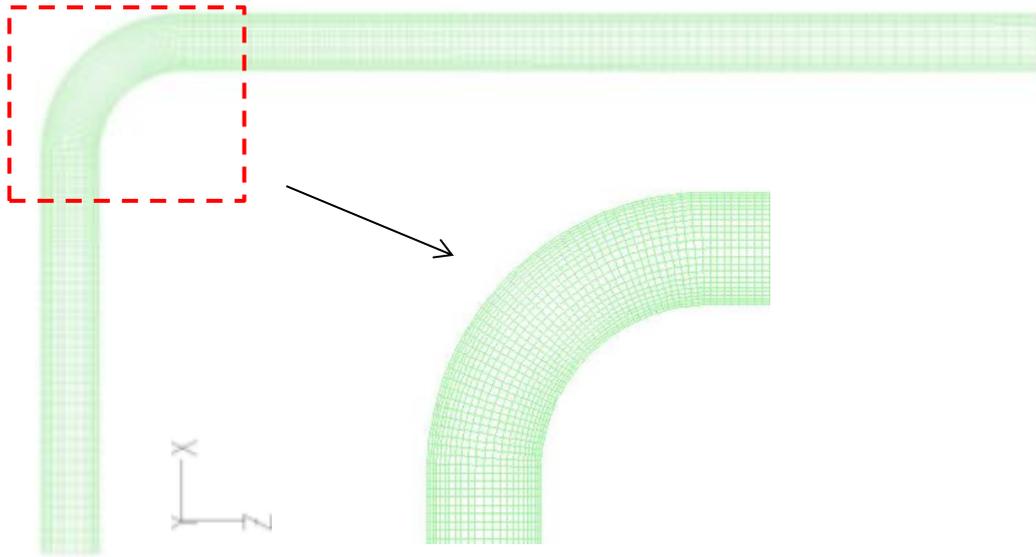
Penelitian ini menggunakan dua bilangan *Reynolds* berdasarkan pada tinggi *diffuser* inlet ( $W_1$ ) dengan *velocity inlet* 8 m/s sebesar  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$  dan 17 m/s sebesar  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$  dengan *density* ( $\rho$ ) = 1,1726 kg/m<sup>3</sup> dan *viskositas* ( $\mu$ ) =  $1,84 \times 10^{-5}$  kg/m.s.

### **3.2 Metode Numerik**

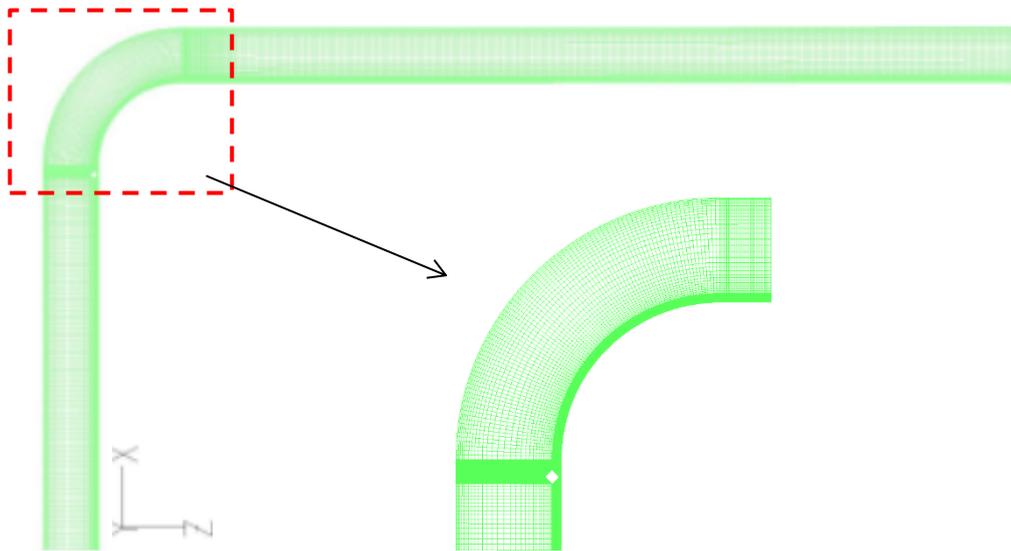
Penelitian numerik dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan *software* Fluent 6.3.26 dan *software* GAMBIT 2.4.6 untuk membuat model awal dan melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model. Prosedur yang dilakukan pada penelitian numerik adalah tahap *pre-processing* menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6 dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing* menggunakan *software* Fluent 6.3.26.

#### **3.2.1 Tahap *pre-processing* menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6**

- a) Membuat model berupa *elbow* 90° yang mengacu terhadap ukuran *test* gambar 3.1 dan gambar 3.2 dengan bentuk 3D.
- b) Membuat *meshing* untuk saluran dengan *elbow* 90° tanpa pengganggu seperti gambar 3.3 dan gambar 3.4 untuk saluran dengan *elbow* 90° penambahan *inlet disturbance body* berupa *diamond*. *Meshing* dilakukan dengan membagi volume menjadi 3 bagian, yaitu *upstream channel inlet*, *elbow*, dan *downstream channel outlet*. *Meshing* volume yang digunakan dengan tipe *hexahedral-map*. Sesuai dengan penelitian Rup dan Sarna (2011), *meshing* yang digunakan adalah dengan *grading* pada arah vertikal dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada semua dinding, baik *diverging wall* maupun *straight wall*. Hal ini dilakukan sebagai efek adanya *wall function*.



Gambar 3.3 *Meshing* pada saluran dengan *elbow* 90° tanpa pengganggu tipe *hexahedral-map* pada GAMBIT



Gambar 3.4 *Meshing* pada saluran dengan *elbow* 90° dengan *DIDB* tipe *hexahedral-map* pada GAMBIT

- c) Mendefinisikan kondisi batas yaitu penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran. Kondisi batas *inlet* adalah *velocity inlet* dan kondisi batas *outlet* adalah *outflow*.

### 3.2.2 Tahap *post-processing* menggunakan *software Fluent 6.3.26*

- a) *Grid*

Langkah awal setelah masuk pada *software* Fluent dilakukan *read* untuk data hasil *ekspor* GAMBIT. Kemudian dilakukan pengecekan *grid*. Setelah itu ditentukan skala. Pada penelitian ini menggunakan skala dalam mm.

- b) *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver* dan penentuan *turbulence model* yang digunakan. *Turbulence model* yang digunakan untuk penelitian ini adalah *k-ε standart* berdasarkan penelitian Bimantoro (2017). *Near Wall Treatment* yang digunakan menggunakan *Standart Wall Function* dengan  $y^+ = 18.81$ .

- c) *Materials*

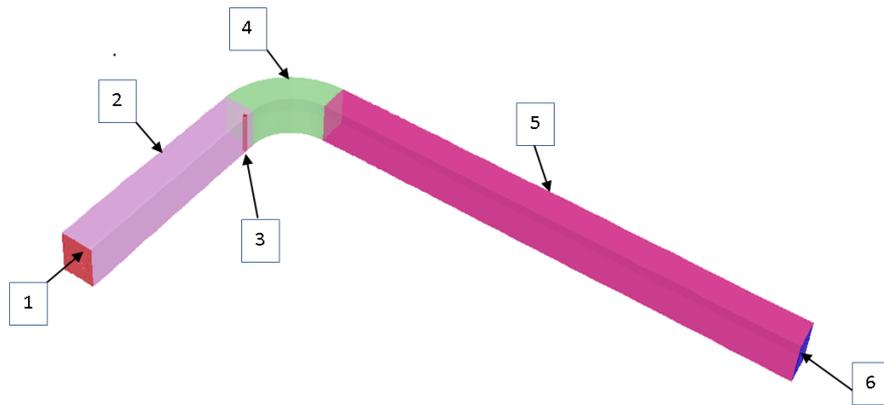
Merupakan penetapan jenis material yang akan digunakan yaitu udara dengan *density* ( $\rho$ ) = 1,1726 kg/m<sup>3</sup> dan *viskositas* ( $\mu$ ) = 1,84 x 10<sup>-5</sup> N.s/m<sup>2</sup>.

- d) *Operating Conditions*

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar 101325 pascal.

- e) *Boundary Conditions*

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji pada *inlet* maupun *outlet* seperti pada gambar 3.5. Daerah *inlet* merupakan *upstream channel inlet* dan *outlet* adalah *downstream channel outlet*. Pada daerah *inlet* diasumsikan sebagai *velocity inlet* dengan nilai kecepatan ditentukan dari penelitian Bimantoro (2017) yaitu sebesar 8 m/s yang bersesuaian dengan bilangan *Reynolds*  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$  dan kecepatan 17 m/s yang bersesuaian dengan bilangan *Reynolds*  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$  serta *turbulence intensity* 4%.



Gambar 3.5 *Boundary condition elbow 90°* pada GAMBIT

Bagian – bagian dari model *square duct* penelitian numerik :

1. *Inlet (velocity inlet)*
2. *Upstream straight duct (wall)*
3. *Diamond disturbance body* atau *IDB (wall)*
4. *Square elbow 90° (wall)*
5. *Downstream straight duct (wall), dan*
6. *Outlet (outflow)*

f) *Solution*

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

g) *Initialize*

Merupakan langkah perhitungan awal untuk memudahkan dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi. *Initialize* dihitung dari *velocity inlet*.

h) *Monitor Residual*

Merupakan tahapan untuk penyelesaian masalah, berupa proses iterasi sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria

konvergensi ditetapkan sebesar  $10^{-6}$ , artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga lebih kecil dari  $10^{-6}$ .

i) *Iterate*

Merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* yang merupakan langkah perhitungan pada Fluent 6.3.26. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai *convergence criterion* sebesar  $10^{-6}$ .

j) *Analisa Grid independency*

*Grid independency* diperlukan untuk mendapatkan ketepatan data pada langkah *post processing*. Tujuan dilakukannya *grid independency* yaitu untuk menentukan tingkat serta struktur grid terbaik dan paling efisien agar hasil pemodelan mendekati data eksperimen.

Analisa *grid independency* dilakukan dengan memvariasikan lima buah *mesh* pada *square duct* dengan kerapatan yang berbeda tanpa diberi *inlet disturbance body*. Dimana penentuan *error* didapatkan dari hasil perhitungan sebagaimana persamaan 3.1.

$$Error (\%) = \frac{\Delta P_n - \Delta P_{n-1}}{\Delta P_{n-1}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Analisa *grid independency pressure drop* pada *ducting* dengan model turbulensi *k-ε standart* berdasarkan data *pressure drop* sebagaimana pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Analisa *grid independency pressure drop* pada *ducting*

Model turbulensi ( <i>k-ε standard</i> )				
Variasi <i>mesh</i>	Jumlah <i>mesh (cells)</i>	$y^+$ max	<i>Pressure drop (Pa)</i>	<i>Error (%)</i>
Eksperimen	-	-	46.950	-
<i>Mesh A</i>	424096	28.99	44.201	5.81
<i>Mesh B</i>	829800	25.78	44.360	5.50
<i>Mesh C</i>	1027608	19.543	44.642	4.92
<i>Mesh D</i>	1178980	18.81	45.262	3.60
<i>Mesh E</i>	1382580	12.94	48.331	2.93

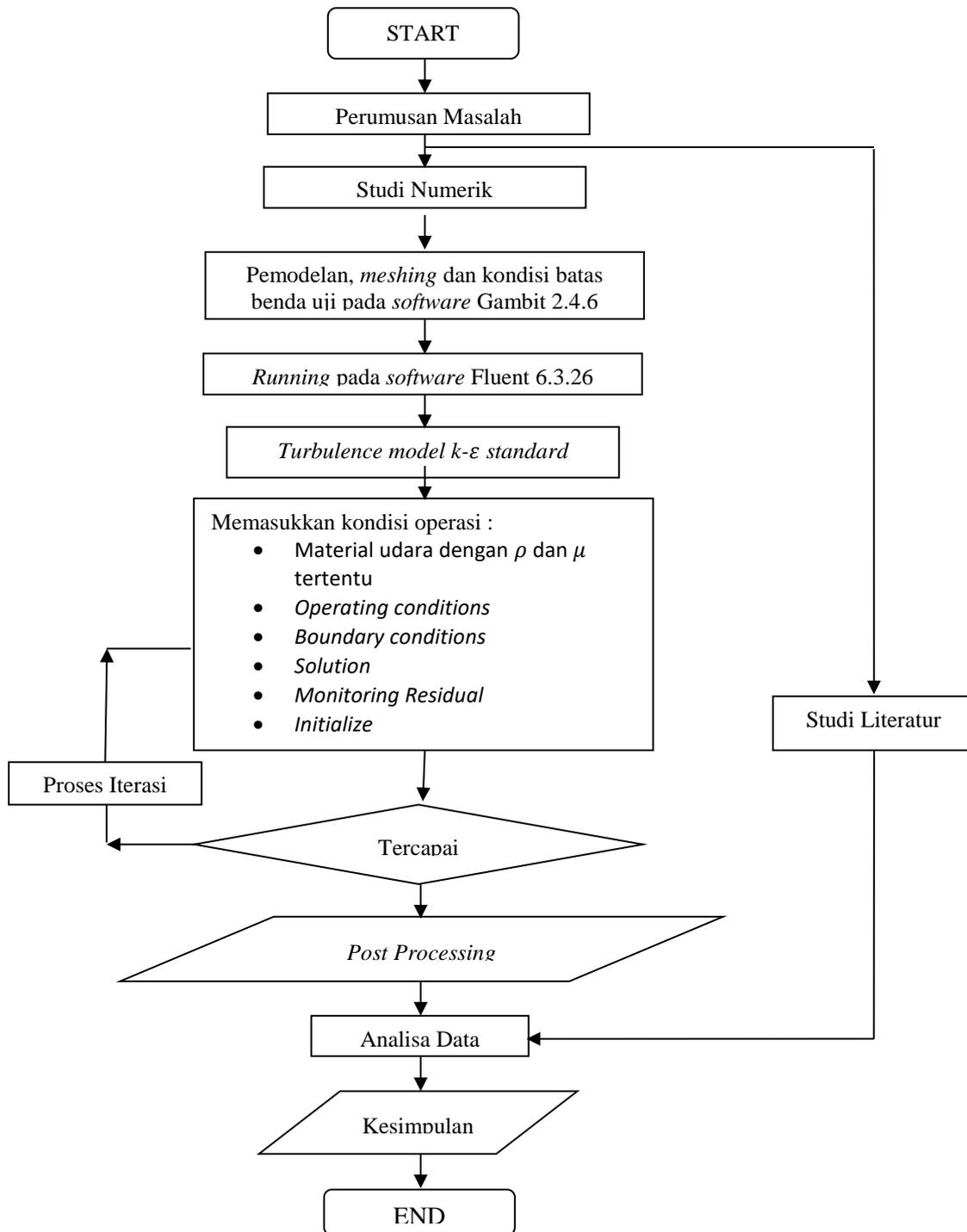
Dari hasil *grid independency* yang telah dilakukan, diperoleh data dari kelima variasi kerapatan *mesh* yaitu berupa data *pressure drop* dan jumlah *mesh cells*, data tersebut kemudian dibandingkan dengan *pressure drop* hasil dari eksperimen.

Dari model turbulensi yang digunakan yaitu *k-ε standart* didapatkan data error dari masing-masing variasi *mesh*, dimana error terkecil terdapat pada variasi *mesh D* dengan nilai *error* 3.60%, dengan demikian untuk menganalisa studi numerik ini digunakan variasi *meshing* model *D*.

k) *Post Processing*

Merupakan penampilan hasil yang telah diperoleh. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa distribusi nilai *C<sub>p</sub>* dan *pressure drop*. Data kualitatif berupa penampilan *velocity profile* pada setiap *cross section* dan penampilan kontur kecepatan.

Secara singkat prosedur penelitian numerik pada *elbow 90°* dengan penambahan *inlet disturbance body* berupa *diamond* ini ditunjukkan pada *flowchart* berikut (gambar 3.7).



Gambar 3.7 *Flowchart* penelitian *elbow 90° dengan diamond inlet disturbance body*

*~ halaman ini sengaja dikosongkan ~*

## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang analisa dan pembahasan dari hasil pengolahan data numerik dalam bentuk data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif dipresentasikan dalam bentuk grafik sedangkan data kualitatif merupakan hasil dari visualisasi aliran seperti kontur kecepatan, vektor kecepatan, kontur tekanan dan *pathline* aliran. Penelitian numerik dilakukan dengan bantuan *software fluent* 6.3.26 dengan menggunakan *turbulence model k-ε standard* sesuai penelitian Bimantoro (2017).

Penelitian dilakukan pada ducting dengan variasi *IDB* ( $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ ) dengan dua bilangan *Reynolds* sebesar 8 m/s yang bersesuaian dengan bilangan *Reynolds*  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$  dan kecepatan 17 m/s yang bersesuaian dengan bilangan *Reynolds*  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ . Dua harga bilangan *Reynolds* pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan karakteristik aliran fluida di dalam *rectangular elbow 90°* dengan penambahan *diamond inlet disturbance body* pada *inner wall upstream duct*. Perbedaan karakteristik antara  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$  dan  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$  tersebut kemudian dianalisa dan dibandingkan di dalam pembahasan. Data-data yang dianalisa meliputi:

1. Profil kecepatan,
2. Distribusi nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ),
3. *Pressure drop* antara *outlet duct* dan *inlet duct*
4. Visualisasi kontur kecepatan,
5. Visualisasi *pathline* dan vektor kecepatan aliran.

#### 4.1 Distribusi Profil Kecepatan

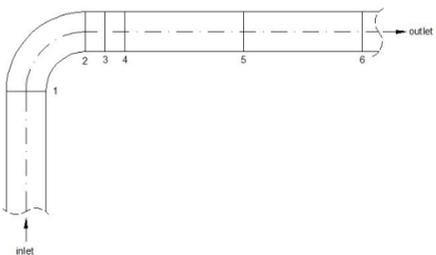
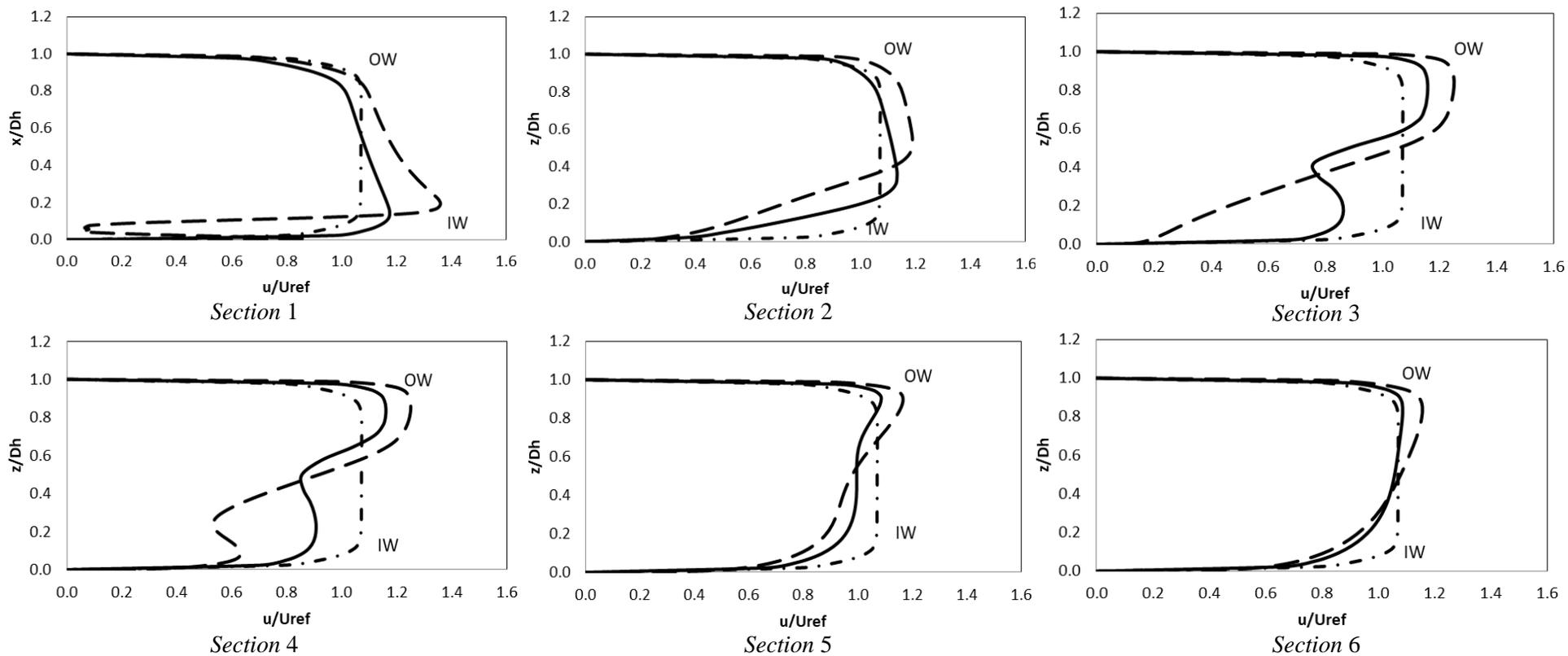
Profil kecepatan fluida pada ducting dipengaruhi oleh radius kelengkungan *elbow 90°* serta variasi geometri *DIDB* pada jarak  $0.1 D_h$ , kedua faktor tersebut membuat profil kecepatan pada setiap *cross section*-nya berubah kemudian akan diamati bagaimana perkembangan aliran didalam *ducting* tersebut. 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 *maksimum* pada *section* yang sama. Berikut ini akan dibahas perkembangan *velocity profile* setiap *section*. Posisi pengukuran setiap *section* dijelaskan sebagai berikut :

- *Section 1* : *inlet elbow*, posisi  $x/D_h = 7$ ,  $x/D_h = 7$
- *Section 2* : *outlet elbow*, posisi  $z/D_h = 2.5$ ,  $z/D_h = 2.5$ .
- *Section 3* : *outlet straight duct*, posisi  $z/D_h = 3.5$ ,  $z/D_h = 3.5$  atau 125 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 4* : *outlet straight duct*, posisi  $z/D_h = 4.5$ ,  $z/D_h = 4.5$  atau 250 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 5* : *outlet straight duct*, posisi  $z/D_h = 10.5$ ,  $z/D_h = 10.5$  atau 1000 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 6* : *outlet straight duct*, posisi  $z/D_h = 16.5$ ,  $z/D_h = 16.5$  atau 1750 mm dari *outlet elbow*.

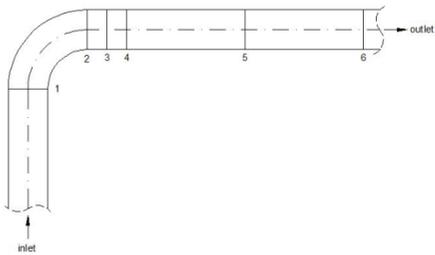
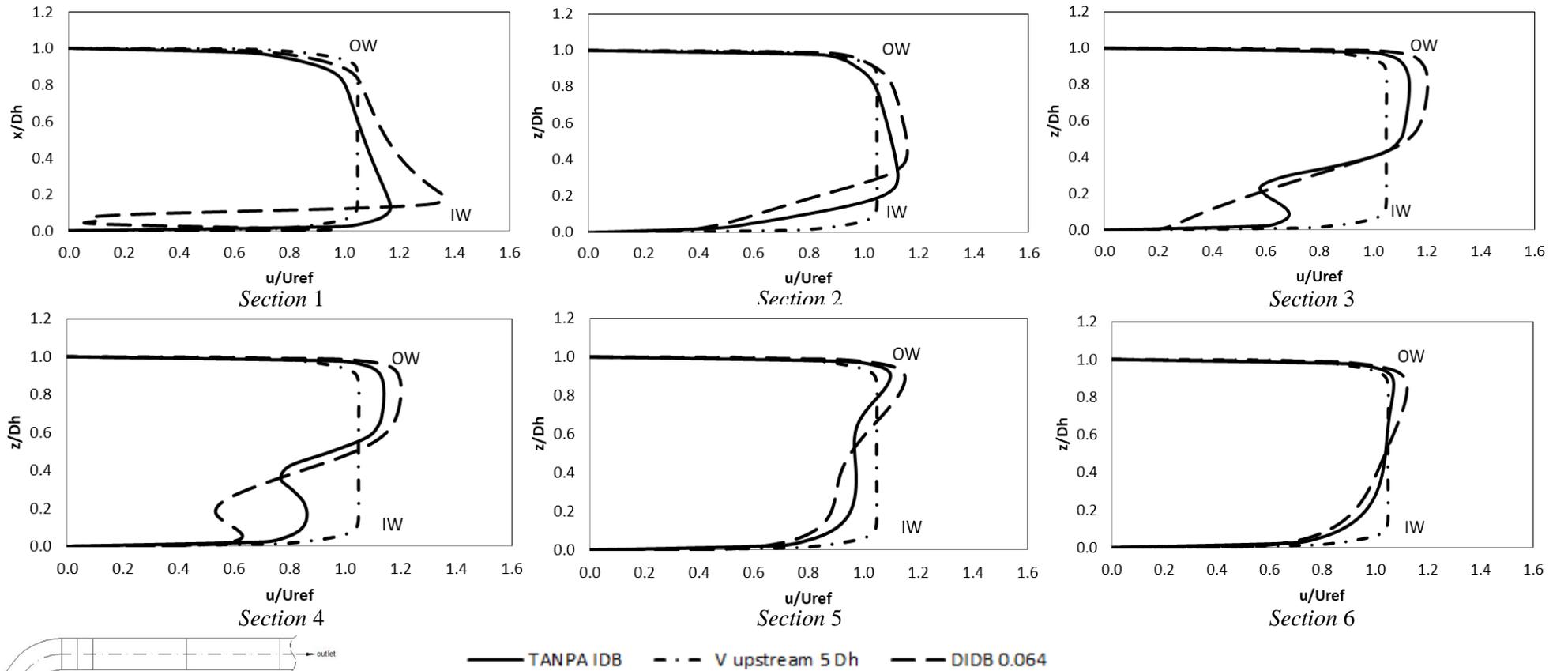
Distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow* 90° dengan *DIDB* 0.064 dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2. Distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow* 90° dengan *DIDB* 0.08 dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4, sedangkan untuk *elbow* 90° dengan *DIDB* 0.1 dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6.

Gambar 4.1 menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow* 90° dengan *DIDB* 0.064 pada  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ . Sedangkan gambar 4.2 menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow* 90° dengan *DIDB* 0.064 pada  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .



— TANPA IDB    - - - V upstream 5 Dh    - · - DIDB 0.064

Gambar 4.1. Profil kecepatan tanpa dan dengan  $DIDB$  0.064 pada  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$



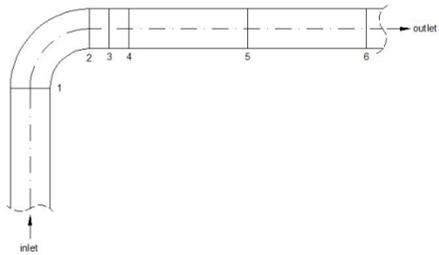
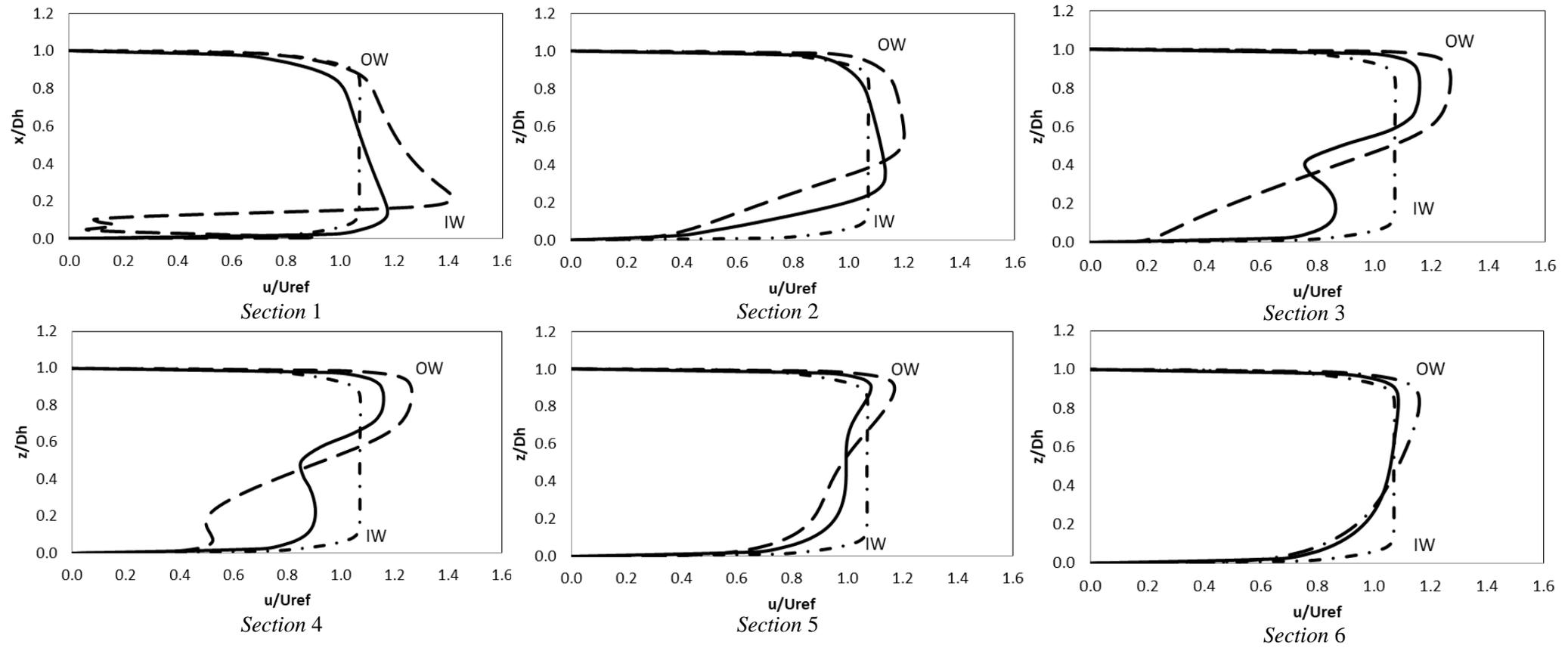
Gambar 4.2. Profil kecepatan tanpa dan dengan  $DIDB$  0.064 pada  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$

Secara umum profil kecepatan aliran akibat adanya perbedaan nilai *Reynolds*  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$  dan  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$  menghasilkan distribusi tren yang relatif sama. Dan sebagai *section* acuan untuk melihat proses *recovery* aliran maka diperlukan *section upstream*  $5 D_h$ .

Pada *inlet elbow* yang melewati *ducting* tanpa *DIDB* mengalami perubahan distribusi profil kecepatan yaitu kecepatan pada *posisi inner wall* lebih besar dari sisi *outer wall* bentuk profil ini akan sama sampai sudut  $90^\circ$  atau *outlet elbow*, seperti yang terlihat pada *section* 1 dan 2, sedangkan pada *ducting* dengan penambahan *DIDB* 0.064 aliran mengalami perubahan profil kecepatan saat aliran mengenai *DIDB* aliran akan terpecah menjadi 2 bagian, yaitu aliran yang menuju sisi *outer wall* dan menuju sisi dari *inner wall*. Pada aliran yang menuju sisi *outer wall* kecepatan aliran lebih tinggi serta lebih banyak sedangkan aliran pada *inner wall* lebih sedikit hal ini dikarenakan efek dari gap antara *DIDB* dan *wall ducting* selain itu adanya *DIDB* membuat adanya aliran *backflow* disebabkan oleh *DIDB* yang berbentuk *diamond*. Ketika aliran telah melewati *elbow*  $90^\circ$  yaitu pada *section* 3 dan 4 dengan dan tanpa *DIDB*, profil kecepatan yang lebih besar ada pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall* terjadi defisit aliran namun dengan adanya *DIDB* defisit aliran yang terjadi semakin lebar.

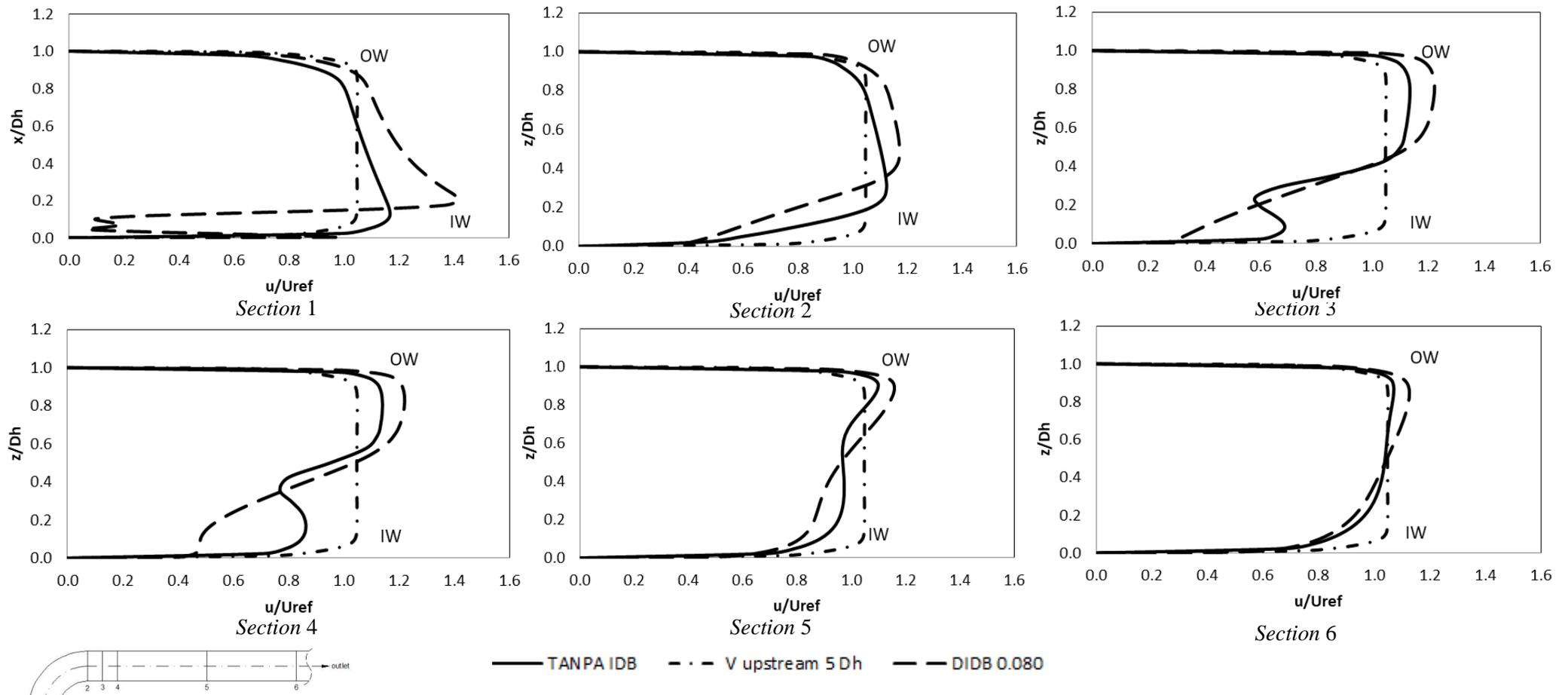
Defisit aliran mulai berpindah dari sisi *inner wall* menuju ke arah tengah hal ini diilustrasikan pada *section* 5 dan 6 sampai pada  $z/D_h = 16.5$  aliran sudah mulai *recovery* atau mendekati dengan *section upstream*  $5 D_h$ .

Gambar 4.3 menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB* 0.08 pada  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ . Sedangkan gambar 4.4 menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB* 0.08 pada  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .



— TANPA IDB    - - - V upstream 5 Dh    - · - DIDB 0.080

Gambar 4.3. Profil kecepatan tanpa dan dengan DIDB 0.080 pada  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$



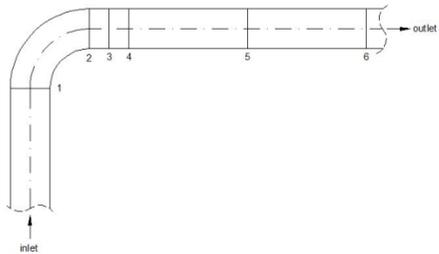
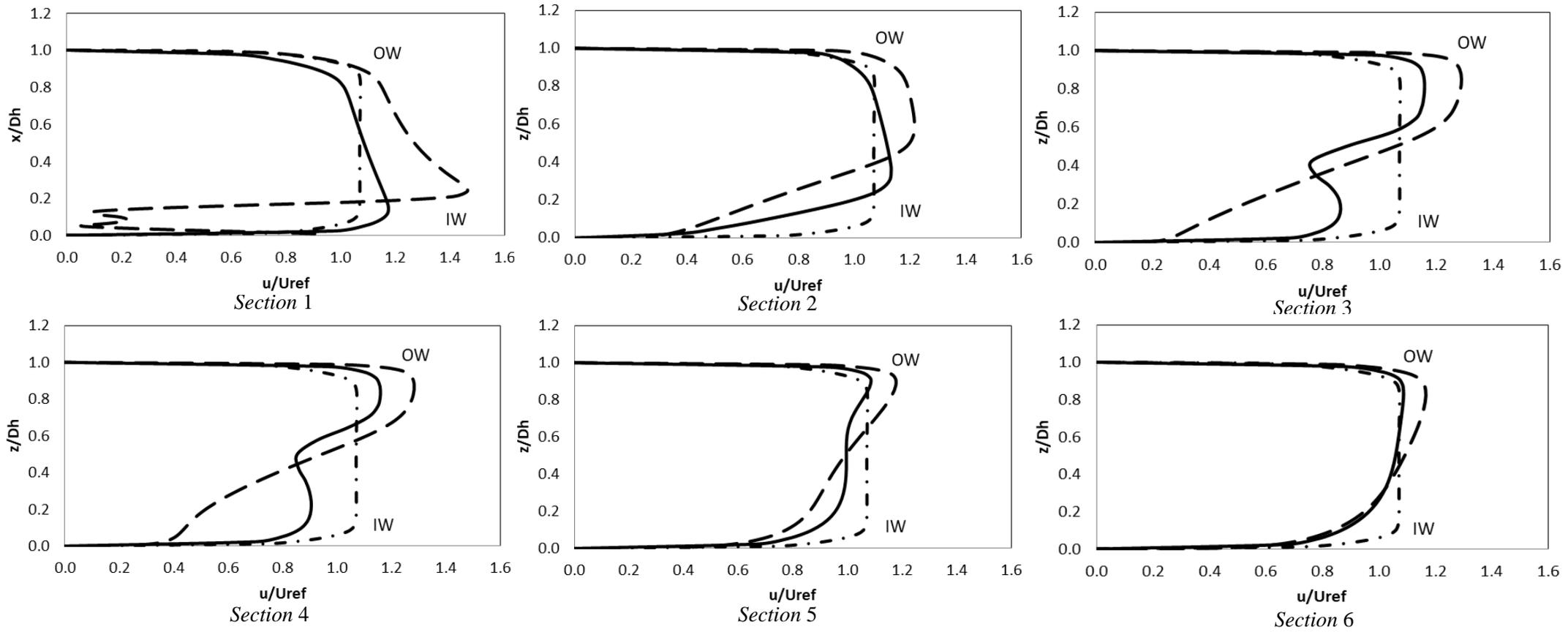
Gambar 4.4. Profil kecepatan tanpa dan dengan  $DIDB$  0.080 pada  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$

Secara umum profil kecepatan aliran akibat adanya perbedaan nilai *Reynolds*  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4 = 6.37 \times 10^4$  dan  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$  menghasilkan distribusi tren yang relatif sama. Dan sebagai *section* acuan untuk melihat proses *recovery* aliran maka diperlukan *section upstream 5 D<sub>h</sub>*.

Pada *inlet elbow* yang melewati *ducting* tanpa *DIDB* mengalami perubahan distribusi profil kecepatan yaitu kecepatan pada *posisi inner wall* lebih besar dari sisi *outer wall* bentuk profil ini akan sama sampai sudut 90° atau *outlet elbow*, seperti yang terlihat pada *section 1* dan *2*, sedangkan pada *ducting* dengan penambahan *DIDB* 0.080 aliran mengalami perubahan profil kecepatan saat aliran mengenai *DIDB* aliran akan terpecah menjadi 2 bagian, yaitu aliran yang menuju sisi *outer wall* dan menuju sisi dari *inner wall*. Pada aliran yang menuju sisi *outer wall* kecepatan aliran lebih tinggi serta lebih banyak sedangkan aliran pada *inner wall* lebih sedikit hal ini dikarenakan efek dari gap antara *DIDB* dan *wall ducting* selain itu adanya *DIDB* membuat adanya aliran *backflow* disebabkan oleh *DIDB* yang berbentuk *diamond*. Ketika aliran telah melewati *elbow 90°* yaitu pada *section 3* dan *4* dengan dan tanpa *DIDB*, profil kecepatan yang lebih besar ada pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall* terjadi defisit aliran namun dengan adanya *DIDB* defisit aliran yang terjadi semakin lebar.

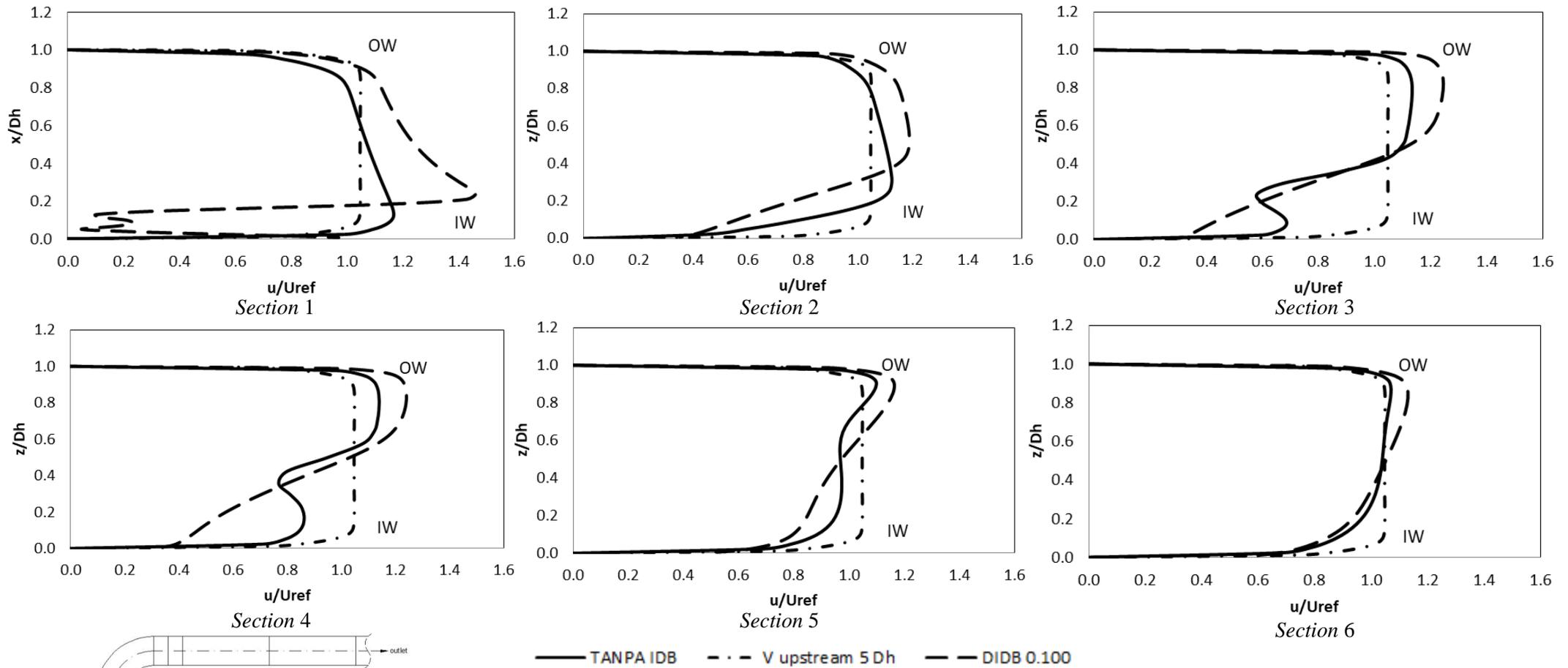
Defisit aliran mulai berpindah dari sisi *inner wall* menuju ke arah tengah hal ini diilustrasikan pada *section 5* dan *6* sampai pada  $z/D_h = 16.5$  aliran sudah mulai *recovery* atau mendekati dengan *section upstream 5 D<sub>h</sub>*.

Gambar 4.5 menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow 90°* dengan *DIDB* 0.100 pada  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ . Sedangkan gambar 4.6 menunjukkan distribusi profil kecepatan aliran didalam konstruksi *elbow 90°* dengan *DIDB* 0.100 pada  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .



— TANPA IDB    - - - V upstream 5 Dh    - · - DIDB 0.100

Gambar 4.5. Profil kecepatan tanpa dan dengan  $DIDB$  0.100 pada  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$



Gambar 4.6. Profil kecepatan tanpa dan dengan  $DIDB$  0.100 pada  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$

Secara umum profil kecepatan aliran akibat adanya perbedaan nilai *Reynolds*  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$  dan  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$  menghasilkan distribusi tren yang relatif sama. Dan sebagai *section* acuan untuk melihat proses *recovery* aliran maka diperlukan *section upstream 5 D<sub>h</sub>*.

Pada *inlet elbow* yang melewati *ducting* tanpa *DIDB* mengalami perubahan distribusi profil kecepatan yaitu kecepatan pada *posisi inner wall* lebih besar dari sisi *outer wall* bentuk profil ini akan sama sampai sudut  $90^\circ$  atau *outlet elbow*, seperti yang terlihat pada *section 1* dan *2*, sedangkan pada *ducting* dengan penambahan *DIDB* 0.080 aliran mengalami perubahan profil kecepatan saat aliran mengenai *DIDB* aliran akan terpecah menjadi 2 bagian, yaitu aliran yang menuju sisi *outer wall* dan menuju sisi dari *inner wall*. Pada aliran yang menuju sisi *outer wall* kecepatan aliran lebih tinggi serta lebih banyak sedangkan aliran pada *inner wall* lebih sedikit hal ini dikarenakan efek dari gap antara *DIDB* dan *wall ducting* selain itu adanya *DIDB* membuat adanya aliran *backflow* disebabkan oleh *DIDB* yang berbentuk *diamond*. Ketika aliran telah melewati *elbow 90<sup>0</sup>* yaitu pada *section 3* dan *4* dengan dan tanpa *DIDB*, profil kecepatan yang lebih besar ada pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall* terjadi defisit aliran namun dengan adanya *DIDB* defisit aliran yang terjadi semakin lebar.

Defisit aliran mulai berpindah dari sisi *inner wall* menuju ke arah tengah hal ini diilustrasikan pada *section 5* dan *6* sampai pada  $z/D_h = 14$  aliran sudah mulai *recovery* atau mendekati dengan *section upstream 5 D<sub>h</sub>*.

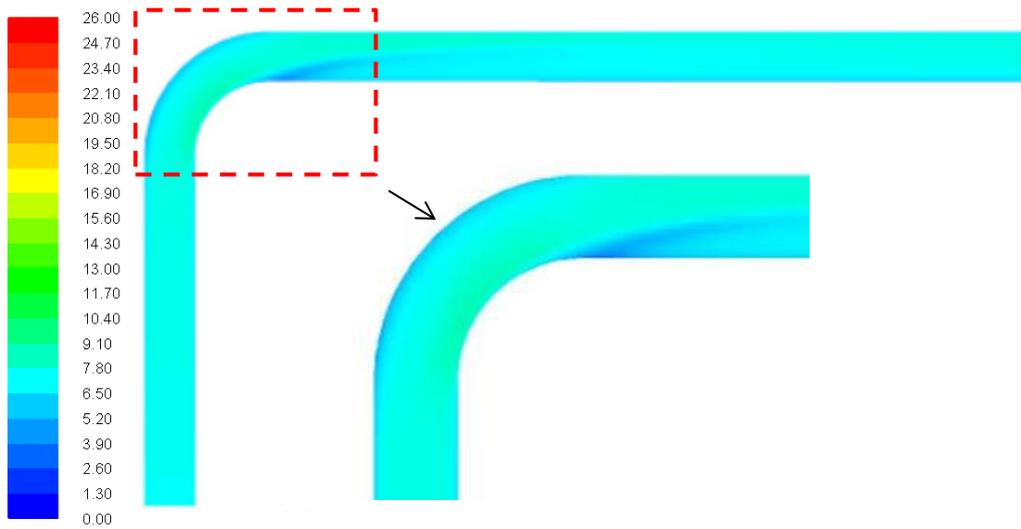
## 4.2 Visualisasi Kecepatan Aliran

Fenomena aliran di dalam *elbow 90<sup>0</sup>* tanpa dan dengan *DIDB* secara detail dapat ditunjukkan dari visualisasi numerik dengan tampilan kontur kecepatan, *path line* dan vektor kecepatan. Kontur kecepatan di dalam *elbow 90<sup>0</sup>* untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$  ditunjukkan pada gambar 4.7, dengan *DIDB* 0.064 ditunjukkan pada gambar 4.8, dengan *DIDB* 0.080 ditunjukkan pada gambar 4.9 dan dengan *DIDB* 0.100 ditunjukkan pada gambar 4.10. Kontur kecepatan di dalam *elbow 90<sup>0</sup>* untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$  ditunjukkan pada gambar 4.11, dengan *DIDB* 0.064 ditunjukkan pada gambar 4.12, dengan *DIDB* 0.080 ditunjukkan pada gambar 4.13 dan dengan *DIDB* 0.100 ditunjukkan pada gambar 4.14.

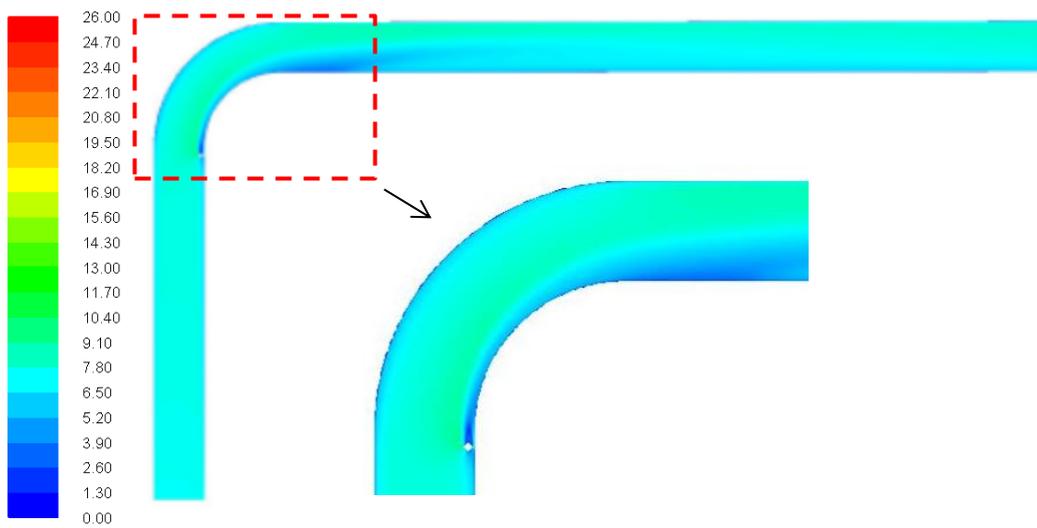
Gambar 4.7, 4.8, 4.9 dan 4.10 menunjukkan distribusi kecepatan secara keseluruhan di bagian *midspan* bidang horizontal pada *elbow*  $90^\circ$  untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ , sedangkan gambar 4.11, 4.12, 4.13 dan 4.14 pada *elbow*  $90^\circ$  untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ . *Midspan* bidang horizontal merupakan suatu bidang  $x-z$  yang terletak pada jarak  $y = 0.0625$  meter. Hasil dari kontur kecepatan tanpa dan dengan *DIDB* terlihat terjadi perbedaan yang cukup signifikan yaitu bila dilihat dari *range* kecepatan yang disajikan dalam skala warna. Dengan skala yang sama antara dua bilangan *Reynolds*, pada gambar 4.7, 4.8 4.9 dan 4.10 terdapat kontur berwarna hijau yang menunjukkan nilai kecepatan maksimum untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ . Sedangkan pada gambar 4.11, 4.12, 4.13 dan 4.14, kontur berwarna merah menunjukkan nilai kecepatan yang tinggi untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$  dan kontur berwarna biru menunjukkan nilai kecepatan yang rendah.

Gambar 4.7 menunjukkan visualisasi kontur kecepatan pada *ducting* tanpa *DIDB* pada  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$  terlihat bahwa hasil kontur menunjukkan pada daerah *elbow* kecepatan yang kuat ada pada sisi *inner* hal ini dibuktikan dengan warna biru sampai hijau. Selain itu pada  $z/D_h = 3.5$  terlihat pada sisi *inner* kecepatan mulai berkurang ditandai dengan warna biru hal ini dikarenakan adanya *energy kinetic losses* yaitu aliran yang kecepataannya berkurang akibat adanya *secondary flow*.

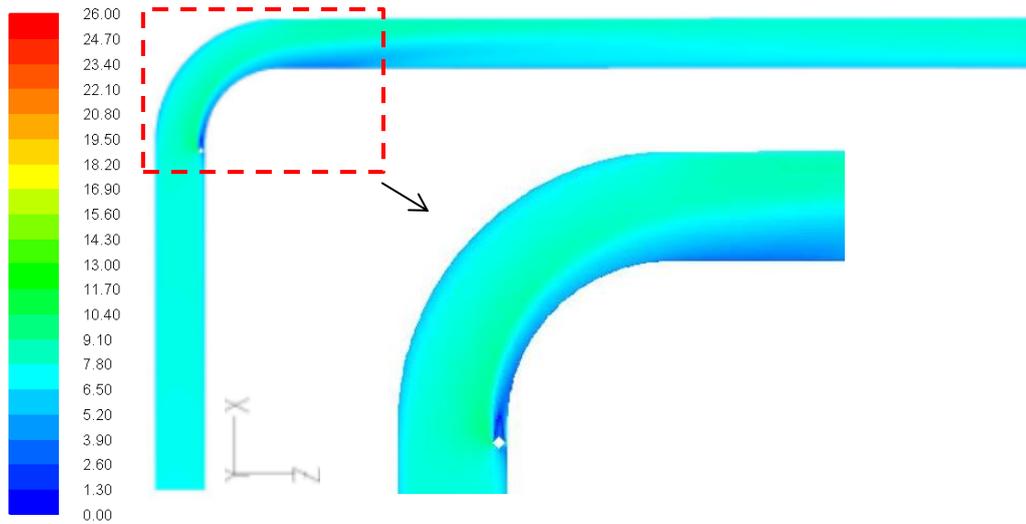
Gambar 4.8, 4.9 dan 4.10 menunjukkan dengan adanya variasi geometri *DIDB* pada  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$  hasil kontur menunjukkan pada daerah *elbow* kontur kecepatan yang kuat juga sama terjadi pada sisi *inner* hal ini dibuktikan dengan warna biru sampai hijau. Selain itu pada daerah diletaknya *DIDB* terdapat kontur kecepatan yang tinggi pula ditunjukkan dengan warna hijau pada *upper DIDB*.



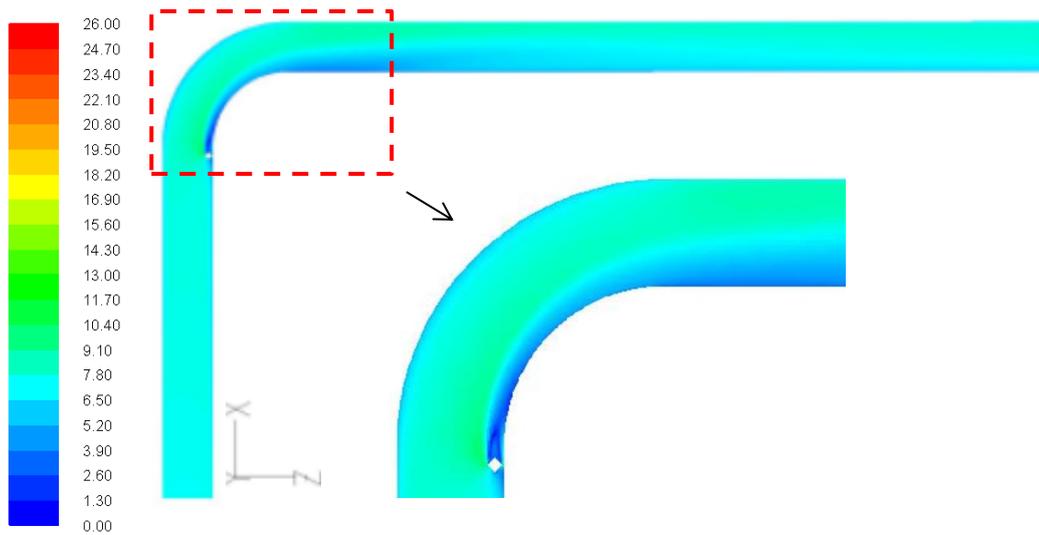
Gambar 4.7 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



Gambar 4.8 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



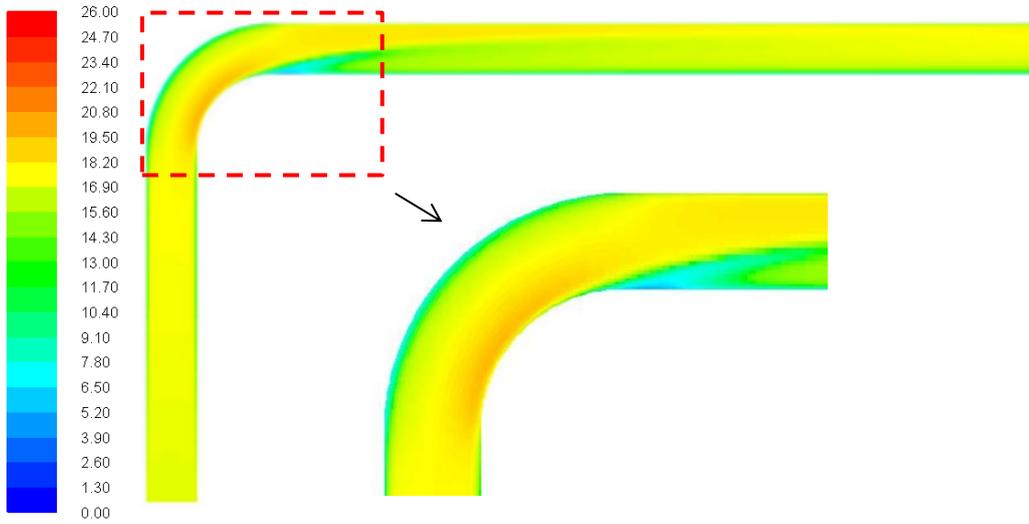
Gambar 4.9 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



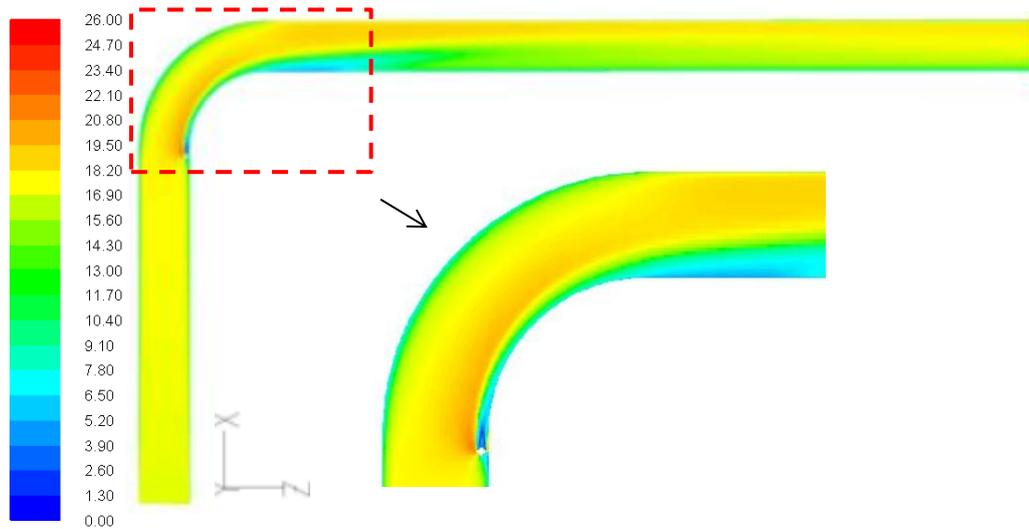
Gambar 4.10 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

Gambar 4.11 menunjukkan visualisasi kontur kecepatan pada *ducting* tanpa *DIDB* pada  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$  terlihat bahwa hasil kontur menunjukkan pada daerah *elbow* kecepatan yang kuat ada pada sisi *inner* hal ini dibuktikan dengan warna kuning sampai merah. Selain itu pada  $z/D_h = 3.5$  terlihat pada sisi *inner* kecepatan mulai berkurang ditandai dengan warna kuning hal ini dikarenakan adanya *energy kinetic losses* yaitu aliran yang kecepataannya berkurang akibat adanya *secondary flow*.

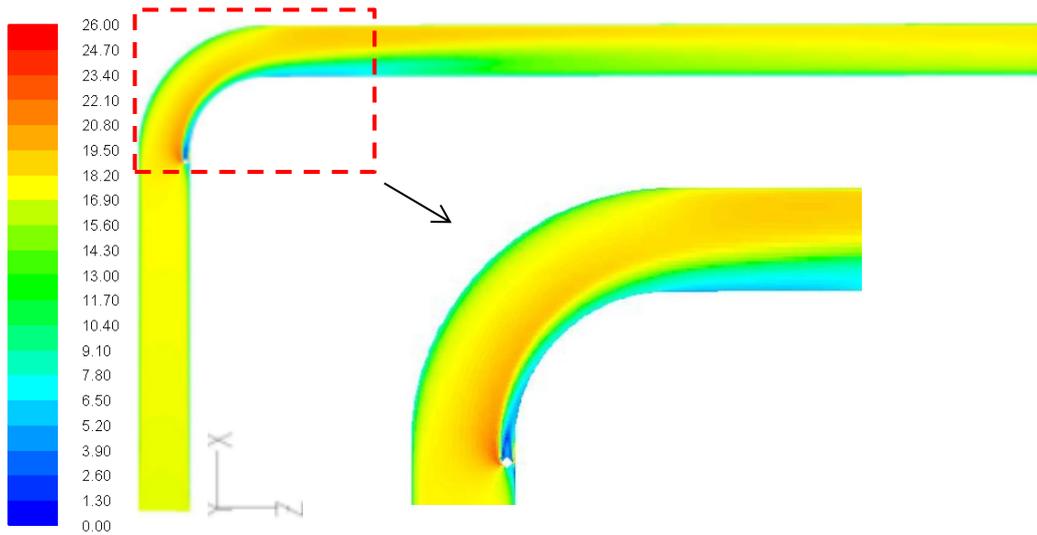
Gambar 4.12, 4.13 dan 4.14 menunjukkan dengan adanya variasi geometri *DIDB* pada  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$  hasil kontur menunjukkan pada daerah *elbow* kontur kecepatan yang kuat juga sama terjadi pada sisi *inner* hal ini dibuktikan dengan warna kuning sampai merah. Selain itu pada daerah diletaknya *DIDB* terdapat kontur kecepatan yang tinggi pula ditunjukkan dengan warna merah pada *upper DIDB*.



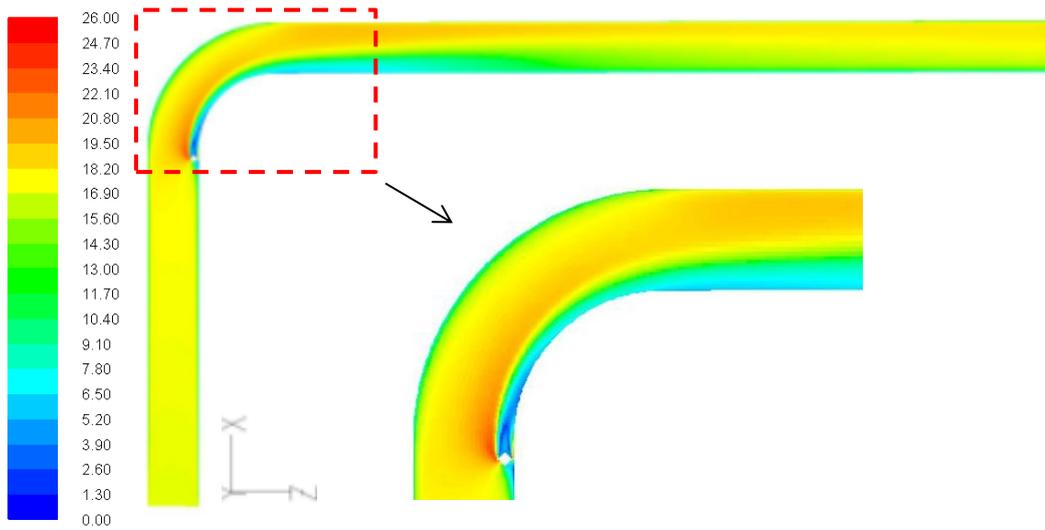
Gambar 4.11 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$



Gambar 4.12 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$



Gambar 4.13 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan  $DIDB\ d/D_h$  0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$



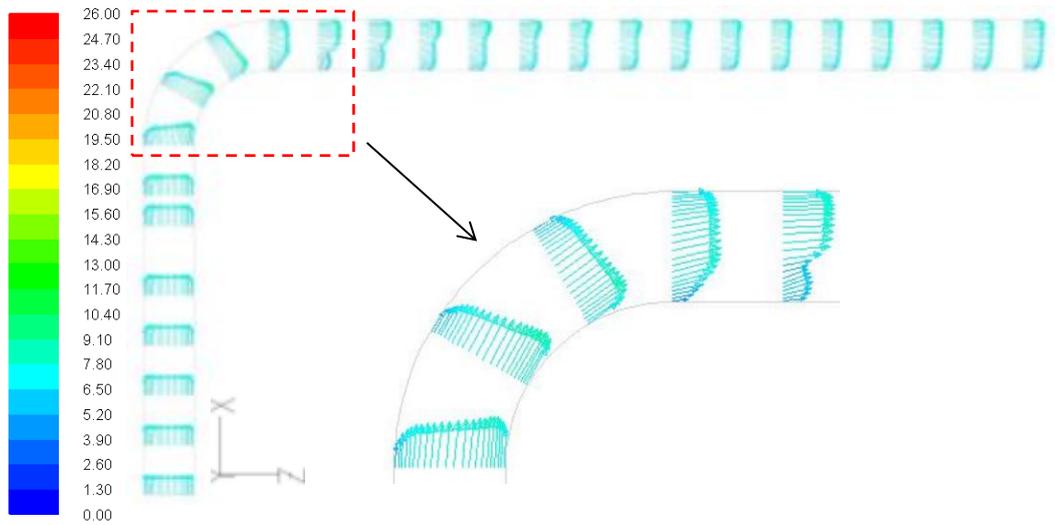
Gambar 4.14 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan  $DIDB\ d/D_h$  0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$

Data kontur kecepatan belum dapat memberikan informasi yang cukup mengenai fenomena aliran fluida yang mengalami defisit momentum di sisi *inner wall* yang mengakibatkan adanya *secondary flow*, karena data tersebut tidak memuat mengenai arah dari aliran fluida.

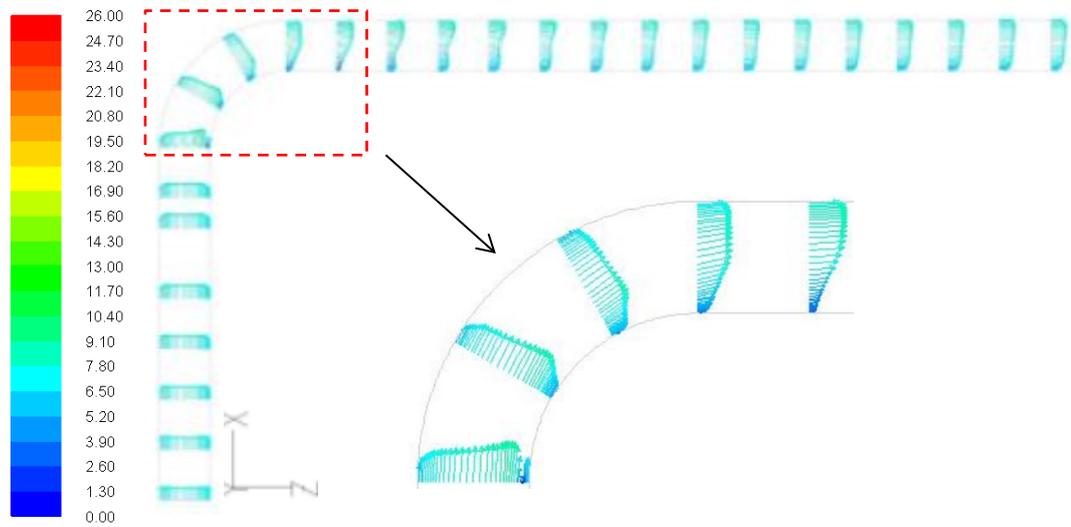
Visualisasi aliran pada *midspan* bidang horizontal dapat diperjelas dengan vektor kecepatan pada gambar 4.15, 4.16, 4.17 dan 4.18 untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$  dan gambar 4.19, 4.20, 4.21 dan 4.22 untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$ .

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa aliran udara saat memasuki ducting mulai berkembang sampai dengan  $7D_h$  pada bagian *upstream duct* tanpa *DIDB*. Selanjutnya aliran udara pada bagian *elbow 90°* terlihat aliran mengalami percepatan pada bagian *inner wall* sedangkan pada bagian *outer wall* kecepatan mulai menurun hal ini terjadi karena efek dari kelengkungan *elbow 90°*. Pada bagian *downstream duct* pada posisi  $z/D_h = 4.5$  terlihat aliran mengalami defisit pada sisi *outer wall* ini terjadi karena adanya *secondary flow* yang terjadi sehingga aliran utama terhambat dengan aliran yang berpusar pada sisi *upper* dan *lower wall*.

Gambar 4.16 menunjukkan pada *ducting* yang ditambahkan *DIDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $d/D_h = 0.064$ , aliran berkembang sampai dengan  $6D_h$ , kemudian *profile* aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *DIDB*. Dimana terlihat kecepatan tertinggi terdapat pada sisi tengah *elbow 90°* dan sisi *outer wall* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow 90°* serta penambahan *DIDB*, selain itu pada  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *DIDB* defisit yang terjadi semakin besar.

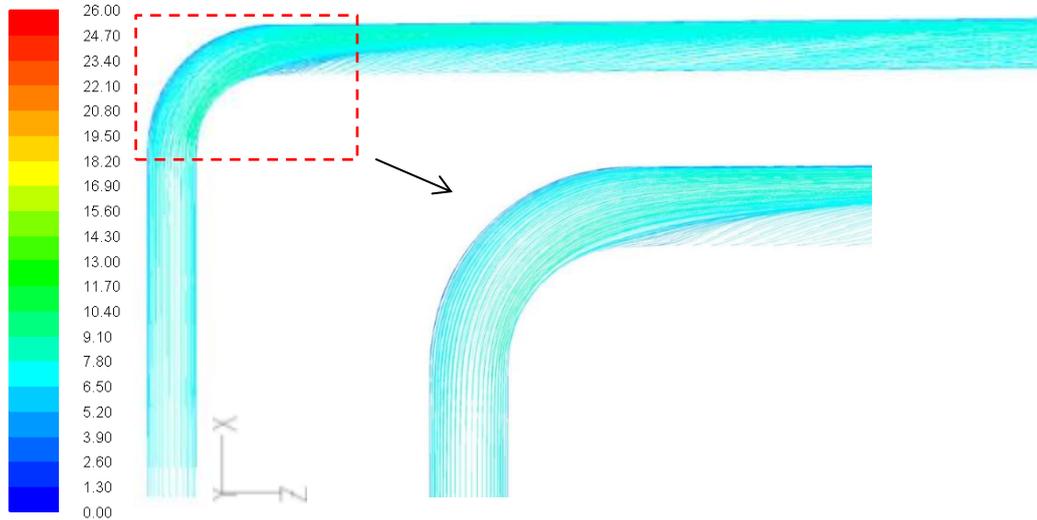


Gambar 4.15 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

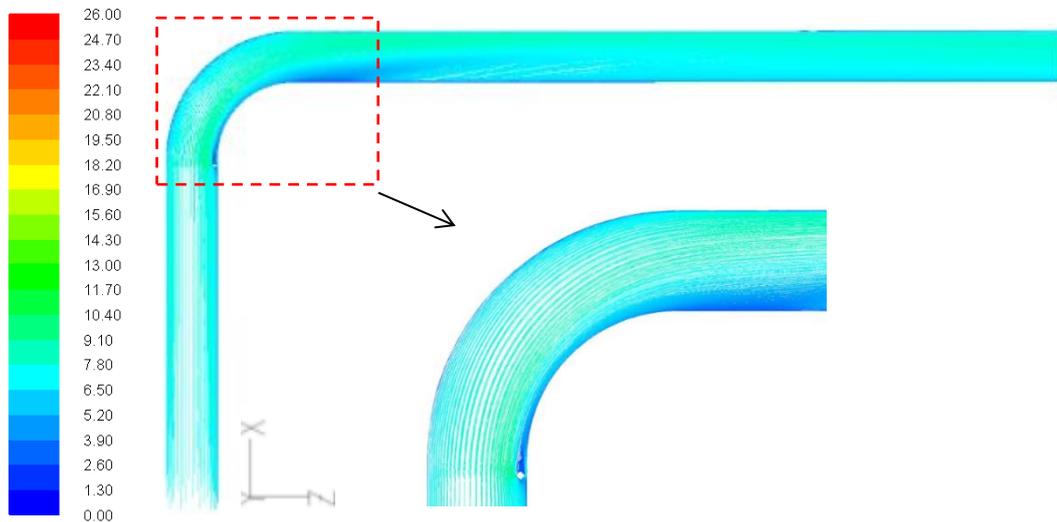


Gambar 4.16 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDO*  $d/D_h$  0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

Tampilan *pathline* dapat menjelaskan lebih lanjut mengenai fenomena aliran sekunder pada *midspan* bidang horizontal pada *elbow* 90° tanpa dan dengan *DIDB*. Gambar 4.17 dan 4.18 menunjukkan visualisasi *pathline elbow* 90° tanpa pengganggu dan dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .



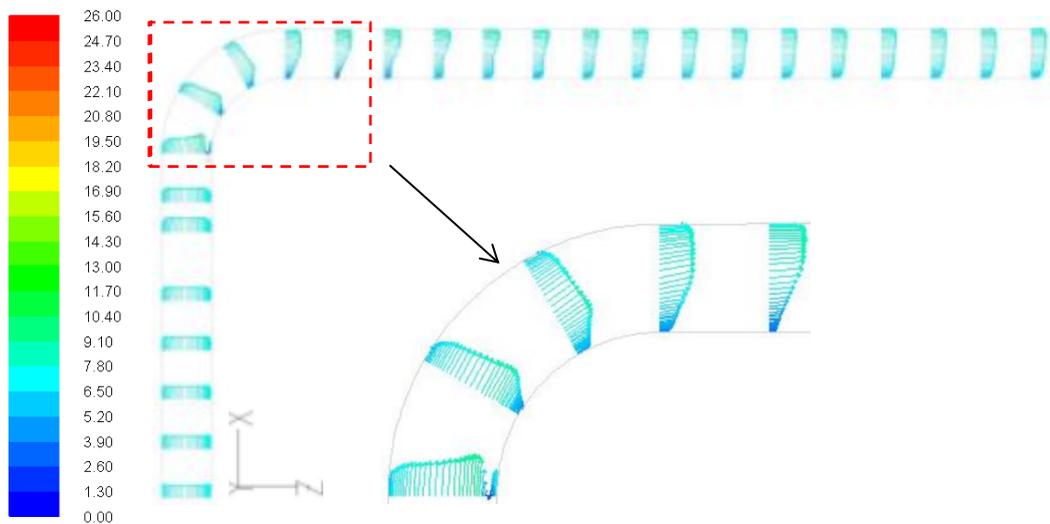
Gambar 4.17 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



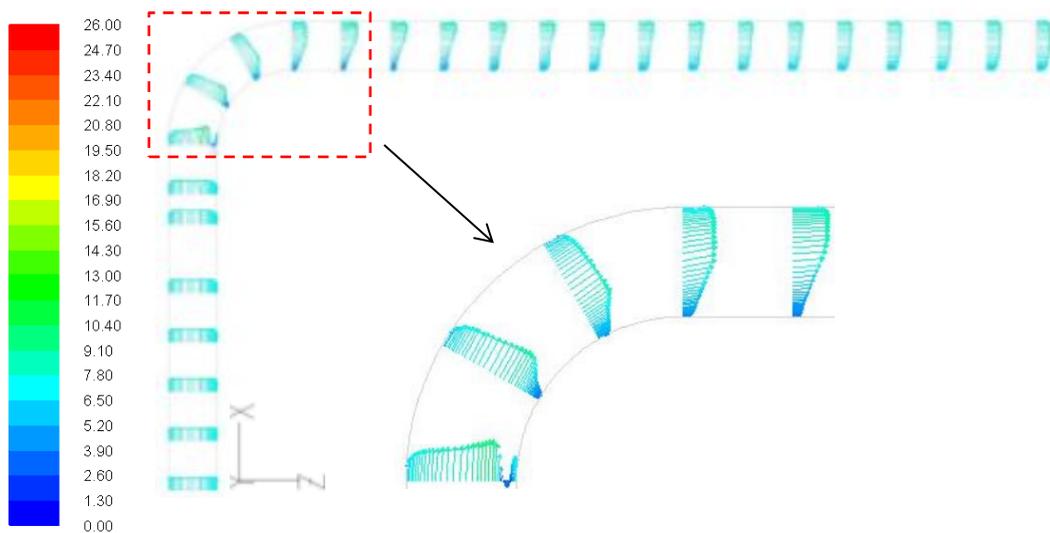
Gambar 4.18 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

Gambar 4.19 menunjukkan pada *ducting* yang ditambahkan *DIDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $d/D_h = 0.080$ . Aliran berkembang sampai dengan  $6D_h$ , kemudian *profile* aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *DIDB*. Dimana terlihat kecepatan tertinggi terdapat pada sisi tengah *elbow*  $90^0$  dan sisi *outer wall* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow*  $90^0$  serta penambahan *DIDB*, selain itu pada  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *DIDB* defisit yang terjadi semakin besar.

Gambar 4.20 menunjukkan pada *ducting* yang ditambahkan *DIDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $d/D_h = 0.100$ , aliran berkembang sampai dengan  $6D_h$ , kemudian *profile* aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *DIDB*. Dimana terlihat kecepatan tertinggi terdapat pada sisi tengah *elbow*  $90^0$  dan sisi *outer wall* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow*  $90^0$  serta penambahan *DIDB*, selain itu pada  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *DIDB* defisit yang terjadi semakin besar.

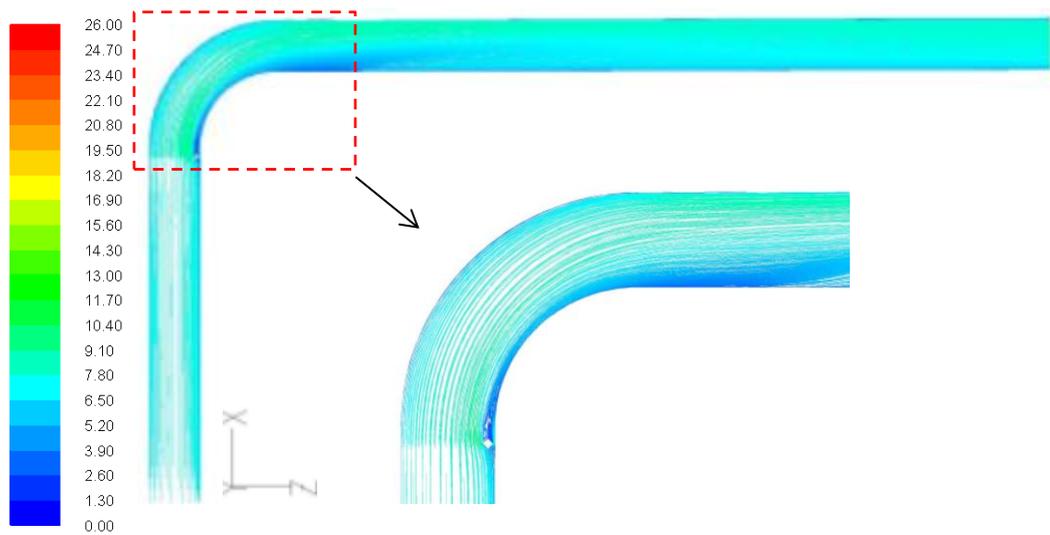


Gambar 4.19 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

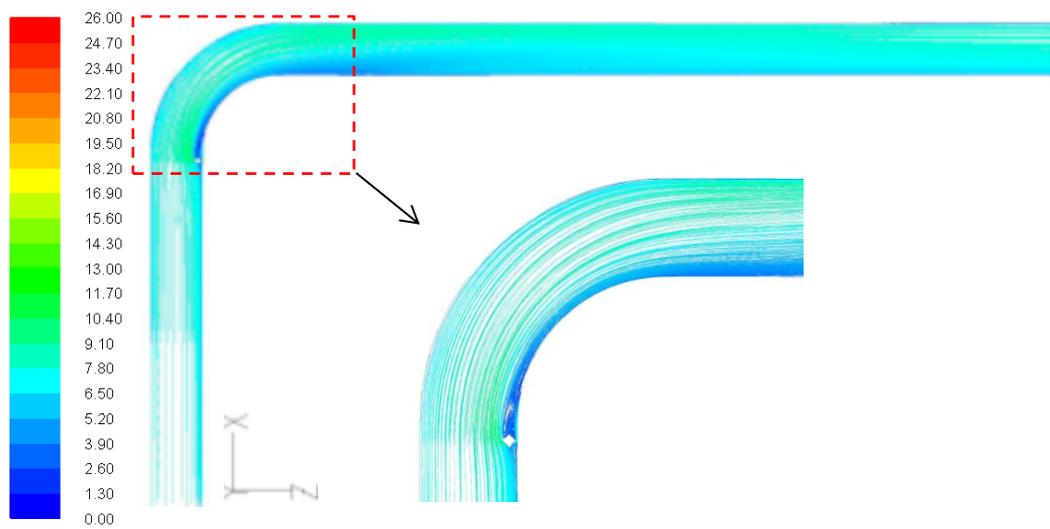


Gambar 4.20 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

Tampilan *pathline* dapat menjelaskan lebih lanjut mengenai fenomena aliran sekunder pada *midspan* bidang horizontal pada *elbow*  $90^\circ$  tanpa dan dengan *DIDB*. Gambar 4.21 dan 4.22 menunjukkan visualisasi *pathline* *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.080 dan *DIDB*  $d/D_h$  0.100 untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$ .



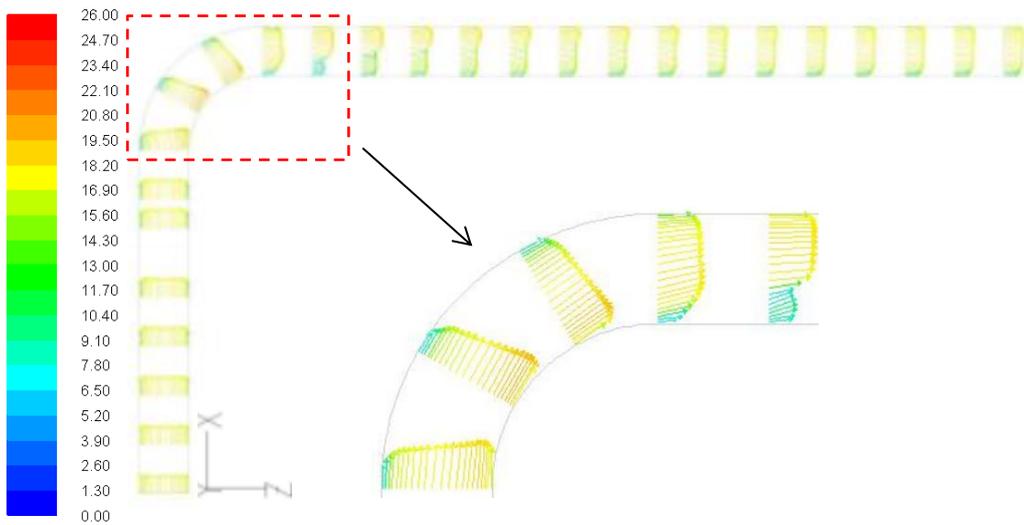
Gambar 4.21 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



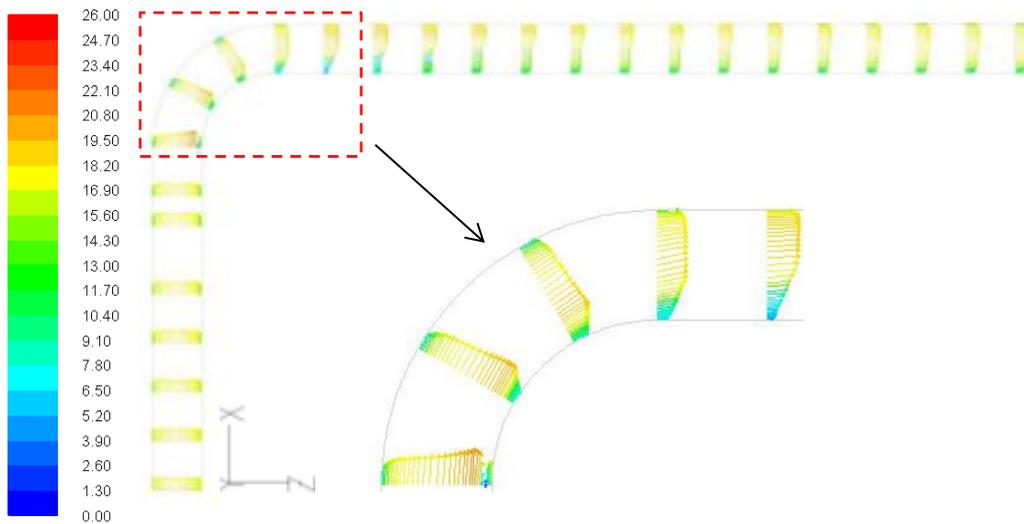
Gambar 4.22 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

Gambar 4.23 menunjukkan bahwa aliran udara saat memasuki ducting mulai berkembang sampai dengan  $7D_h$  pada bagian *upstream duct* tanpa *DIDB*. Selanjutnya aliran udara pada bagian *elbow 90°* terlihat aliran mengalami percepatan pada bagian *inner wall* sedangkan pada bagian *outer wall* kecepatan mulai menurun hal ini terjadi karena efek dari kelengkungan *elbow 90°*. Pada bagian *downstream duct* pada posisi  $z/D_h = 4.5$  atau 125 mm dari *outlet elbow 90°* terlihat aliran mengalami defisit pada sisi *outer wall* ini terjadi karena adanya *secondary flow* yang terjadi sehingga aliran utama terhambat dengan aliran yang berpusar pada sisi *upper* dan *lower wall*.

Gambar 4.24 menunjukkan pada *ducting* yang ditambahkan *DIDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $d/D_h = 0.064$ , aliran berkembang sampai dengan  $6D_h$ , kemudian *profile* aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *DIDB*. Dimana terlihat kecepatan tertinggi terdapat pada sisi tengah *elbow 90°* dan sisi *outer wall* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow 90°* serta penambahan *DIDB*, selain itu pada  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *DIDB* defisit yang terjadi semakin besar.

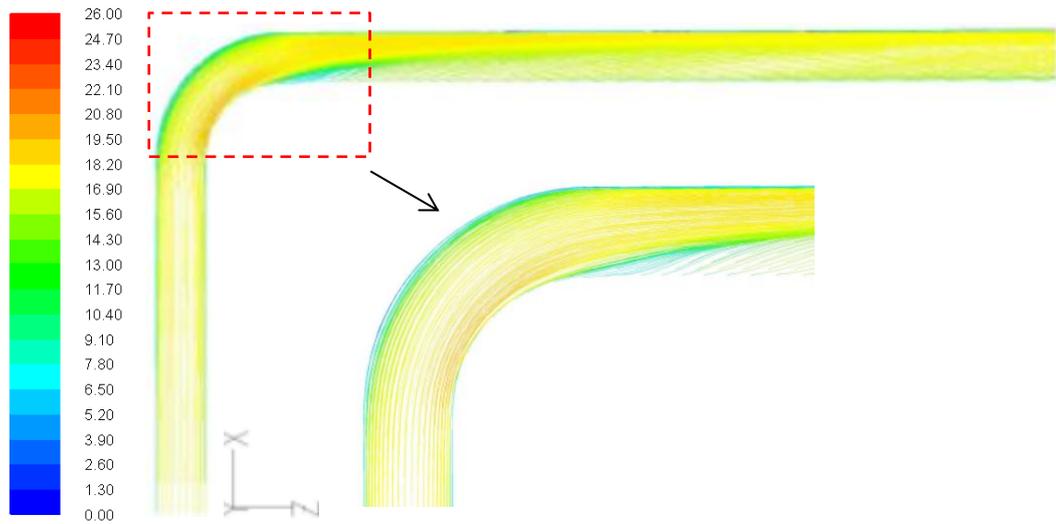


Gambar 4.23 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$

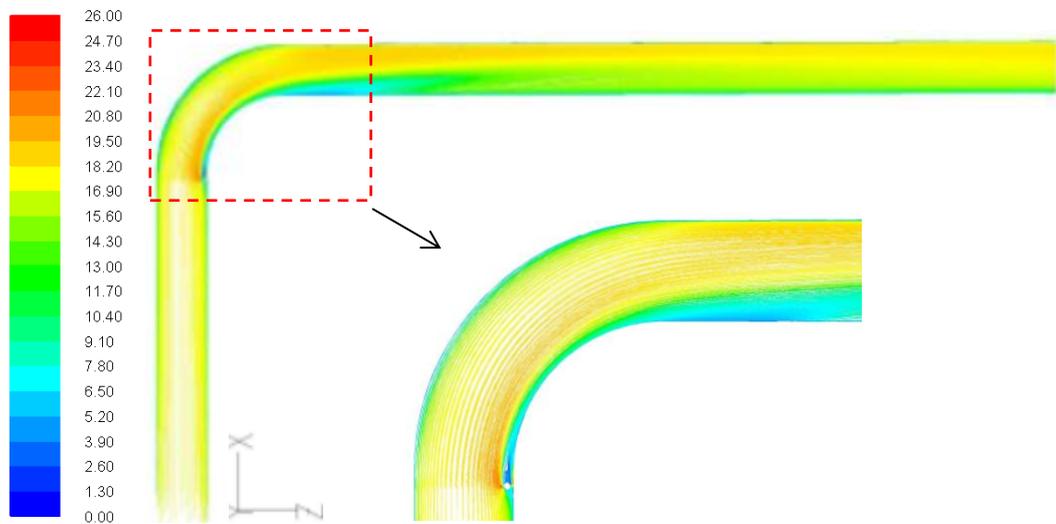


Gambar 4.24 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$

Tampilan *pathline* dapat menjelaskan lebih lanjut mengenai fenomena aliran sekunder pada *midspan* bidang horizontal pada *elbow*  $90^\circ$  tanpa dan dengan *DIDB*. Gambar 4.25 dan 4.26 menunjukkan visualisasi *pathline* *elbow*  $90^\circ$  tanpa dan dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 untuk  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .



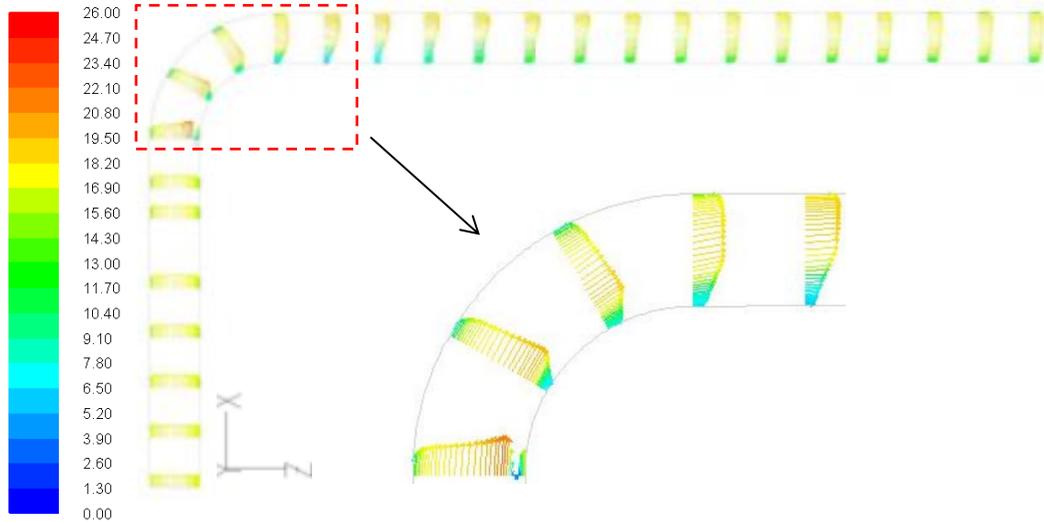
Gambar 4.25 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$



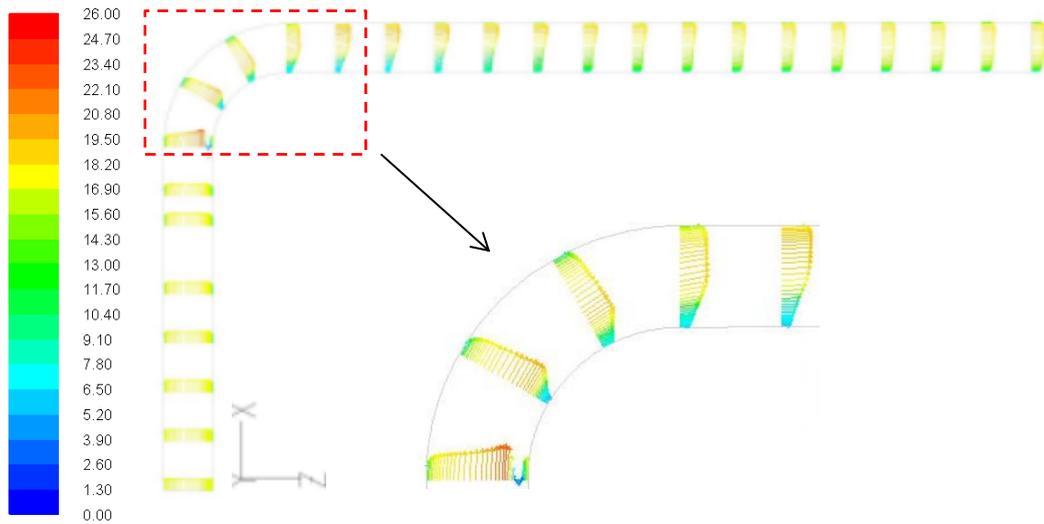
Gambar 4.26 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$

Gambar 4.27 menunjukkan pada *ducting* yang ditambahkan *DIDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $d/D_h = 0.080$ , aliran berkembang sampai dengan  $6D_h$ , kemudian *profile* aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *DIDB*. Dimana terlihat kecepatan tertinggi terdapat pada sisi tengah *elbow*  $90^0$  dan sisi *outer wall* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow*  $90^0$  serta penambahan *DIDB*, selain itu pada  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *DIDB* defisit yang terjadi semakin besar.

Gambar 4.28 menunjukkan pada *ducting* yang ditambahkan *DIDB* pada bagian *upstream duct* dengan  $d/D_h = 0.100$ , aliran berkembang sampai dengan  $6D_h$ , kemudian *profile* aliran mulai terpecah ketika aliran melewati *DIDB*. Dimana terlihat kecepatan tertinggi terdapat pada sisi tengah *elbow*  $90^0$  dan sisi *outer wall* hal ini terjadi karena efek kelengkungan dari *elbow*  $90^0$  serta penambahan *DIDB*, selain itu pada  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalami defisit aliran pada sisi *inner* yang diakibatkan oleh *secondary flow* hanya saja dengan penambahan *DIDB* defisit yang terjadi semakin besar.

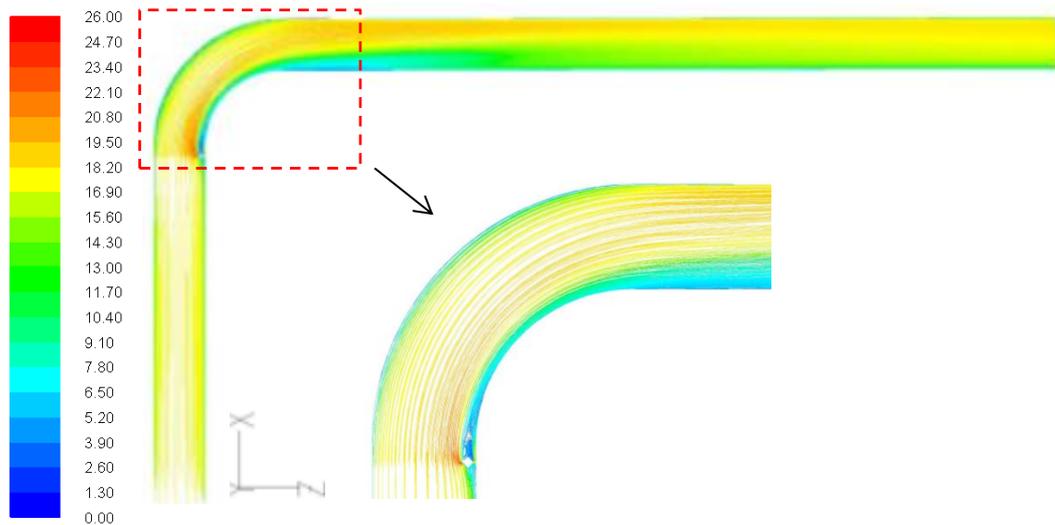


Gambar 4.27 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$

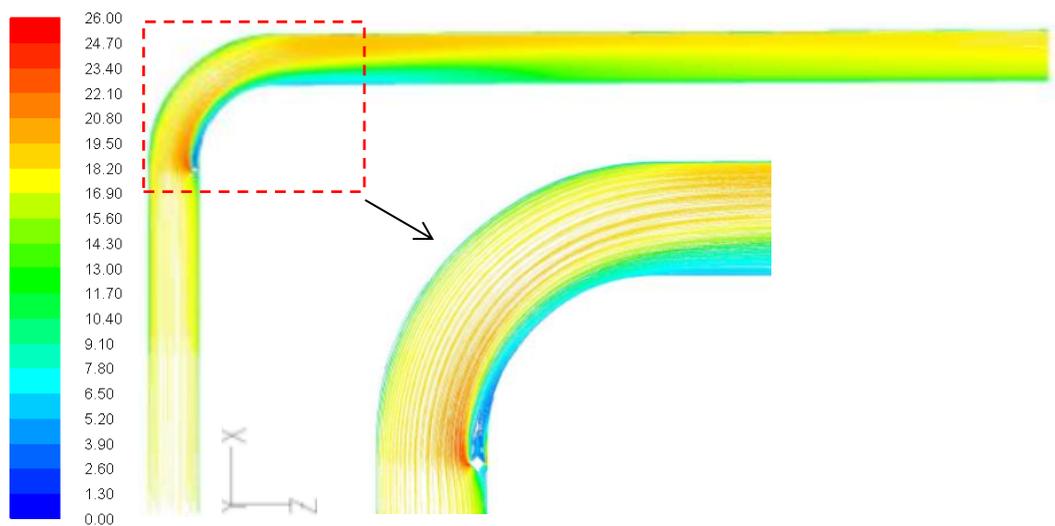


Gambar 4.28 Vektor kecepatan ( $m/s$ ) di dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$

Tampilan *pathline* dapat menjelaskan lebih lanjut mengenai fenomena aliran sekunder pada *midspan* bidang horizontal pada *elbow*  $90^\circ$  tanpa dan dengan *DIDB*. Gambar 4.29 dan 4.30 menunjukkan visualisasi *pathline* *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.080 dan *DIDB*  $d/D_h$  0.100 untuk  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$ .



Gambar 4.29 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.080 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$



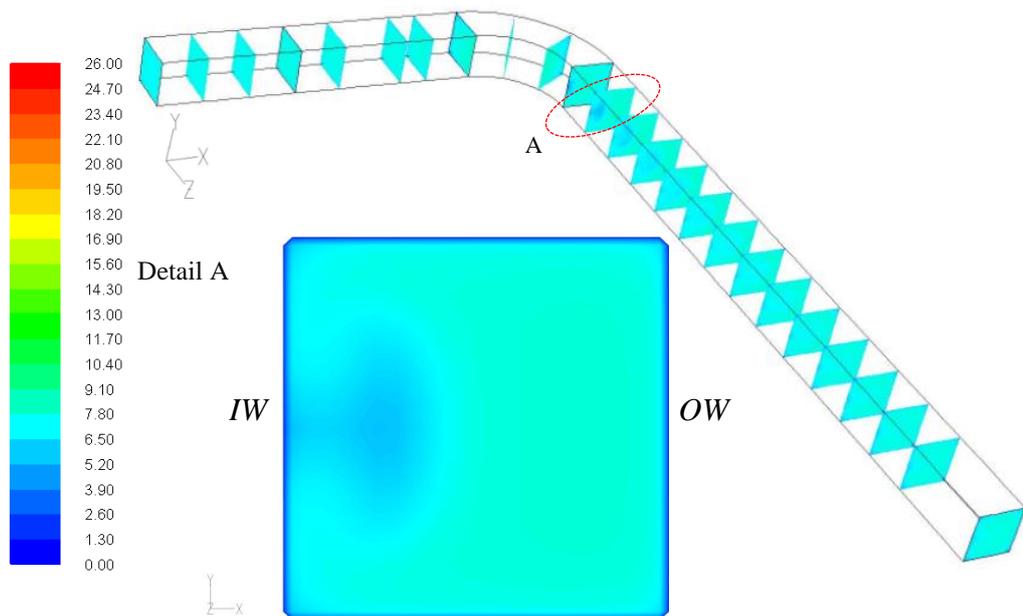
Gambar 4.30 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° dengan *DIDB*  $d/D_h$  0.100 bidang horizontal hasil numerik untuk  $Re_{DH} = 13.5 \times 10^4$

### 4.3 Visualisasi Aliran Sekunder pada Bidang Melintang

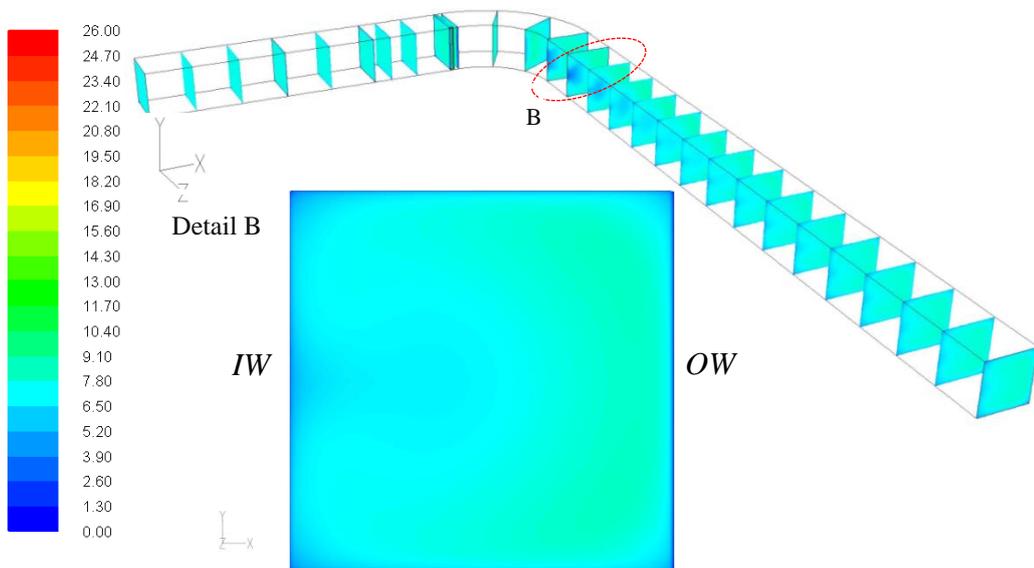
#### 4.3.1 Visualisasi Aliran Sekunder pada Bidang Melintang $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

Aliran sekunder atau yang biasa disebut sebagai *vortex* merupakan aliran fluida yang terbentuk akibat separasi dan mengalir tidak searah dengan aliran primer. Fenomena terbentuknya aliran sekunder di dalam *ducting* dengan *elbow*  $90^\circ$  dapat ditunjukkan dari visualisasi studi numerik dengan tampilan kontur kecepatan pada bidang melintang terhadap aliran pada  $z/D_h = 4.5$  (bidang  $x$ - $y$ ).

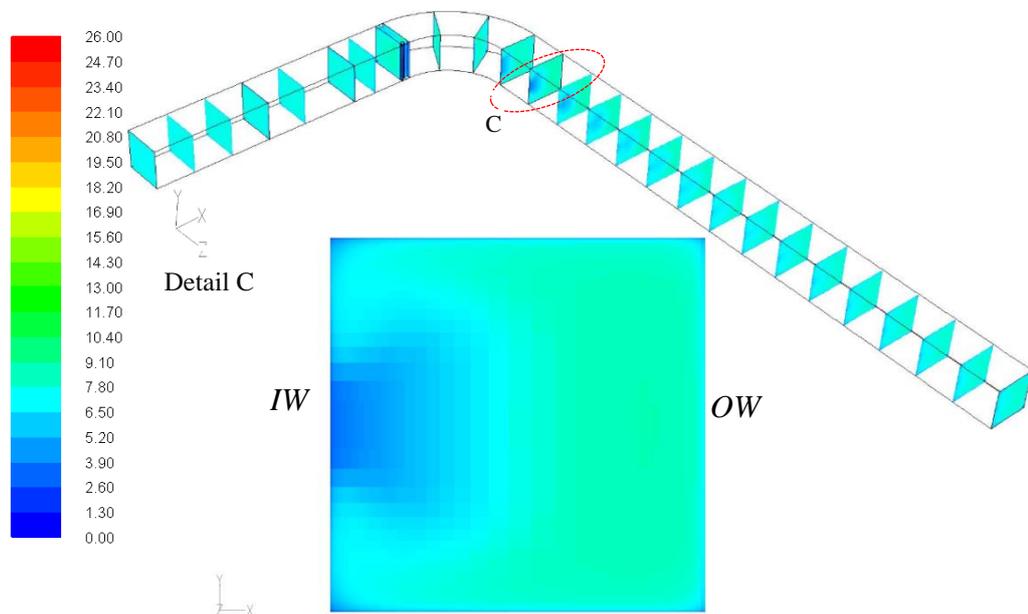
Gambar 4.31 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu. Gambar 4.32 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.064$ . Gambar 4.33 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.080$ . Gambar 4.34 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.100$ . Pemilihan bidang melintang  $z/D_h = 4.5$  dikarenakan pada nilai  $z/D_h = 4.5$  inilah telah terjadi *backflow*, sehingga proses pengamatan timbulnya aliran sekunder pada *ducting* dengan *elbow*  $90^\circ$  lebih mudah diamati. Daerah yang berwarna biru tua menunjukkan daerah aliran yang memiliki nilai kecepatan rendah, sementara daerah yang berwarna biru – kehijauan menunjukkan aliran dengan kecepatan lebih tinggi.



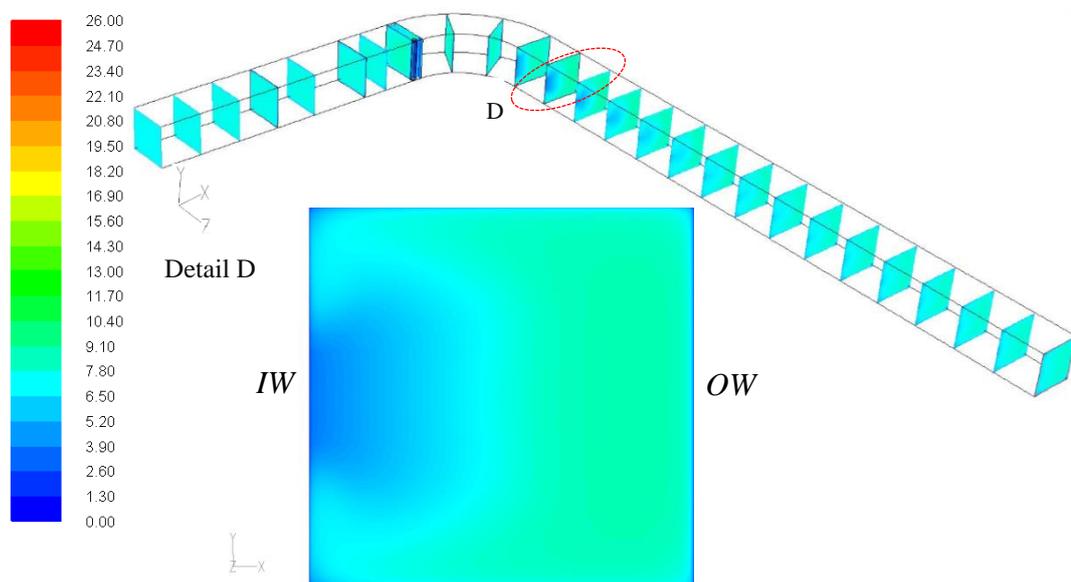
Gambar 4.31 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



Gambar 4.32 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow* dengan  $DIDB d/D_h = 0.064$  untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



Gambar 4.33 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow* dengan  $DIDB\ d/D_h = 0.080$  untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



Gambar 4.34 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow* dengan  $DIDB\ d/D_h = 0.100$  untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

Informasi yang lebih lengkap mengenai aliran sekunder pada bidang melintang *elbow*  $90^\circ$  dapat dilihat dari vektor kecepatan pada bidang tersebut. Kondisi aliran primer diperlihatkan oleh vektor yang berada pada rentang warna hijau. Aliran primer ini memiliki orientasi utama yaitu searah aliran (*stream wise*, arah sumbu  $z$  positif), dengan komponen vektor arah  $x$  dan  $y$  yang tidak dominan. Sedangkan aliran sekunder dapat diamati pada vektor dengan rentang warna biru muda hingga biru tua. Pada vektor aliran sekunder tersebut terlihat bahwa arah panah vektor memiliki orientasi ke arah sumbu  $x$ , ke arah sumbu  $y$ , ataupun ke arah resultan dari kedua sumbu tersebut. Berdasarkan fenomena ini dapat dijelaskan bahwa aliran sekunder memiliki sifat bergerak sirkulasi pada arah yang berlawanan dengan arah aliran utama.

Gambar 4.35 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu. Gambar 4.36 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.064$ . Gambar 4.37 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.080$ . Gambar 4.38 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.100$ .

Gambar 4.35 menunjukkan pada *surface ducting*  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalir dari *inner wall* menuju *outer wall* berulang-ulang hingga membentuk pusaran yang membuat aliran utama dari arah  $z$  terhambat. Pusaran tersebut menurut penelitian Lie et al (2010) dinamakan sebagai *base vortex* dimana terjadi pada sisi *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* sehingga aliran utama yang melewati *surface* tersebut akan terjadi defisit aliran. *Base vortex* berkembang semakin besar pada bagian tengah dari *surface* serta terdapat *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall*. Berdasarkan fenomena ini dapat dijelaskan bahwa aliran sekunder memiliki sifat bergerak sirkulasi pada arah yang berlawanan dengan arah aliran utama.

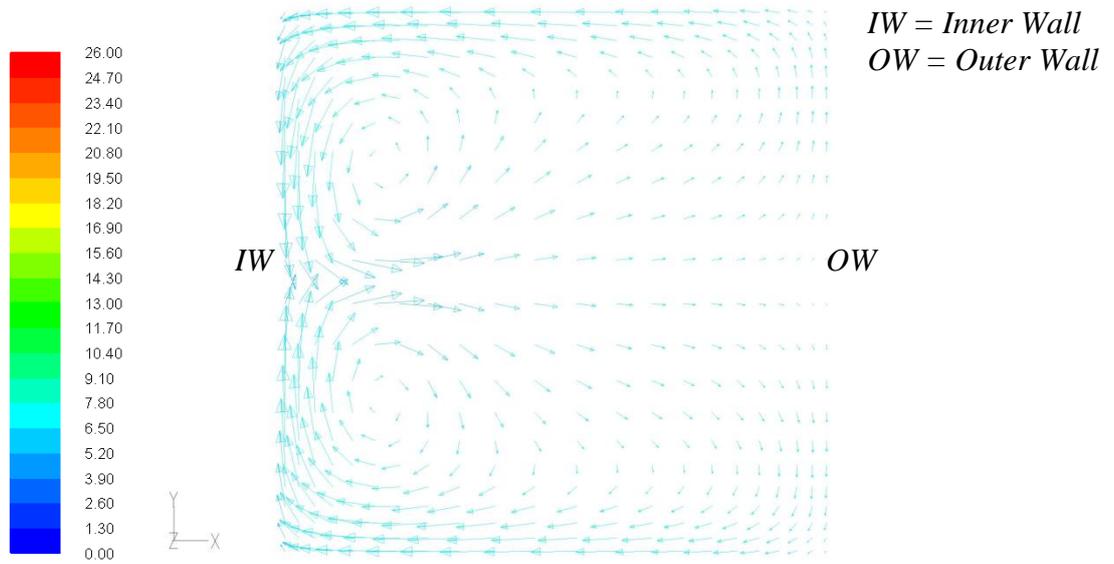
Gambar 4.36 menunjukkan penambahan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 membentuk *secondary flow*, dimana aliran mengalir dari *inner wall* menuju *outer wall* berulang-ulang hingga membentuk pusaran dinamakan sebagai *base vortex*. Dengan adanya *DIDB*  $d/D_h$  0.064, *base vortex* yang terjadi lebih besar daripada

tanpa adanya *DIDB*. Selain itu hampir sama dengan tanpa adanya *DIDB* terdapat juga *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* hal ini ditunjukkan pada *surface*  $z/D_h = 4.5$  serta *corner vortex* juga mulai muncul pada *outer wall* bagian *upper* dan *lower wall*.

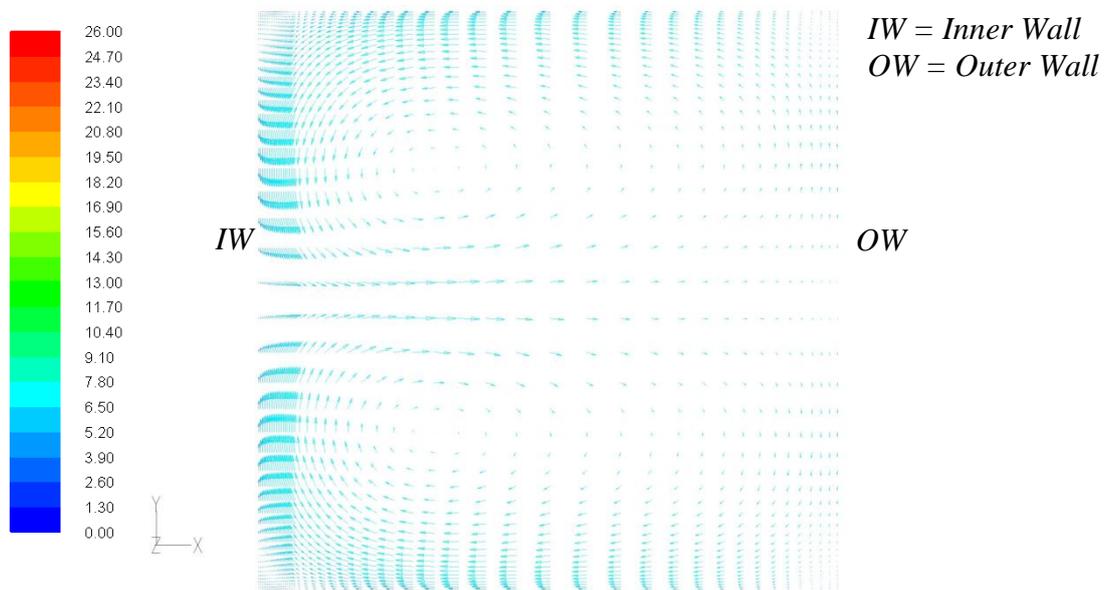
Gambar 4.37 menunjukkan penambahan *DIDB*  $d/D_h$  0.080, *base vortex* yang terjadi lebih besar daripada tanpa adanya *DIDB* selain itu hampir sama dengan tanpa adanya *DIDB* terdapat juga *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* dan juga pada *outer wall* bagian *upper* dan *lower wall*. *Corner vortex* terbentuk akibat penampang *ducting* yang berbentuk *square* sehingga bagian ujung dari *ducting* membentuk sudut yang cukup tajam untuk terbentuknya *corner vortex*. Kontur kecepatan dengan ditambahkan *DIDB* masih belum bisa mereduksi aliran dikarenakan pusaran *base vortex* yang kuat dibandingkan tanpa *DIDB*. Hal ini masih sama dengan diameter sebelumnya yaitu  $d/D_h$  0.064 dimana masih terdapatnya kontur kecepatan yang tinggi di sekitar *outer wall* dan *base vortex* yang terbentuk masih belum dapat menurunkan *pressure drop* akibat adanya kelengkungan dari *elbow*  $90^\circ$ .

Gambar 4.38 menunjukkan *secondary flow* terjadi karena adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner wall* dan juga *outer wall* sehingga aliran akan bergerak dari sisi *inner wall* menuju *outer wall* berulang ulan hingga membentuk *base vortex*. Semakin besar *base vortex* yang terjadi maka akan berdampak pada *pressure drop* dimana *pressure drop* yang terjadi akan semakin besar. Dengan bertambahnya diameter *DIDB* ternyata masih belum bisa mereduksi *secondary flow* yang terjadi. *Base vortex* yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan tanpa *DIDB* dan juga variasi diameter sebelumnya.

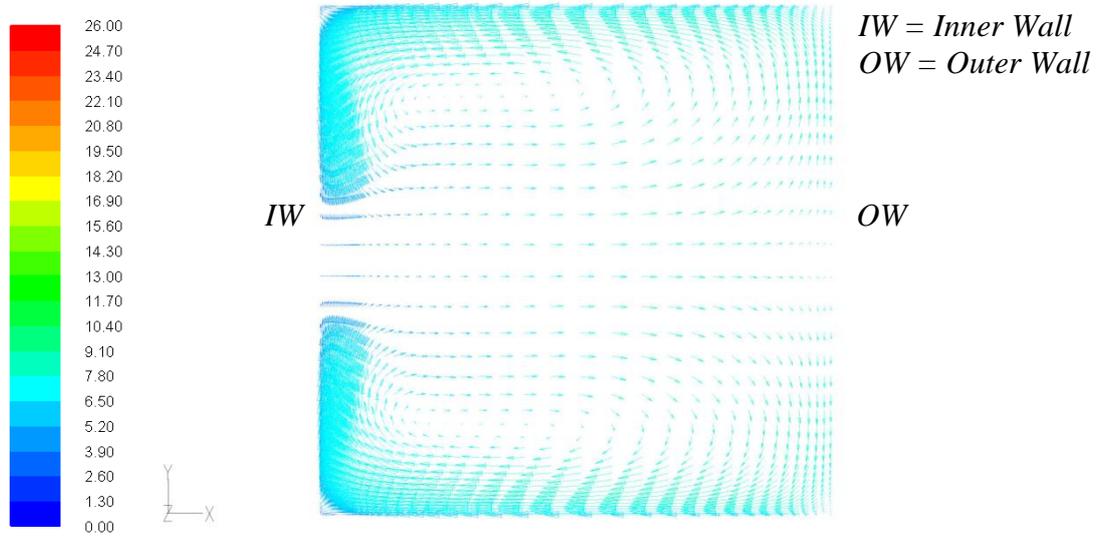
Dapat dikatakan dengan adanya *IDB* ternyata dapat menambah *pressure drop* yang terjadi hal ini digambarkan dengan perbedaan ukuran *base vortex* dimana dengan penambahan *DIDB* dan berbagai variasinya menimbulkan *base vortex* yang lebih besar daripada tanpa adanya *DIDB*.



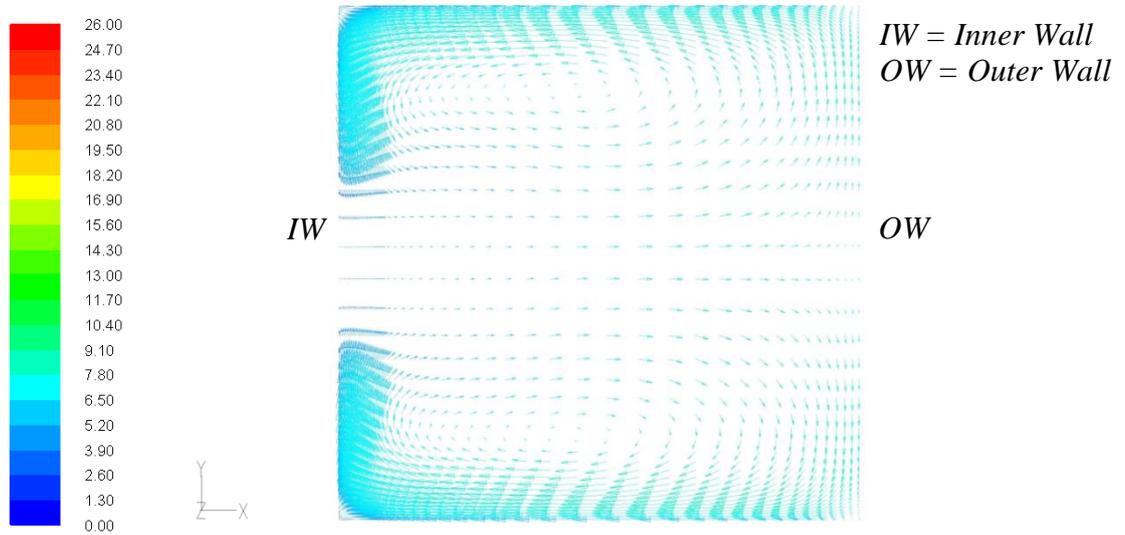
Gambar 4.35 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  tanpa untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



Gambar 4.36 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  dengan  $DIDB$  0.064 untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$



Gambar 4.37 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  dengan  $DIDB$  0.080 untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

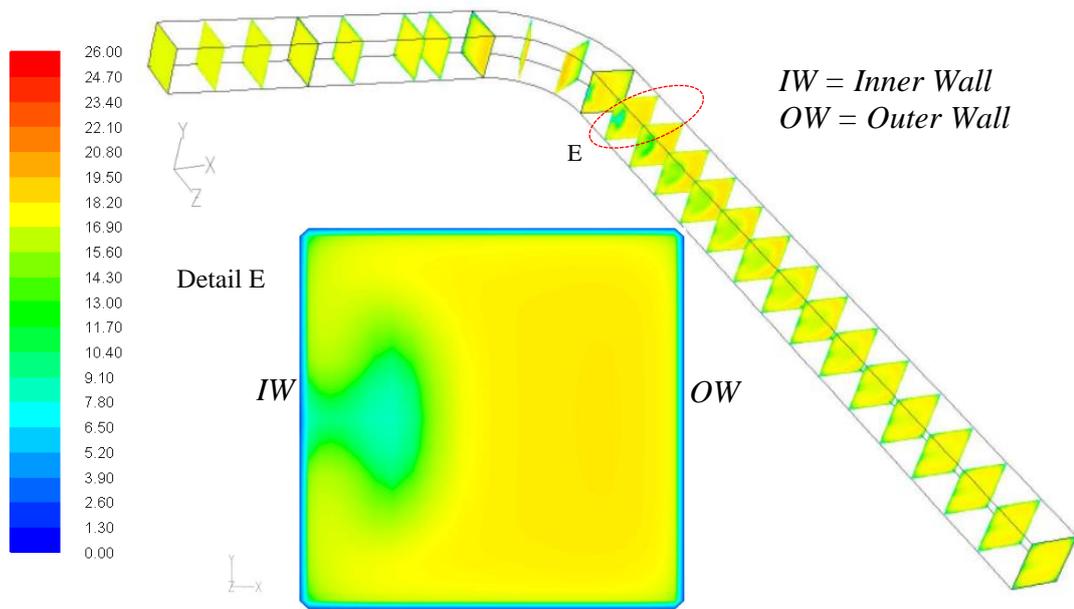


Gambar 4.38 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  dengan  $DIDB$  0.100 untuk  $Re_{DH} = 6,37 \times 10^4$

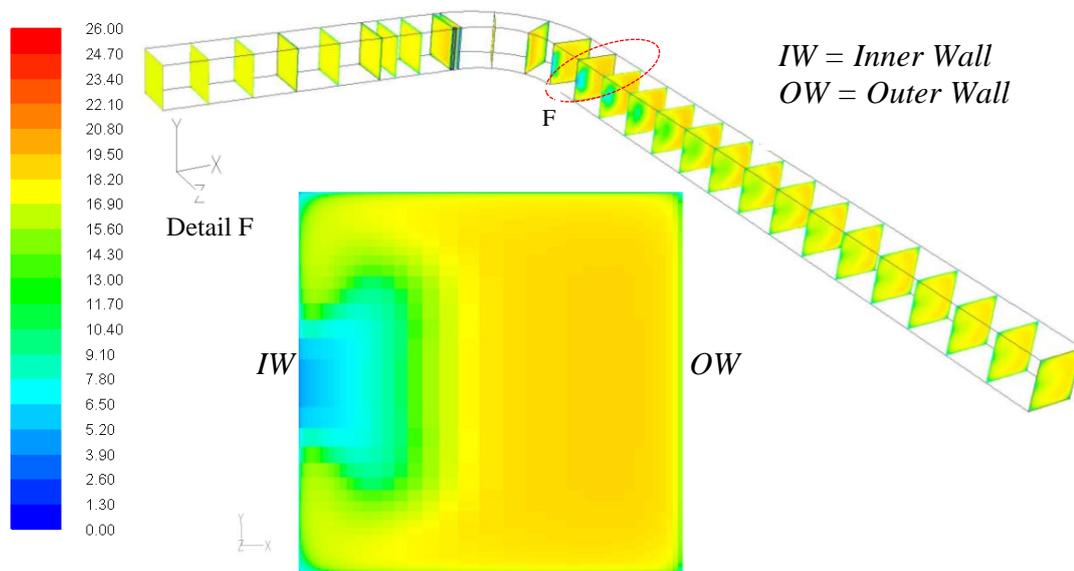
### 4.3.2 Visualisasi Aliran Sekunder pada Bidang Melintang $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$

Aliran sekunder atau yang biasa disebut sebagai *vortex* merupakan aliran fluida yang terbentuk akibat separasi dan mengalir tidak searah dengan aliran primer. Fenomena terbentuknya aliran sekunder di dalam *ducting* dengan *elbow*  $90^\circ$  dapat ditunjukkan dari visualisasi studi numerik dengan tampilan kontur kecepatan pada bidang melintang terhadap aliran pada  $z/D_h = 4.5$  (bidang  $x$ - $y$ ).

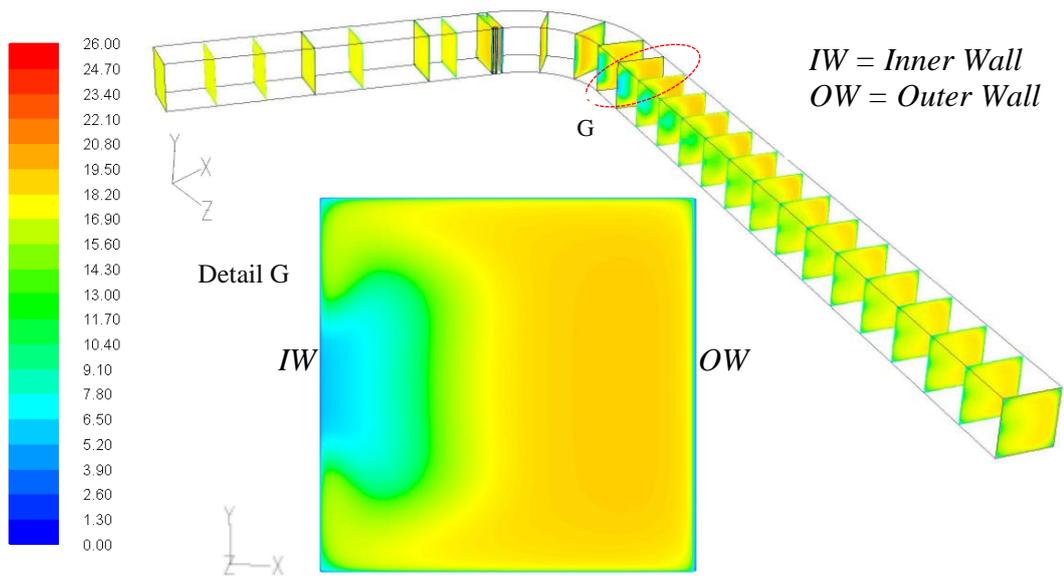
Gambar 4.39 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu. Gambar 4.40 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.064$ . Gambar 4.41 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.080$ . Gambar 4.42 menunjukkan kontur kecepatan pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.100$ . Pemilihan bidang melintang  $z/D_h = 4.5$  dikarenakan pada nilai  $z/D_h = 4.5$  inilah telah terjadi *backflow*, sehingga proses pengamatan timbulnya aliran sekunder pada *ducting* dengan *elbow*  $90^\circ$  lebih mudah diamati. Daerah yang berwarna biru muda menunjukkan daerah aliran yang memiliki nilai kecepatan rendah, sementara daerah yang berwarna kuning – oranye menunjukkan aliran dengan kecepatan lebih tinggi.



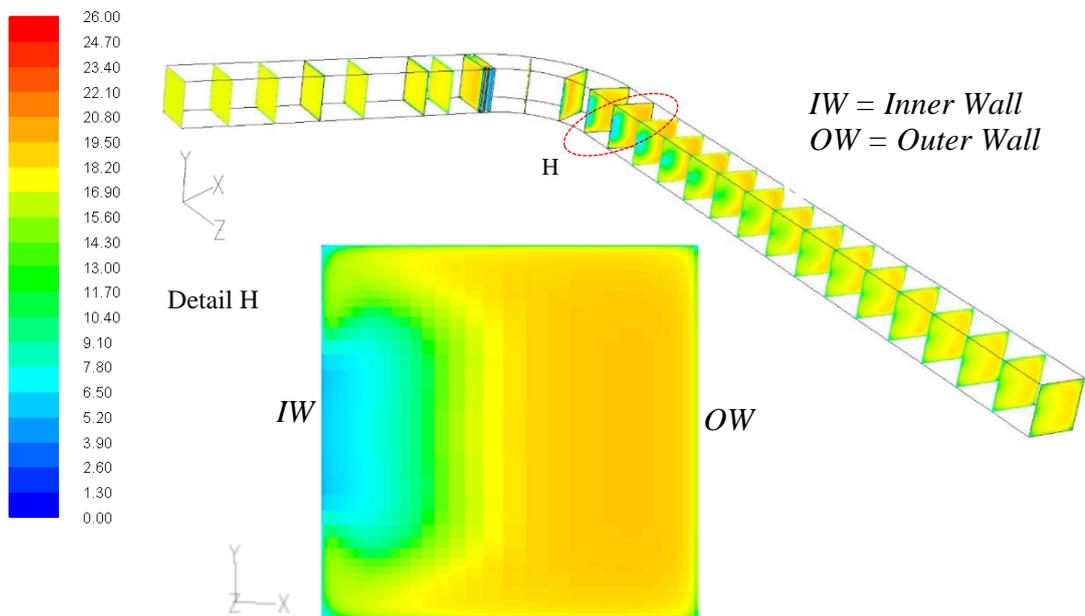
Gambar 4.39 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$



Gambar 4.40 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow* dengan  $DIDB \ d/D_h = 0.064$  untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$



Gambar 4.41 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow* dengan  $DIDB\ d/D_h = 0.080$  untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$



Gambar 4.42 Kontur kecepatan ( $m/s$ ) pada bidang melintang pada *elbow* dengan  $DIDB\ d/D_h = 0.100$  untuk  $Re_{DH} = 13,5 \times 10^4$

Informasi yang lebih lengkap mengenai aliran sekunder pada bidang melintang *elbow*  $90^\circ$  dapat dilihat dari vektor kecepatan pada bidang tersebut. Kondisi aliran primer diperlihatkan oleh vektor yang berada pada rentang warna oranye. Aliran primer ini memiliki orientasi utama yaitu searah aliran (*stream wise*, arah sumbu  $z$  positif), dengan komponen vektor arah  $x$  dan  $y$  yang tidak dominan. Sedangkan aliran sekunder dapat diamati pada vektor dengan rentang warna biru muda hingga biru tua. Pada vektor aliran sekunder tersebut terlihat bahwa arah panah vektor memiliki orientasi ke arah sumbu  $x$ , ke arah sumbu  $y$ , ataupun ke arah resultan dari kedua sumbu tersebut. Berdasarkan fenomena ini dapat dijelaskan bahwa aliran sekunder memiliki sifat bergerak sirkulasi pada arah yang berlawanan dengan arah aliran utama.

Gambar 4.43 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  tanpa pengganggu. Gambar 4.44 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.064$ . Gambar 4.45 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.080$ . Gambar 4.46 merupakan visualisasi vektor kecepatan pada bidang melintang untuk *elbow*  $90^\circ$  dengan *DIDB*  $d/D_h = 0.100$ .

Gambar 4.43 menunjukkan pada *surface ducting*  $z/D_h = 4.5$  aliran mengalir dari *inner wall* menuju *outer wall* berulang-ulang hingga membentuk pusaran yang membuat aliran utama dari arah  $z$  terhambat. Pusaran tersebut menurut penelitian Lie et al (2016) dinamakan sebagai *base vortex* dimana terjadi pada sisi *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* sehingga aliran utama yang melewati *surface* tersebut akan terjadi defisit aliran. *Base vortex* berkembang semakin besar pada bagian tengah dari *surface* serta terdapat *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall*. Berdasarkan fenomena ini dapat dijelaskan bahwa aliran sekunder memiliki sifat bergerak sirkulasi pada arah yang berlawanan dengan arah aliran utama.

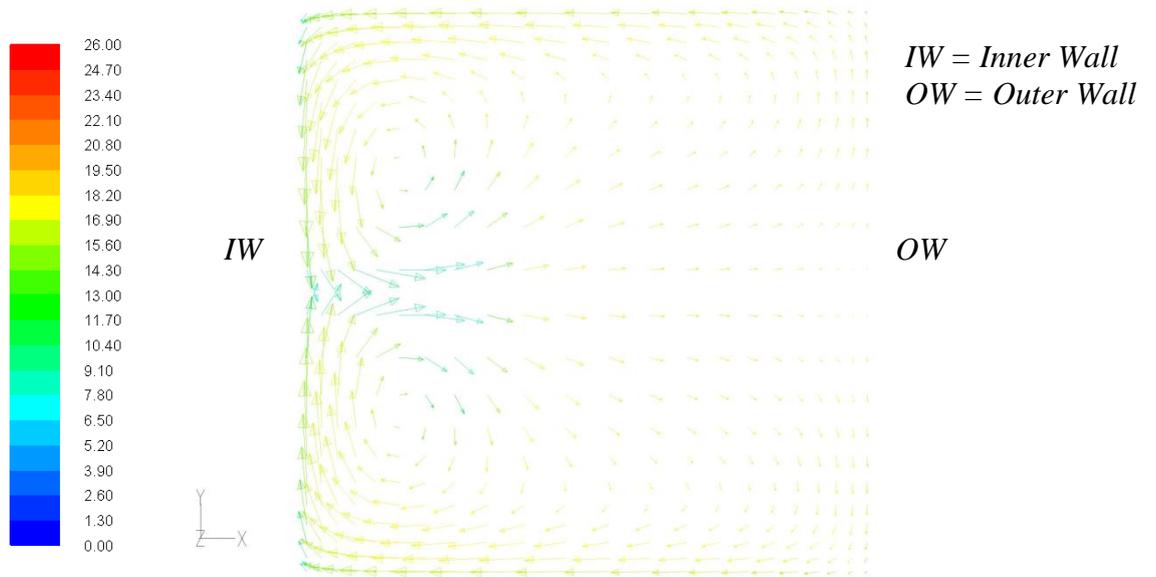
Gambar 4.44 menunjukkan penambahan *DIDB*  $d/D_h$  0.064 membentuk *secondary flow*, dimana aliran mengalir dari *inner wall* menuju *outer wall* berulang-ulang hingga membentuk pusaran dinamakan sebagai *base vortex*. Dengan adanya *DIDB*  $d/D_h$  0.064, *base vortex* yang terjadi lebih besar daripada

tanpa adanya *DIDB*. Selain itu hampir sama dengan tanpa adanya *DIDB* terdapat juga *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* hal ini ditunjukkan pada *surface*  $z/D_h = 4.5$  serta *corner vortex* juga mulai muncul pada *outer wall* bagian *upper* dan *lower wall*.

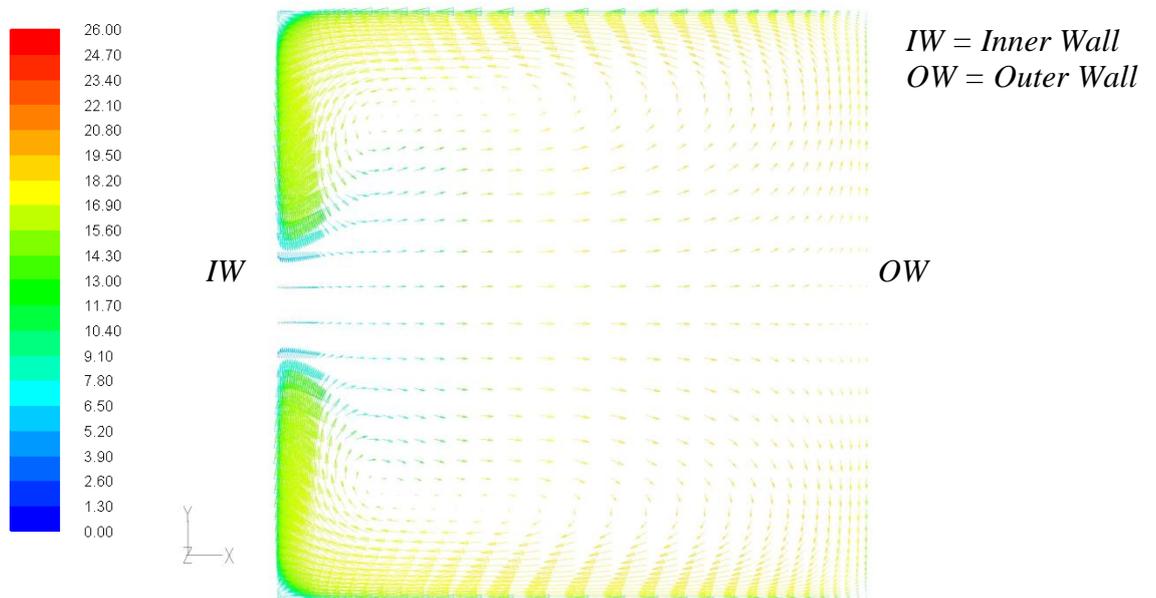
Gambar 4.45 menunjukkan penambahan *DIDB*  $d/D_h$  0.080, *base vortex* yang terjadi lebih besar daripada tanpa adanya *DIDB* selain itu hampir sama dengan tanpa adanya *DIDB* terdapat juga *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* dan juga pada *outer wall* bagian *upper* dan *lower wall*. *Corner vortex* terbentuk akibat penampang *ducting* yang berbentuk *square* sehingga bagian ujung dari *ducting* membentuk sudut yang cukup tajam untuk terbentuknya *corner vortex*. Kontur kecepatan dengan ditambahkan *DIDB* masih belum bisa mereduksi aliran dikarenakan pusaran *base vortex* yang kuat dibandingkan tanpa *DIDB*. Hal ini masih sama dengan diameter sebelumnya yaitu  $d/D_h$  0.064 dimana masih terdapatnya kontur kecepatan yang tinggi di sekitar *outer wall* dan *base vortex* yang terbentuk masih belum dapat menurunkan *pressure drop* akibat adanya kelengkungan dari *elbow*  $90^\circ$ .

Gambar 4.46 menunjukkan *secondary flow* terjadi karena adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner wall* dan juga *outer wall* sehingga aliran akan bergerak dari sisi *inner wall* menuju *outer wall* berulang ulan hingga membentuk *base vortex*. Semakin besar *base vortex* yang terjadi maka akan berdampak pada *pressure drop* dimana *pressure drop* yang terjadi akan semakin besar. Dengan bertambahnya diameter *DIDB* ternyata masih belum bisa mereduksi *secondary flow* yang terjadi. *Base vortex* yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan tanpa *DIDB* dan juga variasi diameter sebelumnya.

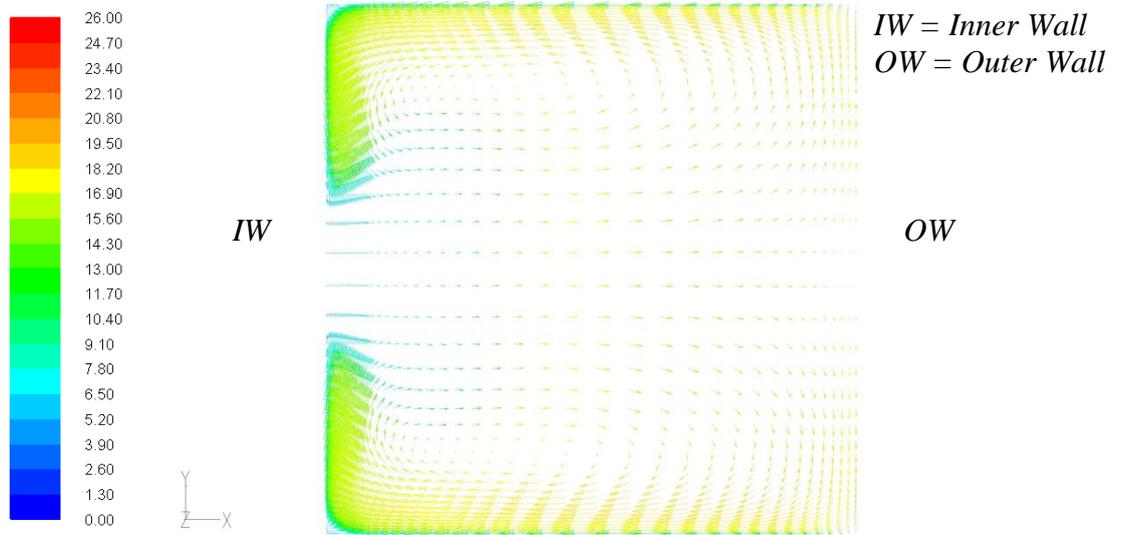
Dapat dikatakan dengan adanya *DIDB* ternyata dapat menambah *pressure drop* yang terjadi hal ini digambarkan dengan perbedaan ukuran *base vortex* dimana dengan penambahan *DIDB* dan berbagai variasinya menimbulkan *base vortex* yang lebih besar daripada tanpa adanya *DIDB*.



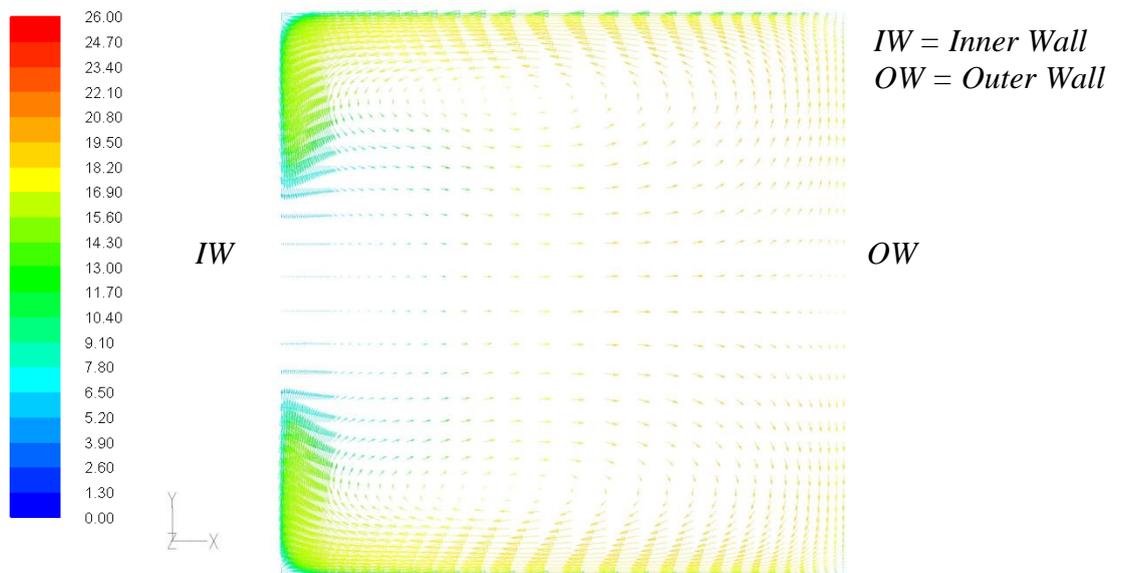
Gambar 4.43 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  tanpa pengganggu



Gambar 4.44 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  dengan *DIDB* 0.064



Gambar 4.45 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  dengan  $DIDB$  0.080

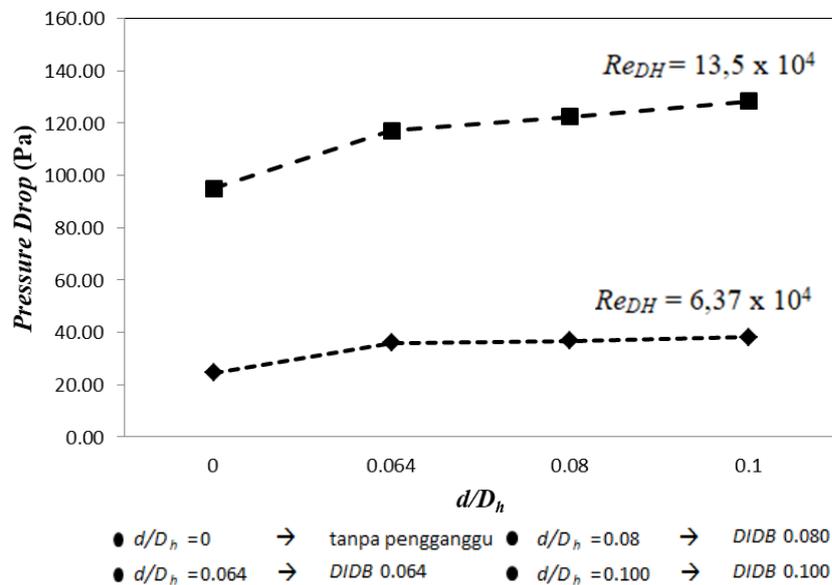


Gambar 4.46 Vektor kecepatan bidang melintang pada  $z/D_h = 4.5$  ( $m/s$ ) elbow  $90^\circ$  dengan  $DIDB$  0.100

#### 4.4 Pressure Drop

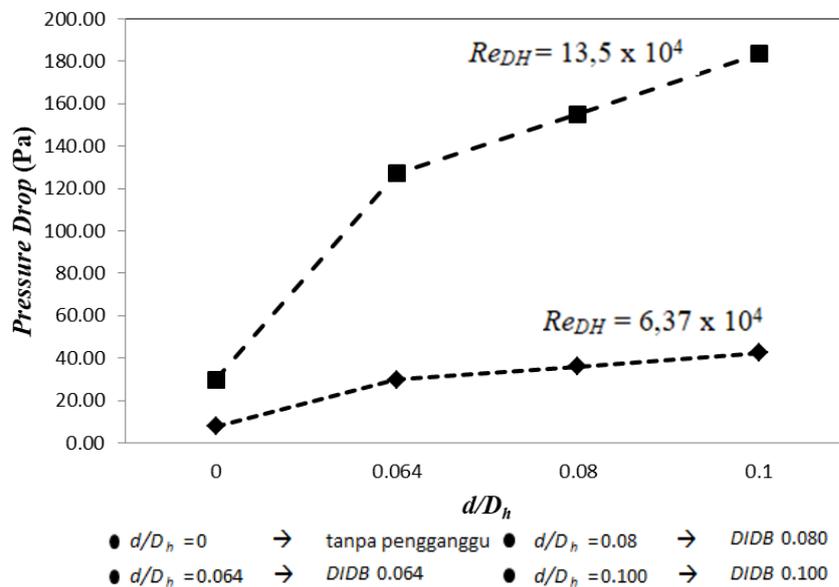
Distribusi nilai *pressure drop* hasil penelitian di bagi atas empat bagian yaitu distribusi *pressure drop* pada *upstream duct*, *elbow 90°*, *downstream duct* serta *ducting* secara keseluruhan. Distribusi nilai *pressure drop* akan ditampilkan dalam gambar 4.47, 4.48, 4.49, dan 4.50 dengan hasil dari olahan perangkat lunak *fluent* menggunakan *facet average static pressure*.

Gambar 4.47 menunjukkan menampilkan hasil dari *pressure drop* pada section *inlet* dan *outlet ducting*. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih kecil daripada yang menggunakan *DIDB*, *pressure drop* tertinggi terjadi pada variasi  $d/D_h = 0.100$  dan akan semakin tinggi seiring dengan meningkatnya nilai *Reynolds number*. Adanya *DIDB* membuat *pressure drop* semakin meningkat, hal ini terjadi karena akibat dari penambahan *DIDB* yang membuat aliran udara tidak mampu untuk melawan *adverse pressure* pada kelengkungan *elbow* sehingga pada *outlet elbow secondary flow* yang terjadi semakin besar berbeda halnya dengan tanpa *DIDB* *pressure drop* sendiri dipengaruhi oleh kelengkungan *elbow* serta penambahan *DIDB*.



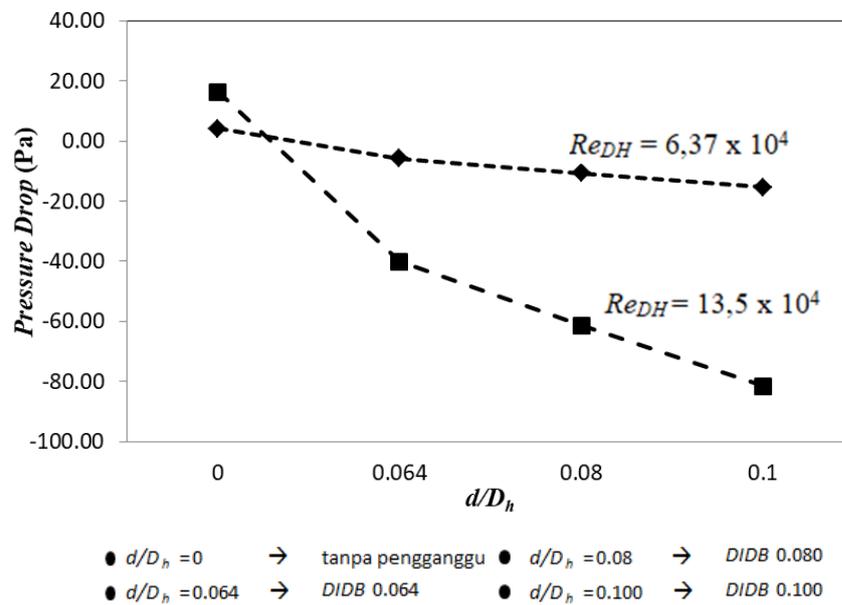
Gambar 4.47 *Pressure Drop Square Duct* dengan *elbow 90°*. *Reynolds Number*  $6.37 \times 10^4$ ,  $13.5 \times 10^4$  dan *Diamond Inlet Disturbance Body*  $d/D_h = 0.064$ ,  $0.080$ ,  $0.100$ .

Gambar 4.48 menunjukkan menampilkan hasil dari *pressure drop* pada section *inlet* dan *outlet upstream duct*. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih kecil daripada yang menggunakan *DIDB*, *pressure drop* tertinggi terjadi pada variasi  $d/D_h = 0.100$  dan akan semakin tinggi seiring dengan meningkatnya nilai *Reynolds number*. Adanya *DIDB* mempengaruhi nilai *pressure drop* yang semakin meningkat, hal ini terjadi karena akibat dari penambahan *DIDB* yang membuat aliran udara pada sisi *outlet upstream duct* terganggu yang mempengaruhi nilai *pressure* pada sisi *outlet* karena luas efektif aliran melewati saluran mengecil.



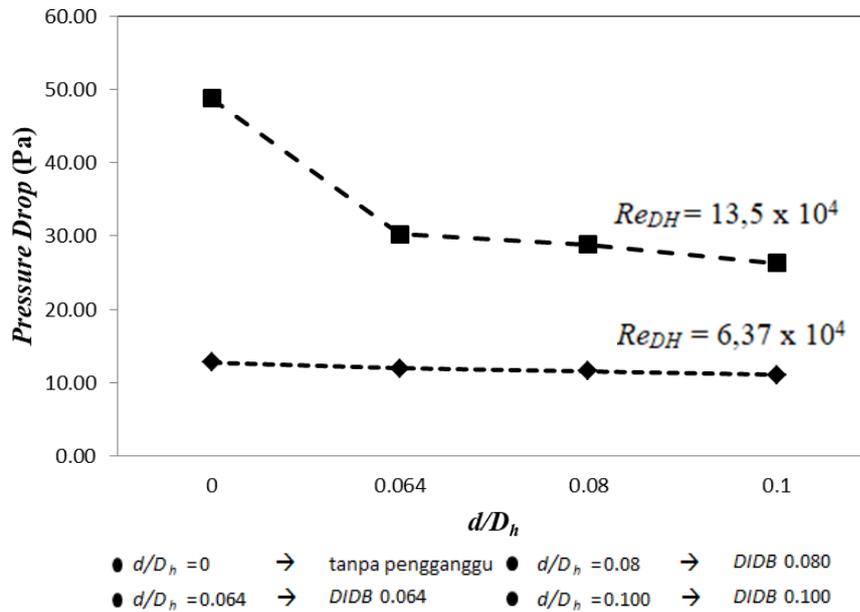
Gambar 4.48 *Pressure Drop Upstream Duct*. Reynolds Number  $6.37 \times 10^4$ ,  $13.5 \times 10^4$  dan *Diamond Inlet Disturbance Body*  $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .

Gambar 4.49 menunjukkan menampilkan hasil dari *pressure drop* pada section *inlet* dan *outlet elbow 90° duct*. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih besar daripada yang menggunakan *DIDB*, *pressure drop* terkecil terjadi pada variasi  $d/D_h = 0.100$ . Adanya *DIDB* membuat nilai *pressure drop* menjadi turun, ini terjadi karena *vortex shedding* yang dihasilkan dari adanya *DIDB* membuat *blockage area* berkurang. *Blockage area* yang berkurang membuat kecepatan dan momentum aliran pada *elbow* semakin meningkat sehingga *pressure drop* tereduksi.



Gambar 4.49 *Pressure Drop Elbow 90°*. Reynolds Number  $6.37 \times 10^4$ ,  $13.5 \times 10^4$  dan *Diamond Inlet Disturbance Body*  $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .

Gambar 4.50 menunjukkan menampilkan hasil dari *pressure drop* pada section *inlet* dan *outlet downstream duct*. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih besar daripada yang menggunakan *DIDB*, *pressure drop* terkecil terjadi pada variasi  $d/D_h = 0.100$ . Adanya *DIDB* membuat nilai *pressure drop* menjadi turun, ini terjadi karena dengan adanya *DIDB* kecepatan aliran pada *elbow* semakin meningkat dan momentum pada aliran pun semakin meningkat yang membuat separasi aliran mengecil yang membuat *pressure drop* pada *downstream duct* turun.

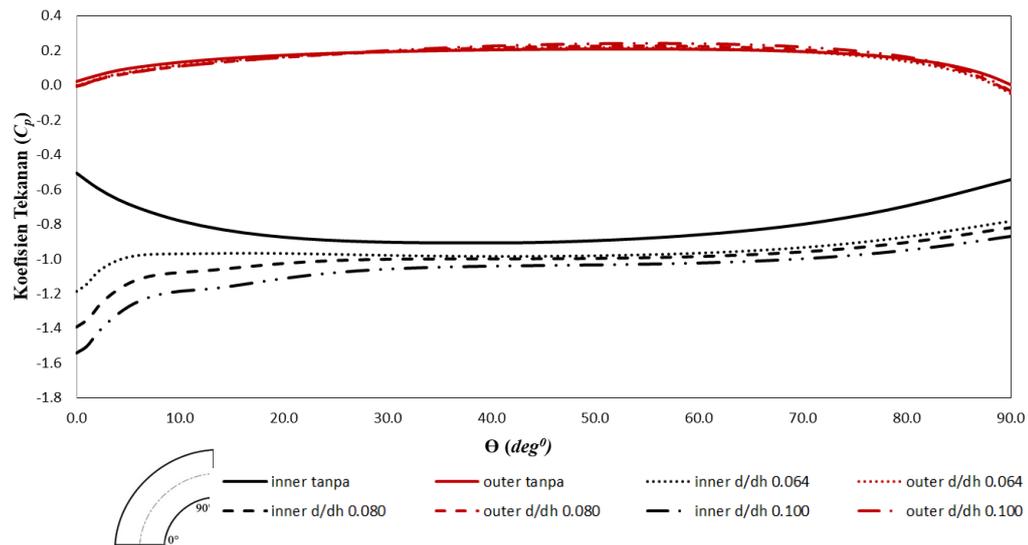


Gambar 4.50 Pressure Drop Downstream. Reynolds Number  $6.37 \times 10^4$ ,  $13.5 \times 10^4$  dan Diamond Inlet Disturbance Body  $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .

Hasil *pressure drop* keseluruhan yaitu dari sisi *inlet* dan *outlet duct*, hasilnya *ducting* tanpa *DIBD* justru lebih baik daripada dengan *DIBD* ini terjadi karena efek adanya *DIBD* hanya berpengaruh terhadap *pressure* pada sisi *inlet elbow* dan *outlet downstream duct*, karena pada sisi tersebut momentum dari aliran meningkat namun pada sisi *inlet duct* adanya *DIBD* tidak berpengaruh.

#### 4.5 Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ )

Gambar 4.51 menunjukkan grafik dari koefisien tekanan pada *elbow*  $90^\circ$  data yang ditampilkan mulai dari sudut  $0^\circ$  sampai dengan sudut  $90^\circ$  dan diambil pada posisi  $z/D_h = 0.5$  pada *Reynolds Number*  $6,37 \times 10^4$ .  $C_p$  dihitung secara manual pada menu *ansys fluent* dengan *custom field function*, dengan mengambil data kecepatan dan tekanan referensi pada sisi *inlet ducting*.



Gambar 4.51 Distribusi Nilai Koefisien Tekanan *Square Duct* dengan *elbow*  $90^\circ$ . *Reynolds Number*  $6.37 \times 10^4$  dan *Diamond Inlet Disturbance Body*  $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .

Pada sisi *inner wall ducting* tanpa *DIDB*, nilai koefisien tekanan menurun sampai sudut  $25^\circ$ , ini menunjukkan aliran fluida mengalami akselerasi. Nilai koefisien tekanan kemudian meningkat sampai sudut  $90^\circ$  yang menunjukkan aliran mengalami deselerasi. Pada sisi *outer wall* nilai koefisien tekanan meningkat dari sudut  $0^\circ$  sampai sudut  $50^\circ$  yang menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi, kemudian aliran mengalami akselerasi yang ditandai dengan menurunnya nilai koefisien tekanan pada sudut  $50^\circ$  sampai  $90^\circ$ .

*Ducting* dengan penambahan *DIDB*  $d/D_h = 0.064$  sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami kenaikan nilai koefisien tekanan dari sudut  $0^\circ$  sampai sudut  $23^\circ$ , ini menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi. Kemudian nilai koefisien tekanan menurun hingga sudut  $49^\circ$  yang menunjukkan aliran mengalami

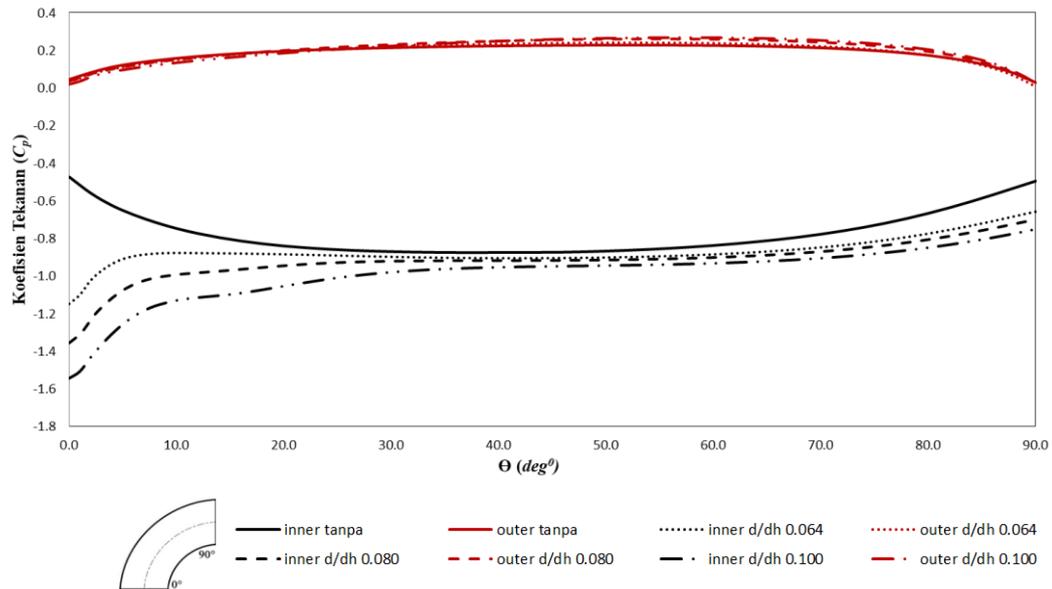
akselerasi. Pada sudut  $49^{\circ}$  sampai sudut  $90^{\circ}$  aliran mengalami deselerasi kembali sehingga nilai koefisien tekanan naik.

*Ducting* dengan penambahan *DIDB*  $d/D_h = 0.080$  sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami kenaikan nilai koefisien tekanan dari sudut  $0^{\circ}$  sampai sudut  $90^{\circ}$ , ini menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi.

Distribusi nilai koefisien tekanan pada *ducting* dengan penambahan *DIDB*  $d/D_h = 0.100$  pada sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami kenaikan nilai koefisien tekanan dari sudut  $0^{\circ}$  sampai sudut  $90^{\circ}$ , ini menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi.

Pada sisi *outer wall* untuk semua variasi geometri *DIDB* nilai koefisien tekanan memiliki distribusi yang sama dengan *ducting* tanpa *DIDB*. Nilai koefisien tekanan meningkat dari sudut  $0^{\circ}$  sampai sudut  $50^{\circ}$  yang menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi. Kemudian aliran mengalami akselerasi yang ditandai dengan menurunnya nilai koefisien tekanan pada sudut  $50^{\circ}$  sampai  $90^{\circ}$ . 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 4.52 menunjukkan grafik dari koefisien tekanan pada *elbow* 90<sup>0</sup> data yang ditampilkan mulai dari sudut 0<sup>0</sup> sampai dengan sudut 90<sup>0</sup> dan diambil pada posisi  $z/D_h = 0.5$  pada *Reynolds Number*  $13,5 \times 10^4$ .  $C_p$  dihitung secara manual pada menu *ansys fluent* dengan *custom field function*, dengan mengambil data kecepatan dan tekanan referensi pada sisi *inlet ducting*.



Gambar 4.52 Distribusi Nilai Koefisien Tekanan *Square Duct* dengan *elbow* 90<sup>o</sup> . *Reynolds Number*  $13.5 \times 10^4$  dan *Diamond Inlet Disturbance Body*  $d/D_h = 0.064, 0.080, 0.100$ .

Pada sisi *inner wall ducting* tanpa *DIDB*, nilai koefisien tekanan menurun sampai sudut 48<sup>0</sup>, ini menunjukkan aliran fluida mengalami akselerasi. Nilai koefisien tekanan kemudian meningkat sampai sudut 90<sup>0</sup> yang menunjukkan aliran mengalami deselerasi. Pada sisi *outer wall* nilai koefisien tekanan meningkat dari sudut 0<sup>0</sup> sampai sudut 50<sup>0</sup> yang menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi, kemudian aliran mengalami akselerasi yang ditandai dengan menurunnya nilai koefisien tekanan pada sudut 50<sup>0</sup> sampai 90<sup>0</sup>.

*Ducting* dengan penambahan *DIDB*  $d/D_h = 0.064$  sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami kenaikan nilai koefisien tekanan dari sudut 0<sup>0</sup> sampai sudut 90<sup>0</sup>, ini menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi.

*Ducting* dengan penambahan *DIDB*  $d/D_h = 0.080$  sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami kenaikan nilai koefisien tekanan dari sudut  $0^0$  sampai sudut  $90^0$ , ini menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi.

Distribusi nilai koefisien tekanan pada *ducting* dengan penambahan *DIDB*  $d/D_h = 0.100$  pada sisi *inner wall* terlihat aliran mengalami kenaikan nilai koefisien tekanan dari sudut  $0^0$  sampai sudut  $90^0$ , ini menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi.

Pada sisi *outer wall* untuk semua variasi geometri *DIDB* nilai koefisien tekanan memiliki distribusi yang sama dengan *ducting* tanpa *DIDB*. Nilai koefisien tekanan meningkat dari sudut  $0^0$  sampai sudut  $50^0$  yang menunjukkan aliran fluida mengalami deselerasi. Kemudian aliran mengalami akselerasi yang ditandai dengan menurunnya nilai koefisien tekanan pada sudut  $50^0$  sampai  $90^0$ . 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*.

## **4.6 Diskusi**

### **4.6.1 Evaluasi *Near Wall Treatment* pada *Turbulence Model***

Model turbulensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *k-ε standart* berdasarkan penelitian Bimantoro (2017). *Near Wall Treatment* yang digunakan dalam penelitian menggunakan *Standart Wall Function*. Hasil dari penelitian dengan *Near Wall Treatment - Standart Wall Function* dievaluasi kembali untuk membuktikan tingkat keakuratan data, terutama pengaruh *mesh* yang digunakan di dekat dinding. Sehingga perlu dibandingkan dengan *Near Wall Treatment – Enhanced Wall Treatment* dalam satu model turbulensi yang dipilih.

Tabel 4.1 menunjukkan *pressure drop* hasil simulasi *k-ε standart* dengan *Near Wall Treatment – Standar Wall Function*. Tabel 4.2 menunjukkan *pressure drop* hasil simulasi *k – ε standart* dengan *Near Wall Treatment – Enhanced Wall Treatment*. Tabel 4.3 menunjukkan perbandingan *pressure drop* hasil simulasi *k – ε standart* dengan *Near Wall Treatment* yang berbeda.

Tabel 4.1 *Pressure Drop* hasil simulasi  $k - \epsilon$  standart dengan *Near Wall Treatment – Standart Wall Function*

Reynolds Number	$\Delta P$ (Pa)			
	Upstream	Elbow	Downstream	Total
$Re_{dh1} = 6,37 \times 10^4$	7.69	4.17	12.75	24.62
$Re_{dh2} = 13,5 \times 10^4$	29.76	16.43	48.77	94.96

Tabel 4.2 *Pressure Drop* hasil simulasi  $k - \epsilon$  standart dengan *Near Wall Treatment – Enhanced Wall Treatment*

Reynolds Number	$\Delta P$ (Pa)			
	Upstream	Elbow	Downstream	Total
$Re_{dh1} = 6,37 \times 10^4$	10.05	4.03	12.78	26.86
$Re_{dh2} = 13,5 \times 10^4$	36.19	15.52	47.25	98.97

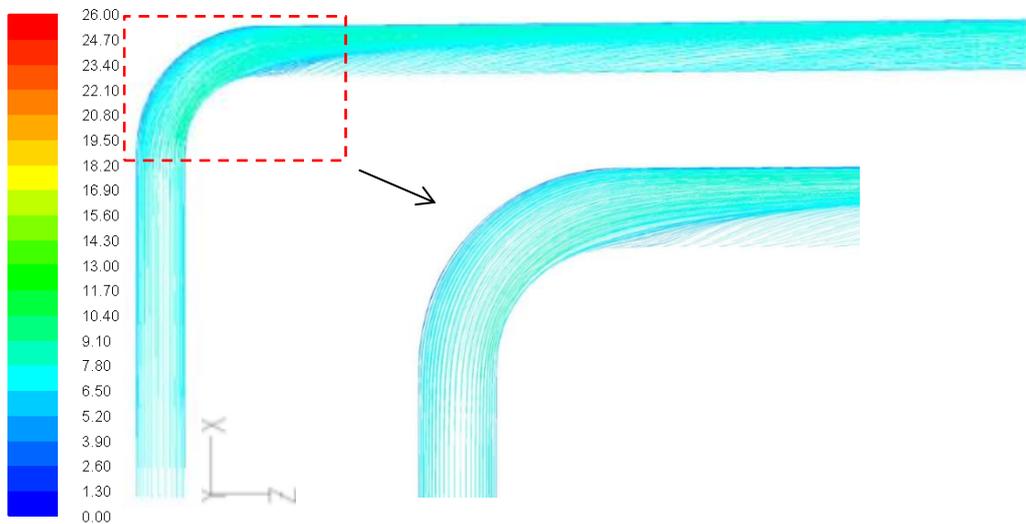
Tabel 4.3 Perbandingan *Pressure Drop* hasil simulasi  $k - \epsilon$  standart dengan *Near Wall Treatment* yang berbeda

Reynolds Number	$\Delta P$ total (Pa)		Delta
	Standard Wall Function	Enhanced Wall Treatment	
	$y^+ = 18.81$	$y^+ = 12.43$	
$Re_{dh1} = 6,37 \times 10^4$	24.62	26.86	8.34%
$Re_{dh2} = 13,5 \times 10^4$	94.96	98.97	4.04%

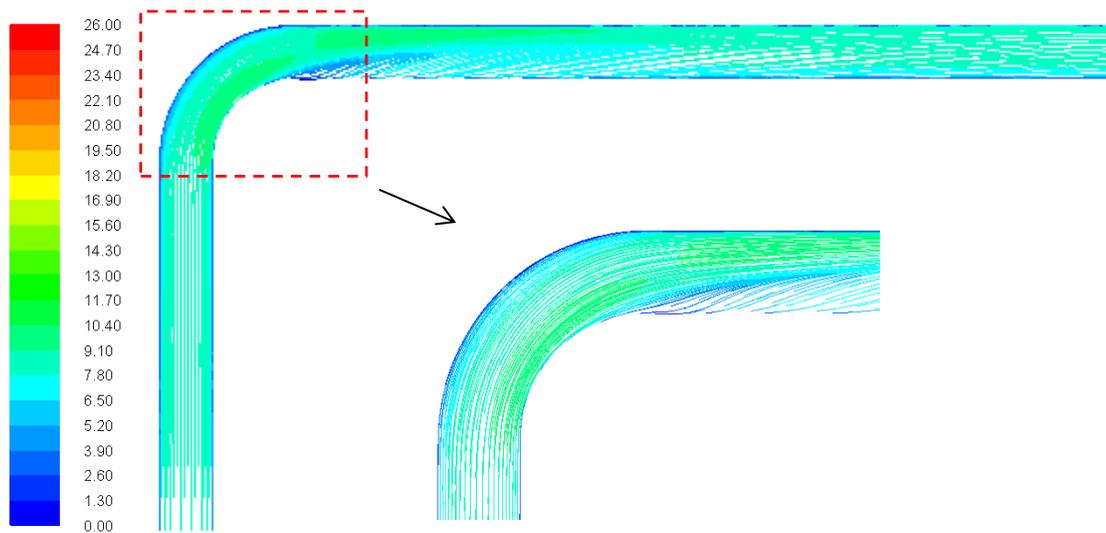
Dua *near wall treatment* yang digunakan yaitu *Standart Wall Function* dan *Enhanced Wall Treatment* untuk model turbulensi  $k - \epsilon$  standart didapatkan *pressure drop* total dengan perbedaan  $< 10\%$  untuk setiap variasi *Reynolds Number*. Hal itu menunjukkan bahwa tingkat kerapatan mesh di dekat dinding yang dilakukan sudah memberikan hasil terbaik, sehingga perubahan *near wall treatment* tidak terlalu signifikan.

#### 4.6.2 Evaluasi kontur *Pathline* pada *Near Wall Treatment* yang berbeda

Visualisasi kontur *pathline* menjelaskan lebih lanjut mengenai fenomena aliran sekunder pada *midspan* bidang horizontal pada *elbow* 90°. Gambar 4.53 menunjukkan kontur *pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik dengan *k – ε standart - Standart Wall Function* untuk  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ . Gambar 4.54 menunjukkan kontur *pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik dengan *k – ε standart - Enhanced Wall Treatment* untuk  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$ .



Gambar 4.53 *Pathline* (m/s) di dalam *elbow* 90° tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik dengan *k – ε standart - Standart Wall Function* untuk  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$

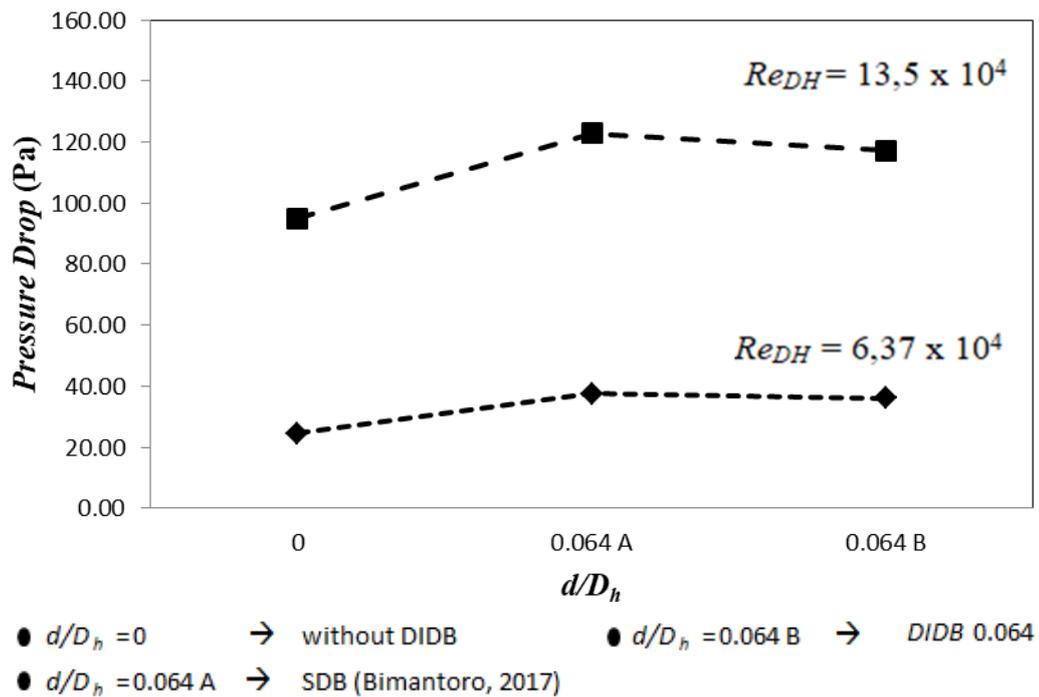


Gambar 4.54 *Pathline* (*m/s*) di dalam *elbow 90°* tanpa pengganggu bidang horizontal hasil numerik dengan *k – ε standart - Enhanced Wall Treatment* untuk  $Re_{DH} = 6.37 \times 10^4$

Visualisasi kontur *pathline* di dalam *elbow 90°* tanpa pengganggu menunjukkan pada gambar 4.53 dan 4.54 menunjukkan fenomena aliran fluida yang masuk pada *inlet upstream duct*. Terlihat bahwa tidak terjadi perbedaan yang signifikan akibat pengaruh *near wall treatment* yang digunakan. Sepanjang *upstream duct* aliran tidak mengalami *secondary flow* dikarenakan masih melalui saluran yang lurus, kemudian aliran mulai memasuki *elbow 90°* aliran mengalir dari sisi *outer wall* menuju sisi *inner wall*, pada bagian ini aliran mulai terbentuk *secondary flow* hal ini terjadi karena faktor dari kelengkungan *elbow 90°*. Aliran kemudian melalui bagian *downstream duct*, dan mulai terbentuk *base vortex* di sisi *inner wall*. *Base vortex* merupakan pusaran yang terbentuk akibat aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* dari *elbow 90°* menuju sisi *inner elbow 90°* secara berulang-ulang.

#### 4.6.3 Perbandingan *Pressure Drop* Hasil Penelitian

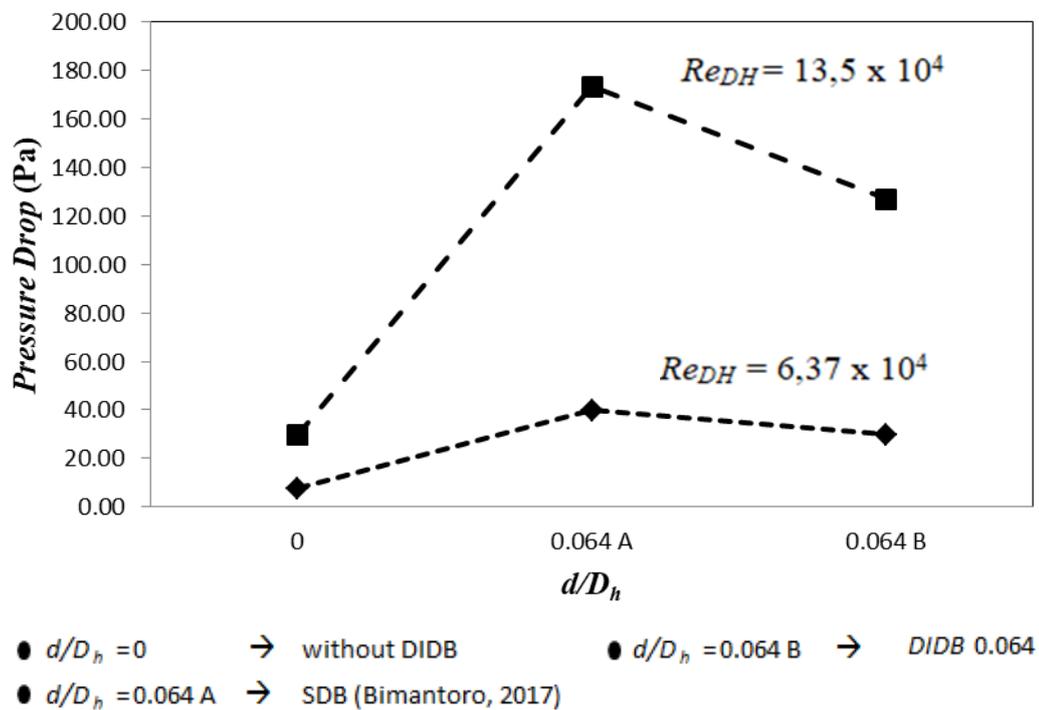
Gambar 4.55 menunjukkan perbandingan hasil *pressure drop* pada section inlet dan outlet ducting. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih kecil daripada yang menggunakan *DIDB* maupun *SDB* (Bimantoro, 2017). *Pressure drop* tertinggi terjadi pada variasi *SDB* (Bimantoro, 2017) pada kedua nilai *Reynolds Number*. Adanya pengganggu dengan dua geometri berbeda membuat *pressure drop* menjadi lebih besar. Dua geometri pengganggu yaitu *DIDB* menghasilkan intensitas turbulensi yang lebih tinggi daripada *SDB* (Bimantoro, 2017). Hal itu menyebabkan momentum aliran yang dihasilkan dengan penambahan *DIDB* menjadi lebih besar untuk melawan *adverse pressure* yang terjadi akibat kelengkungan *elbow* sehingga *pressure drop* yang dihasilkan lebih kecil.



Gambar 4.55 Perbandingan *Pressure Drop Square Duct* dengan *elbow 90°*.

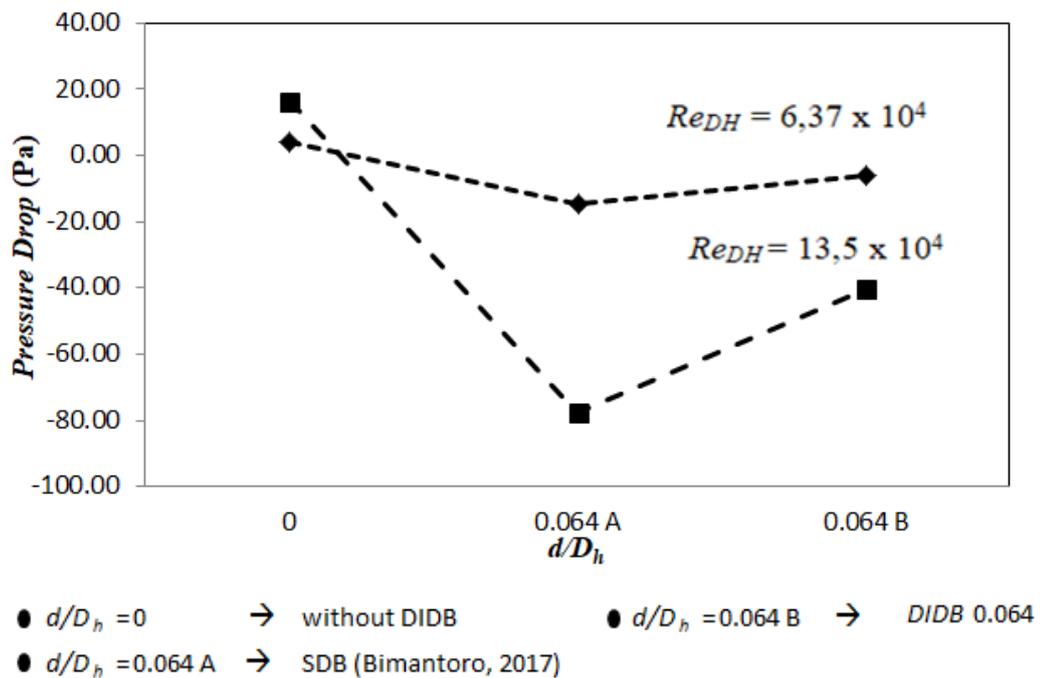
*Reynolds Number*  $6.37 \times 10^4$ ,  $13.5 \times 10^4$ .

Gambar 4.56 menunjukkan perbandingan hasil *pressure drop* pada section inlet dan outlet upstream duct. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih kecil daripada yang menggunakan *DIDB* maupun *SDB* (Bimantoro, 2017). *Pressure drop* tertinggi terjadi pada variasi *SDB* (Bimantoro, 2017) pada kedua nilai *Reynolds Number*. Adanya *SDB* dan *DIDB* mempengaruhi nilai *pressure drop* yang semakin meningkat, hal ini terjadi karena akibat dari penambahan *DIDB* yang membuat aliran udara pada sisi outlet upstream duct terganggu yang mempengaruhi nilai *pressure* pada sisi outlet karena luas efektif aliran melewati saluran mengecil.



Gambar 4.56 Perbandingan *Pressure Drop Upstream Duct* dengan *elbow 90°*.  
*Reynolds Number*  $6.37 \times 10^4$ ,  $13.5 \times 10^4$ .

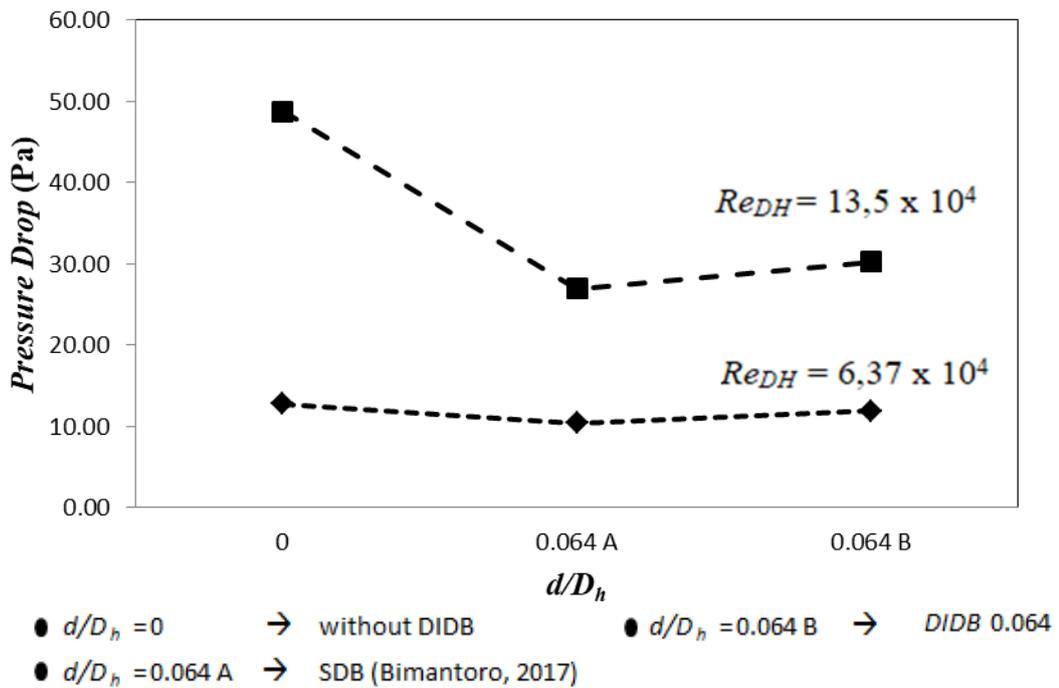
Gambar 4.57 menunjukkan perbandingan hasil *pressure drop* pada section inlet dan outlet elbow 90°. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih besar daripada yang menggunakan *DIDB* maupun *SDB* (Bimantoro, 2017). *Pressure drop* terendah terjadi pada variasi *SDB* (Bimantoro, 2017) pada kedua nilai *Reynolds Number*. Adanya pengganggu membuat nilai *pressure drop* menjadi turun, ini terjadi karena dengan adanya pengganggu kecepatan aliran pada elbow semakin meningkat dan momentum pada aliran pun semakin meningkat yang membuat separasi aliran mengecil sehingga *pressure drop* tereduksi.



Gambar 4.57 Perbandingan *Pressure Drop Elbow 90°*.

*Reynolds Number*  $6.37 \times 10^4$ ,  $13.5 \times 10^4$ .

Gambar 4.58 menunjukkan perbandingan hasil *pressure drop* pada section inlet dan outlet downstream duct. Nilai *pressure drop* tanpa *DIDB* hasilnya lebih besar daripada yang menggunakan *DIDB* maupun *SDB* (Bimantoro, 2017). *Pressure drop* terendah terjadi pada variasi *SDB* (Bimantoro, 2017) pada kedua nilai *Reynolds Number*. Adanya pengganggu membuat nilai *pressure drop* menjadi turun, ini terjadi karena dengan adanya pengganggu kecepatan aliran pada *elbow* semakin meningkat dan momentum pada aliran pun semakin meningkat yang membuat separasi aliran mengecil yang membuat *pressure drop* pada downstream duct turun.



Gambar 4.58 Perbandingan *Pressure Drop Downstream Duct*.

*Reynolds Number*  $6,37 \times 10^4$ ,  $13,5 \times 10^4$ .

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi numerik sehingga diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Perbedaan setiap variasi model uji tidak begitu signifikan baik dari *ducting* tanpa maupun dengan *DIDB*. Dengan adanya penambahan *DIDB* aliran lebih kuat mengarah ke sisi *outer wall* sehingga aliran utama tidak bisa mengatasi *adverse pressure* yang diakibatkan oleh kelengkungan *elbow*.
- 2) Kontur *pathline* yang terbentuk pada setiap variasi berbeda dimana dengan efek penambahan *DIDB* ternyata membuat *base vortex* yang terbentuk semakin kuat sehingga *pressure drop* yang terjadi semakin besar.
- 3) Nilai *pressure drop* yang terjadi sepanjang aliran yang melewati *ducting* mengalami peningkatan seiring dengan penambahan variasi *DIDB*. Hal ini disebabkan gesekan yang cukup kuat antara partikel fluida dengan *wall* dari *DIDB* serta efek dari pengecilan luas penampang *ducting*.
- 4) Nilai koefisien tekanan didapat karena adanya perbedaan tekanan akibat kelengkungan di sisi *inner* dan *outer elbow*. Nilai koefisien tekanan yang ditimbulkan oleh variasi geometri *DIDB* cukup besar dibandingkan tanpa adanya *DIDB*.

### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil studi 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) Memperpanjang saluran *upstream* hingga mencapai 25 sampai dengan 40  $D_h$ , agar dapat terlihat sejauh mana aliran mencapai *fully developed*.
- 2) Meletakkan *DIDB* pada *elbow*, diharapkan dengan adanya *DIDB* dapat menunda terjadinya separasi aliran.
- 3) *Near wall treatment* pada *turbulence model* yang sebaiknya digunakan yaitu *Enhanced Wall Treatment*, agar *mesh* didekat dinding lebih rapat.

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi numerik sehingga diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- 5) Perbedaan setiap variasi model uji tidak begitu signifikan baik dari *ducting* tanpa maupun dengan *DIDB*. Dengan adanya penambahan *DIDB* aliran lebih kuat mengarah ke sisi *outer wall* sehingga aliran utama tidak bisa mengatasi *adverse pressure* yang diakibatkan oleh kelengkungan *elbow*.
- 6) Kontur *pathline* yang terbentuk pada setiap variasi berbeda dimana dengan efek penambahan *DIDB* ternyata membuat *base vortex* yang terbentuk semakin kuat sehingga *pressure drop* yang terjadi semakin besar.
- 7) Nilai *pressure drop* yang terjadi sepanjang aliran yang melewati *ducting* mengalami peningkatan seiring dengan penambahan variasi *DIDB*. Hal ini disebabkan gesekan yang cukup kuat antara partikel fluida dengan *wall* dari *DIDB* serta efek dari pengecilan luas penampang *ducting*.
- 8) Nilai koefisien tekanan didapat karena adanya perbedaan tekanan akibat kelengkungan di sisi *inner* dan *outer elbow*. Nilai koefisien tekanan yang ditimbulkan oleh variasi geometri *DIDB* cukup besar dibandingkan tanpa adanya *DIDB*.

### 5.2 Saran

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

- 4) Memperpanjang saluran *upstream* hingga mencapai 25 sampai dengan 40  $D_h$ , agar dapat terlihat sejauh mana aliran mencapai *fully developed*.
- 5) Meletakkan *DIDB* pada *elbow*, diharapkan dengan adanya *DIDB* dapat menunda terjadinya separasi aliran.
- 6) *Near wall treatment* pada *turbulence model* yang sebaiknya digunakan yaitu *Enhanced Wall Treatment*, agar *mesh* didekat dinding lebih rapat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bimantoro, Abdullah. 2017. **Studi Numerik Aliran melalui Square Duct dan Square Elbow 90° dengan Square Disturbance Body pada Inner Upstream Duct.** Surabaya : Teknik Mesin.
- Cheng, D.Y. 1994. **Laminar Flow Elbow System and Method. U.S. Patent Documents, No. 5,323,661.**
- Dutta, Prasun & Nandi, Nityananda. 2015. **Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends.** India : Department of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Indian Institute of Engineering Science and Technology, Shibpur.
- Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition.** New York : John Wiley & Sons Inc.
- Yalin Li, Xikun Wang, Shouqi Yuan, Soon Keat Tan. 2016. “**Flow development in curved rectangular ducts with continuously varying curvature**”, **Experimental Thermal and Fluid Science, 75 1-15.**
- Miller, D.S. 1990. **Internal Flow System, 2<sup>nd</sup> edition.** Bedford: BHRA.
- Mahir, Necati., 2009. “**Three – dimensional Flow Around A Square Cylinder Near A Wall**” **Ocean Engineering 2009; 36: 357-367.**
- Nakayama Y., dan Boucher R.F. 1999. **Introduction to Fluid Mechanics. Oxford: Butterworth-Heinemann.**
- Ozgoren, Muammer. 2006. **Flow Structure in the Downstream of Square and Circular Cylinders.** Turkey : Department of Mechanical Engineering.

Rup, K., & Sarna, P. 2011. **Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow**. Cracow: Elsevier.

## LAMPIRAN

Tabel 1. *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Ducting*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)
TANPA IDB	-0.32	-24.94	24.62	-1.16	-96.12	94.96
DIDB 0.064	-0.39	-36.41	36.02	-1.54	-118.73	117.20
DIDB 0.08	-0.49	-37.34	36.85	-1.17	-123.69	122.51
DIDB 0.1	-0.57	-38.77	38.20	-1.93	-130.33	128.41

Tabel 2. *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Upstream*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)
TANPA IDB	-0.32	-8.01	7.69	-1.16	-30.92	29.76
DIDB 0.064	-0.39	-30.31	29.92	-1.54	-128.58	127.04
DIDB 0.08	-0.49	-36.45	35.96	-1.17	-156.21	155.04
DIDB 0.1	-0.57	-43.09	42.51	-1.93	-185.58	183.66

Tabel 3. *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Elbow 90°*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)
TANPA IDB	-8.01	-12.18	4.17	-30.92	-47.35	16.43
DIDB 0.064	-30.31	-24.47	-5.84	-128.58	-88.47	-40.11
DIDB 0.08	-36.45	-25.76	-10.69	-156.21	-94.84	-61.37
DIDB 0.1	-43.09	-27.75	-15.33	-185.58	-104.03	-81.55

Tabel 4. *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Downstream*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)
TANPA IDB	-12.18	-24.94	12.75	-47.35	-96.12	48.77
DIDB 0.064	-24.47	-36.41	11.94	-88.47	-118.73	30.27
DIDB 0.08	-25.76	-37.34	11.58	-94.84	-123.69	28.85
DIDB 0.1	-27.75	-38.77	11.01	-104.03	-130.33	26.30

Tabel 5. Perbandingan *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Ducting*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$
TANPA IDB	-0.32	-24.94	24.62	-1.16	-96.12	94.96
SDB (Bimantoro, 2017)	-55.25	-92.83	37.58	-217.70	-340.58	122.89
DIDB 0.064	-0.39	-36.41	36.02	-1.54	-118.73	117.20

Tabel 6. Perbandingan *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Upstream*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$
TANPA IDB	-0.32	-8.01	7.69	-1.16	-30.92	29.76
SDB (Bimantoro, 2017)	-55.25	-95.17	39.92	-217.70	-391.08	173.38
DIDB 0.064	-0.39	-30.31	29.92	-1.54	-128.58	127.04

Tabel 7. Perbandingan *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Elbow 90°*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$
TANPA IDB	-8.01	-12.18	4.17	-30.92	-47.35	16.43
SDB (Bimantoro, 2017)	-95.17	-80.46	14.70	-391.08	-313.62	77.46
DIDB 0.064	-30.31	-24.47	5.84	-128.58	-88.47	40.11

Tabel 8. Perbandingan *Pressure Drop Section Inlet dan Outlet Downstream*

Variasi	$R_{edh1} = 6,37 \times 10^4$			$R_{edh2} = 13,5 \times 10^4$		
	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$	$P_{inlet} (Pa)$	$P_{outlet} (Pa)$	$\Delta P (Pa)$
TANPA IDB	-12.18	-24.94	12.75	-47.35	-96.12	48.77
SDB (Bimantoro, 2017)	-80.46	-90.83	10.37	-313.62	-340.58	26.96
DIDB 0.064	-24.47	-36.41	11.94	-88.47	-118.73	30.27

## RIWAYAT PENULIS



Rizka Nur Faila merupakan nama lengkap dari penulis tesis ini. Penulis yang terlahir di Lamongan pada 23 Januari 1993 ini merupakan anak satu-satunya dari pasangan Bapak Mahmud dan Ibu Samiati. Penulis memulai pendidikan formalnya mulai tahun 1999 di SDN Ledokkulon III Bojonegoro. Setelah lulus tahun 2005 penulis melanjutkan ke SMP Negeri 1 Bojonegoro dan kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 1 Bojonegoro pada tahun 2008. Setelah menyelesaikan studi tingkat menengah atas, penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin FTI ITS dan mendapatkan beasiswa BIDIK MISI pada tahun 2011.. Penulis melanjutkan pendidikan nya tahun 2015 pada Program Studi Magister melalui beasiswa LPDP.

Harapan besar penulis adalah bisa memanfaatkan usia yang masih muda ini untuk terus belajar dan berkarya. Belajar sampai akhir menutup mata, berkarya hingga dikenang sepanjang masa, dan beribadah hingga nyawa tidak lagi ada. Akhir kata bila ada kritik dan saran bisa disampaikan melalui surat elektronik pada rizkafaila.m54@gmail.com.

*~ halaman ini sengaja dikosongkan ~*