



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT*
DAN *ELBOW 90°* DENGAN VARIASI DIAMETER
INLET DISTURBANCE BODY ($d/D_h = 0,064$; $0,08$
DAN $0,1$).**

ELFANDY PUTRA NUGRAHA

NRP 2112 100 155

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

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



TUGAS AKHIR – TM141585

STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *ELBOW 90°* DENGAN VARIASI DIAMETER *INLET DISTURBANCE BODY* ($d/D_h = 0,064; 0,08$ DAN $0,1$).

ELFANDY PUTRA NUGRAHA
NRP. 2112 100 155

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

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



FINAL PROJECT – TM141585

**NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH
SQUARE DUCT AND ELBOW 90° WITH INLET
DISTURBANCE BODY IN VARIATION OF
DIAMETER ($d/D_h = 0,064; 0,08$ AND $0,1$).**

ELFANDY PUTRA NUGRAHA
NRP. 2112 100 155

Advisor Lecturer :
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

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

**STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT*
DAN *ELBOW 90°* DENGAN VARIASI DIAMETER
INLET DISTURBANCE BODY
($d/D_h = 0,064; 0,08$ dan $0,1$).**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

ELFANDY PUTRA NUGRAHA
NRP. 2112 100 155

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
3. Vivien Suphandani, ST, M.Eng, PhD (Penguji II)
NIP. 198105292003122001
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, Ph.D, M.Eng (Penguji III)
NIP. 197512062005011002

SURABAYA

JULI, 2017

STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *ELBOW 90°* DENGAN VARIASI DIAMETER *INLET DISTURBANCE BODY* ($d/D_h = 0,064; 0,08$ dan $0,1$).

Nama Mahasiswa : Elfandy Putra Nugraha
NRP : 2112 100 155
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

ABSTRAK

Listrik merupakan kebutuhan utama, dapat dilihat dengan banyaknya *power plant* yang bekerja. Suatu *power plant* mempunyai beberapa sistem utama untuk pembangkitan listrik diantaranya ialah sistem saluran udara. Saluran udara berfungsi mengalirkan suatu fluida dari suatu tempat ke tempat lain. Beberapa komponen utama sistem saluran udara ialah *straight duct*, *fitting*, serta penambahan aksesoris seperti *damper*, *guide vane*, maupun bodi silinder pengganggu. Tetapi pada kondisi aktual, penggunaan aksesoris serta *fitting* seperti *elbow 90°* ini menyebabkan bertambahnya *pressure drop* serta *head losses* akibat adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah melewati *fitting* serta penambahan suatu aksesoris. Pemasangan bodi silinder 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 dilakukan secara numerik 3D dimana model turbulensi yang digunakan yaitu *k-ε standard* dengan batasan aliran fluida bersifat *incompressible flow*, *viscous* serta *steady flow*. Model uji berupa sistem saluran udara berpenampang bujur sangkar yang terdiri dari, sisi *ducting* $D_h = 125$ mm, *upstream duct (straight duct)* dengan panjang $7D_h$, variasi bodi silinder pengganggu $d/D_h = 0,064; 0,08$ dan $0,1$; *elbow 90°* dengan R/D_h

=1,5 serta *downstream duct (straight duct)* dengan panjang $15D_h$, *Re* yang digunakan yaitu $3,94 \times 10^4$, $7,88 \times 10^4$ dan $1,34 \times 10^5$. Pengukuran parameter dilakukan pada setiap *cross section* aliran di sepanjang *downstream duct* serta *elbow 90°*.

Dari hasil studi numerik yang dilakukan didapatkan hasil berupa visualisasi aliran seperti profil kecepatan, kontur kecepatan, serta kontur *pathline*, dimana hasil tersebut menunjukkan dengan adanya penambahan *IDB* mengakibatkan profil kecepatan pada *elbow* lebih tinggi di sisi *outer wall* berbeda halnya tanpa *IDB* yang masih berada pada *inner wall*. *Pressure drop* yang ditimbulkan dengan penambahan *IDB* tiap variasi kecepatan mengalami kenaikan yang cukup signifikan akibat adanya gesekan yang cukup kuat antara partikel fluida dengan dinding *ducting*. Selain itu terdapat *gap* yang cukup besar pada *coefficient of pressure* di *elbow* tanpa dan dengan *IDB*. Dapat disimpulkan dengan penambahan *IDB* menimbulkan *pressure drop* yang terjadi semakin tinggi serta *friction* yang cukup kuat pada *Re* tinggi.

Kata kunci: *square duct, elbow 90°, inlet disturbance body, pressure drop, numerik.*

**NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH
SQUARE DUCT AND ELBOW 90° WITH INLET
DISTURBANCE BODY IN VARIATION OF
DIAMETER**

($d/D_h = 0,064; 0,08$ AND $0,1$).

Name : Elfandy Putra Nugraha
NRP : 2112 100 155
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisor Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

ABSTRACT

Many power plant s have main system to gain some electricity, among them are ducting system. The fuction of ducting system is to circulate air from first position to second position. The component of ducting system is like straight duct, fitting, accessories such as damper, guide vane or disturbance body. But in the actual condition, ducting system with accessories and fitting such as elbow caused pressure drop, headlosses, separation loss and secondary flow. One of the effort to reduce the pressure drop inside elbow is add a body disturbance called inlet disturbance body (IDB).

This research did as a 3D numeric with turbulence model $k-\epsilon$ standard with some limits such as incompressible flow, viscous and steady flow. This numerical studi use square ducting system with hydraulic diameter ($D_h = 125$ mm), upstream duct (straight duct) with length $7D_h$, variation of diameter $d/D_h = 0,064; 0,08$ and $0,1$, elbow 90° with curvature ratio $R/D_h = 1,5$ and the last downstream duct (straight duct) with length $15D_h$, variation of Re $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$ and $1,34 \times 10^5$. In each cross section of downstream duct and elbow 90° is done by parameter measurement's.

The result of this numerical study shows visualization of flow such velocity profile, velocity contour, and pathline contour.

The result shows that the placement of IDB caused higher velocity profile in outer elbow different from without IDB, velocity profile without IDB higher in inner wall so that with placement of IDB cant resolve adverse pressure caused curvature ratio of elbow. Pressure drop with placement of IDB have increase because friction between particle of fluid and wall. Other than that there is gap in coefficient of pressure in elbow with and without IDB. So the result in the end, ducting with IDB have effect to get more pressure drop than without IDB dan friction from higher Re

Keyword : square duct, elbow 90°, inlet disturbance body, pressure drop, numerical.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, khususnya Bapak Edih Setiadi dan Ibu Liliek Sutrisnawati yang senantiasa mendoakan, mendorong, dan menyemangati penulis selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
2. Saudari Penulis, Elvany Tresna Grahari. Atas doa serta motivasinya.
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT yang selalu memberikan bimbingan, arahan serta motivasi dalam penulisan Tugas Akhir ini.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD., Vivien Suphandani, ST., M.Eng, Ph.D., dan Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.
5. Sutrisno selaku karyawan Laboratorium Mekanika Fluida dan Mesin Fluida yang telah memberikan dukungan kepada penulis.
6. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
7. Rekan pengerjaan Tugas Akhir penulis, Gigih, William, Yudan, yang bersedia berjuang bersama untuk Tugas Akhir ini serta Mas Randi yang bersedia membantu mengajari simulasi.

8. Teman-teman angkatan M55 yang senantiasa memberi motivasi, serta meninggalkan banyak cerita indah bagi penulis selama ini.
9. Teman-teman Lab Mekanika Fluida terutama Mas Copet, Imem, Mas Ayub, Mas Tsabit, Christo, Bader, Ridho, Rei, Elman yang senantiasa memberikan semangat dan motivasi untuk segera menyelesaikan perkuliahan di kampus Teknik Mesin ITS.
10. Teman-teman Himpunan Mahasiswa Mesin terutama Departemen Kewirausahaan yang senantiasa memberikan motivasi dan mengingatkan penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan di ITS.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

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

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	5
1.3. Batasan Masalah	6
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Manfaat Penelitian	7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Klasifikasi fluida	9
2.1.1 Aliran <i>viscous</i>	9
2.1.2 Aliran laminar dan turbulen	10
2.1.3 <i>Incompressible flow</i>	11
2.1.4 <i>Internal flow</i>	11
2.2 Karakteristik aliran fluida dalam pipa	12
2.2.1 Separasi	12
2.2.2 Aliran sekunder	13
2.3 Persamaan <i>Euler</i> dalam koordinat <i>streamline</i>	14
2.4 Model turbulensi	15
2.4.1 Model $k-\varepsilon$	15
2.4.2 Model $k-\omega$	16
2.4.3 Model <i>RSM</i>	17
2.5 <i>Boundary condition</i>	17
2.6 Penelitian terdahulu	18
2.6.1 Karakteristik aliran melalui <i>ducting</i> dengan <i>elbow</i>	18

2.6.2 Pengaruh variasi <i>gap</i> serta jarak silinder terhadap karakteristik aliran	29
--	----

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Geometri benda uji	33
3.2 Metode numerik	35
3.2.1 Tahap <i>pre-processing</i>	36
3.2.2 Tahap <i>processing</i> dan <i>post-processing</i>	38
3.3 Langkah-langkah penelitian	43
3.4 Analisa <i>grid independency</i>	44
3.5 <i>Flowchart</i> penelitian	48

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang <i>ducting</i> dengan kontur kecepatan	49
4.1.1 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang <i>ducting</i> dengan kontur kecepatan (tanpa dan dengan <i>IDB</i> $d/D_h = 0,064$)	50
4.1.2 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang <i>ducting</i> dengan kontur kecepatan (tanpa dan dengan <i>IDB</i> $d/D_h = 0,08$)	56
4.1.3 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang <i>ducting</i> dengan kontur kecepatan (tanpa dan dengan <i>IDB</i> $d/D_h = 0,1$)	61
4.2 Perbandingan vektor kecepatan dan kontur <i>pathline</i> setiap <i>surface cross-section</i> tanpa dan dengan <i>IDB</i>	67
4.2.1 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur <i>pathline</i> setiap <i>surface cross-section</i> tanpa <i>IDB</i>	67
4.2.2 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur <i>pathline</i> setiap <i>surface cross-section</i> <i>IDB</i> $d/D_h = 0,064$	70
4.2.3 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur <i>pathline</i> setiap <i>surface cross-section</i> <i>IDB</i> $d/D_h = 0,08$	73
4.2.4 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur <i>pathline</i> setiap <i>surface cross-section</i> <i>IDB</i> $d/D_h = 0,1$	76
4.3 Perbandingan data pada setiap variasi model uji <i>ducting</i> ..	79

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....101

5.2 Saran102

DAFTAR PUSTAKA103**LAMPIRAN****BIODATA PENULIS**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi jenis fluida	9
Gambar 2.2	Aliran <i>viscous</i> pada silinder	10
Gambar 2.3	(A) Aliran laminar dan (B) turbulen dalam perpipaan	10
Gambar 2.4	<i>Internal flow</i> dalam pipa	12
Gambar 2.5	Separasi aliran pada <i>curved pipe</i>	13
Gambar 2.6	Aliran sekunder	13
Gambar 2.7	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> ..	14
Gambar 2.8	(a) <i>Geometry ducting</i> (b) Bentuk <i>mesh</i> serta Y^+ ..	18
Gambar 2.9	Perbandingan profil kecepatan dari hasil simulasi dan eksperimen $x/D_h = 1.0$ ($z/D_h = 0.0$)	19
Gambar 2.10	Perbandingan koefisien tekanan paad sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen ..	20
Gambar 2.11	Geometri <i>ducting</i> berpenampang silinder	21
Gambar 2.12	<i>Computational grid meshing</i>	21
Gambar 2.13	<i>Velocity profile</i> pada beberapa posisi pengambilan data dengan variasi Re serta rasio kelengkungan ..	22
Gambar 2.14	Skema penelitian serta gambar detail peletakan <i>inlet disturbance body</i>	23
Gambar 2.15	Variasi jarak <i>inlet disturbance body</i>	23
Gambar 2.16	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan variasi jarak <i>inlet disturbance body</i> pada $Re = 3,97 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$	24
Gambar 2.17	Visualisasi <i>velocity profile</i> bidang <i>horizontal</i> pada jarak <i>cross section</i> $14 D_h$	25
Gambar 2.18	Variasi <i>gap inlet disturbance body</i>	25
Gambar 2.19	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan variasi <i>gap inlet disturbance body</i> pada $Re = 3,97 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$	26
Gambar 2.20	Visualisasi <i>velocity profile</i> bidang <i>horizontal</i> pada jarak <i>cross section</i> $13 D_h$	27
Gambar 2.21	Geometri dan koordinat penelitian	27

Gambar 2.22	<i>Secondary flow</i> pada $Ar = 1$. A. <i>Double line</i> , B. <i>Spiral line</i> , C. <i>Involute line</i>	28
Gambar 2.23	<i>Geometry</i> silinder sirkular $Ar = 1$	29
Gambar 2.24	<i>Mean streamwise velocity profile</i> pada $X = 100, 150$ dan 200 mm	30
Gambar 2.25	<i>Streamwise turbulence intensity profiles</i> pada $X = 100, 150$ dan 200 mm	30
Gambar 2.26	Distribusi tekanan sekitar silinder dan plat (a) $G/D = 0$ (b) $G/D = 2$	31
Gambar 2.27	<i>Flow pattern</i> pada $Re = 2,5 \times 10^4$. (a) $G/D = 0$ (b) $G/D = 2$	32
Gambar 3.1	Skema instalasi	34
Gambar 3.2	Gambar detail posisi penempatan bodi silinder pengganggu	35
Gambar 3.3	<i>Meshing</i> tanpa <i>IDB (isometric)</i>	36
Gambar 3.4	<i>Meshing square duct</i> tanpa <i>IDB</i> (atas)	37
Gambar 3.5	<i>Meshing square duct</i> dengan <i>IDB</i> $d/D_h = 0,064$ (isometric)	37
Gambar 3.6	<i>Meshing square duct</i> dengan <i>IDB</i> $d/D_h = 0,064$ (atas)	38
Gambar 3.7	Domain pemodelan <i>square duct</i>	40
Gambar 3.8	Posisi pengambilan data	42
Gambar 3.9	Hasil komputasi variasi <i>mesh</i> D dan 6 model turbulensi ($x/D_h = 1$)	45
Gambar 3.10	Penyimpangan antar jumlah <i>mesh</i> dengan tinjauan $V_{average}$	47
Gambar 3.11	<i>Flowchart</i> penelitian numerik	48
Gambar 4.1	Visualisasi profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran bidang <i>horizontal</i> (a) tanpa dan (b) dengan <i>IDB</i> $d/D_h = 0,064$	51
Gambar 4.2	Grafik profil kecepatan bidang <i>horizontal</i> tanpa dan dengan <i>IDB</i> $d/D_h = 0,064$	54

- Gambar 4.3 Visualisasi profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran bidang *horizontal* (a) tanpa dan (b) dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ 57
- Gambar 4.4 Grafik profil kecepatan bidang *horizontal* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ 60
- Gambar 4.5 Visualisasi profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran bidang *horizontal* (a) tanpa dan (b) dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ 63
- Gambar 4.6 Grafik profil kecepatan bidang *horizontal* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ 66
- Gambar 4.7 Visualisasi *pathline* sisi *upstream* $3D_h$ 67
- Gambar 4.8 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline square ducting* bidang *horizontal* (tanpa *IDB*)69
- Gambar 4.9 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline square ducting* bidang *horizontal* ($d/D_h = 0,064$) 72
- Gambar 4.10 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline square ducting* bidang *horizontal* ($d/D_h = 0,08$) ..75
- Gambar 4.11 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline square ducting* bidang *horizontal* ($d/D_h = 0,1$)78
- Gambar 4.12 *Pressure drop square duct* dengan *elbow* 90° . Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$ dan $0,1$ 81
- Gambar 4.13 *Pressure drop upstream square duct*. Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$; $0,1$ 84
- Gambar 4.14 *Pressure drop elbow* 90° . Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$; $0,1$ 86
- Gambar 4.15 *Pressure drop downstream square duct*. Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$; $0,1$ 88
- Gambar 4.16 Grafik *coefficient of pressure*. *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$ dan $0,1$ 89

Gambar 4.17 Profil kecepatan aliran tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 1$ 92

Gambar 4.18 *Pathline surface* tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 1$ 93

Gambar 4.19 Profil kecepatan aliran tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 14$ 95

Gambar 4.20 *Pathline surface* tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 14$ 96

Gambar 4.21 Perbandingan profil kecepatan numerik dan eksperimen (**Ramadan,2017**) tanpa *IDB* 98

Gambar 4.22 Perbandingan profil kecepatan numerik dan eksperimen (**Ramadan,2017**) dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ 99

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Urutan langkah penelitian	43
Tabel 3.2	Jumlah <i>mesh nodes</i> dan <i>cells</i> variasi model uji	44
Tabel 3.3	Penyimpangan hasil eksperimen dengan hasil numerik ditinjau dari $V_{average}$ pada $x/D_h = 1$	46
Tabel 4.1	<i>Pressure drop section inlet</i> dan <i>outlet</i> pada $Re = 3,97 \times 10^4$	79
Tabel 4.2	<i>Pressure drop section inlet</i> dan <i>outlet</i> pada $Re = 8,74 \times 10^4$	80
Tabel 4.3	<i>Pressure drop section inlet</i> dan <i>outlet</i> pada $Re = 13,5 \times 10^4$	80
Tabel 4.4	<i>Pressure drop section upstream</i> pada $Re = 3,97 \times 10^4$	82
Tabel 4.5	<i>Pressure drop section upstream</i> pada $Re = 8,74 \times 10^4$	83
Tabel 4.6	<i>Pressure drop section upstream</i> pada $Re = 13,5 \times 10^4$	83
Tabel 4.7	<i>Pressure drop section elbow</i> pada $Re = 3,97 \times 10^4$	84
Tabel 4.8	<i>Pressure drop section elbow</i> pada $Re = 8,74 \times 10^4$	85
Tabel 4.9	<i>Pressure drop section elbow</i> pada $Re = 13,5 \times 10^4$	85
Tabel 4.10	<i>Pressure drop section downstream</i> pada $Re = 3,97 \times 10^4$	86
Tabel 4.11	<i>Pressure drop section downstream</i> pada $Re = 8,74 \times 10^4$	87

Tabel 4.12 *Pressure drop section downstream pada $Re = 13,5 \times 10^4$* 87

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi yang sangat pesat dewasa ini, listrik merupakan salah satu kebutuhan vital, dapat dibuktikan dengan banyaknya pusat pembangkit tenaga listrik (*power plant*) yang dibangun, salah satunya adalah *coal fired power plant* (PLTU berbahan bakar batu bara). *Coal fired power plant* merupakan pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi panas, serbuk batu bara dibakar di dalam *boiler* untuk menghasilkan uap, uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang dikopel dengan *generator* listrik sehingga menghasilkan energi listrik. Komponen utama *coal fired power plant* (PLTU batu bara) diantaranya adalah ketel uap (*boiler*). Pada proses pembakaran di *boiler* dibutuhkan udara sebagai bahan baku pembakaran maupun sebagai alat transportasi serbuk batu bara (*pulverizer coal*). Untuk mengalirkan udara tersebut suatu *power plant* mempunyai sistem perpipaan (*piping system*) dan sistem saluran udara (*ducting system*).

Berbagai komponen dalam pembuatan sistem saluran udara diantaranya ialah saluran udara lurus (*straight ducting*), sambungan (*fitting*) berfungsi untuk menghubungkan serta menyambungkan saluran satu dengan saluran lain, katup (*valve*) untuk membuka maupun menutup saluran udara, *fan* untuk menghisap serta menghembuskan udara pada sistem saluran udara dan *elbow 90°* yang berfungsi untuk membelokkan arah aliran. Aliran yang melintasi sistem saluran udara dengan menambahkan *elbow* akan terjadi penurunan tekanan lebih besar daripada aliran yang melintasi sistem saluran udara lurus dengan kecepatan *free stream* yang sama.

Adanya penurunan tekanan yang besar pada sistem saluran udara dengan menggunakan *elbow* mengakibatkan kerugian energi (*head losses*) yang besar. Kerugian energi akan

meningkat sehingga daya listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan *fan* (elektro motor) akan semakin besar. Beberapa hal yang mempengaruhi terjadinya penurunan tekanan dan *head losses* pada saluran *elbow* ialah yang pertama jari jari kelengkungan *elbow*, yang kedua ialah gesekan (*friction losses*) antara aliran fluida dengan dinding (*wall*), gesekan bukan hanya terjadi pada *elbow* tetapi dapat terjadi pada saluran udara lurus (*straight ducting*), yang ketiga ialah kerugian akibat separasi, terjadi pada aliran yang disimulasikan atau dilihat pada 2D serta yang terakhir ialah aliran kerugian akibat sekunder (*secondary flow*), terjadi pada aliran yang disimulasikan atau dilihat pada 3D.

Separasi terjadi akibat momentum aliran yang tidak mampu lagi untuk mengatasi tekanan balik (*adverse pressure*) serta gesekan pada dinding (*wall*) sehingga aliran akan berbalik arah dari aliran utamanya dan akan terbentuk *vortex* yang dapat mengurangi energi aliran. *Secondary flow* (aliran sekunder) terjadi akibat perbedaan distribusi tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall* pada aliran yang melintasi *elbow*, perbedaan distribusi tekanan sisi *outer wall* lebih besar dibandingkan dengan sisi *inner wall* sehingga aliran dari sisi *outer wall* akan bergerak menuju *inner wall*, pergerakan aliran fluida tersebut mengakibatkan aliran yang akan melintasi *elbow* akan terhambat.

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 silinder (*inlet disturbance body*) pada sisi *inner wall* dengan jarak tertentu. Penambahan suatu bodi pengganggu berbentuk silinder diharapkan dapat menunda terjadinya aliran terseparasi pada *elbow*, sehingga momentum aliran yang terjadi semakin besar dan dapat melawan tekanan balik (*adverse pressure*), adanya penambahan bodi pengganggu berbentuk silinder diharapkan dapat meningkatkan kualitas pola aliran menjadi lebih turbulen sehingga dapat mengurangi *pressure drop*.

Beberapa penelitian terdahulu membahas aliran melalui saluran udara dalam studi eksperimen maupun numerik, diantaranya **Rup & Sarna (2011)** membahas analisa karakteristik aliran pada *square duct* dengan penambahan *elbow* 90° . Dimensi *square duct* 80×80 mm dengan radius kelengkungan sebesar $R/D_h = 2$, $D_h = 80$ mm serta $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm, simulasi ini dilakukan pada $Re = 40000$ menggunakan model turbulen *RSM (Reynolds stress model)*. Terdapat 3 variasi kerapatan *mesh* yaitu $Vk = 553052$, $Vk = 1766079$ dan $Vk = 1034775$. Hasil yang didapatkan yaitu data berupa grafik profil kecepatan untuk lokasi $\phi = 30^\circ$, $\phi = 60^\circ$ serta $x/D_h = 1.0$ dari masing-masing variasi kerapatan *mesh* yang mendekati hasil eksperimen adalah *mesh III* ($Vk = 1034775$). Hasil lain yang didapatkan yaitu koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$).

Dutta & Nandi (2015) membahas pengaruh Re dan rasio jari jari kelengkungan terhadap aliran turbulen *single phase* di pipa lengkung/*elbow*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *CFD* sebagai bahan analisa, data-data yang tersedia yaitu rasio kelengkungan $R_c/D = 1$ sampai 5 dengan $Re = 1 \times 10^5$ sampai 10×10^5 . Model turbulensi yang digunakan yaitu *k- ϵ* model dengan metode *SIMPLE Geometry* yang digunakan yaitu diameter *inner* sebesar 0,01 m, panjang *inlet* $50D$ dan panjang *outlet* $20D$. Didapatkan hasil akselerasi kecepatan tertinggi pada rasio kelengkungan paling rendah yaitu $R_c/D = 1$ sehingga terbentuk aliran yang terseparasi. Sedangkan pada *downstream duct* akselerasi kecepatan pada sisi *inner* dalam mengembalikan menjadi bentuk *fully developed* terdapat pada rasio lengkung yang besar yaitu $R_c/D = 5$.

Choi & Lee (2000) melakukan penelitian mengenai karakteristik aliran yang melewati silinder elips dan silinder sirkular pada plat datar dengan berbagai variasi rasio *gap*, dimana $AR = 1$ merupakan silinder sirkular dengan $D = 21,2$ mm dan $L/D = 28,3$ pada variasi *gap* 0,2 sampai 0,5. Hasil yang didapatkan

yaitu harga C_p terkecil ada pada $G/B = 2$ sedangkan pada $G/B = 0$, C_p yang dihasilkan semakin besar pada sisi *inner*. Selain itu **Choi & Lee** juga melakukan variasi pada jarak $X = 100, 150$ dan 200 mm didapatkan hasil *turbulence intensity* pada jarak $X = 200$ mm lebih rendah daripada *turbulence intensity* pada jarak $X = 100$ mm. Semakin besar *turbulence intensity* yang dihasilkan maka momentum aliran dapat melawan *adverse pressure*.

Bearman & Zdravkovich (1978) melakukan eksperimen aliran melalui silinder sirkular dengan adanya penambahan plat datar, domain yang digunakan yaitu *wind tunnel* dan *smoke tunnel*, variasi $G/D = 0$ sampai 2 . Didapatkan hasil C_p pada gap terendah tidak terdistribusi secara menyeluruh tetapi apabila dilihat dalam tampilan 3D maka pada bagian *upper side body* C_p bernilai positif sedangkan pada bagian *low side body* bernilai negatif serta *vortex shedding* yang dihasilkan semakin besar. Pada $G/D = 2$ didapatkan hasil C_p yang terdistribusi dengan baik sehingga *vortex shedding* yang dihasilkan semakin kecil.

Studi eksperimen terbaru juga telah dilakukan oleh **Hardhian (2017)** mengenai pengaruh variasi jarak *inlet disturbance body* terhadap aliran melalui *square duct* dengan *elbow* 90° , domain yang digunakan yaitu *square duct* dengan diameter $D_h = 125$ mm, $g/d = 0,2$ dengan rasio kelengkungan *elbow* $R/D_h = 1,5$ dan variasi jarak *inlet disturbance body* ($l/D_h = 0,1 - 0,5$). Didapatkan hasil *pressure drop* terendah ada pada variasi jarak $l/D_h = 0,1$ serta pada jarak tersebut *recovery* aliran untuk mendekati *fully developed* paling baik diantara variasi jarak lainnya tetapi pada variasi jarak tersebut intensitas turbulensi pada sisi *inner outlet elbow* 90° dinilai cukup tinggi dibandingkan dengan variasi jarak $l/D_h = 0,4$ yang bernilai $8,07\%$. Selain itu hal yang sama juga dilakukan oleh **Pratama (2017)** dengan variasi yang berbeda yaitu variasi *gap inlet disturbance body*. Variasi yang digunakan yaitu variasi *gap* ($g/d = 0,1$ sampai $0,5$) pada jarak ($l/D_h = 0,1$). Didapatkan hasil variasi *gap* $= 0,2$ dapat menurunkan *pressure drop* dibanding dengan variasi *gap* lainnya, penurunan *pressure drop* terjadi pada $Re_{D_h} 8,74 \times 10^4$ selain itu

dalam hal *recovery* aliran lebih cepat terjadi tanpa adanya penambahan *IDB*, dengan adanya penambahan *IDB* dapat menyebabkan penundaan separasi aliran karena *shear layer* yang dihasilkan *IDB* memiliki intensitas turbulensi yang lebih tinggi sehingga mampu melawan *adverse pressure*.

Li et.al (2016) membahas mengenai aliran melintasi *curved rectangular duct* dengan variasi kelengkungan, domain yang digunakan yaitu *curved rectangular duct* dengan sudut 120° , 2 *straight duct* pada *inlet* dan *outlet* dengan panjang $20D_h$, 3 tipe kelengkungan yaitu *double circular line*, *spiral line* dan *involute line*, 3 *aspect ratio* ($Ar = 0,4; 1$ dan $2,3$) pada $Re = 2,4 \times 10^4 - 1,4 \times 10^5$. Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dan numerik, untuk penelitian numerik dilakukan secara 3D *incompressible flow* dengan model turbulensi *k- ω sst*, *boundary condition* yang digunakan yaitu *uniform flow* pada *inlet*, *no-slip boundary condition* pada *wall* serta *pressure outlet* pada *downstream*. Hasil yang didapatkan pada $Ar < 1$, *secondary flow* yang terbentuk ada 4 macam yaitu *base vortex* yang terbentuk pada setiap aliran yang melewati *rectangular cross section*, *split vortex* yang terbentuk dari *base vortex*, *ICW Dean vortex* yang terbentuk di tengah *inner wall* serta *corner region Dean vortex* yang terbentuk di sudut bawah/atas dari *wall*. Selain itu pada $Ar = 0,4$ *split base vortex* berpisah dari *inner part base vortex* menuju *ICW*, untuk $Ar = 1$ *split base vortex* berpisah dari *outer part base vortex* menuju *OCW* sedangkan pada $Ar = 2,3$ *split base vortex* tidak terbentuk.

1.2 Perumusan masalah

Aliran fluida yang melewati suatu saluran udara berpenampang bujur sangkar (*square duct*) dengan penambahan *elbow* selalu mengalami penurunan tekanan, penurunan tekanan terjadi karena adanya beberapa faktor yaitu akibat adanya gesekan antara partikel fluida dengan dinding pada saluran, separasi akibat tidak mampu menahan *adverse pressure*, serta aliran sekunder. Penambahan *inlet disturbance body* menghasilkan intensitas turbulensi yang besar pada *shear layer*

sehingga diharapkan dapat melawan *adverse pressure* dan *wall shear stress*.

Adapun rumusan masalah yang dibuat yaitu untuk mengetahui pengaruh interaksi aliran antara *square duct* dimana terdapat *inlet disturbance body* dengan variasi diameter (d/D_h) = 0,064; 0,08 dan 0,1 terhadap kelengkungan *elbow* 90°, maka dilakukan kajian numerik untuk mengetahui *pressure drop*, *coefficient of pressure* (C_p) serta fenomena aliran pada *square duct*.

1.3 Batasan masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan yang berisi tentang *variable* yang akan diteliti maupun *variable* yang akan diasumsikan sehingga bahasan tidak melebar dari tujuan utama. Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini :

1. Perangkat lunak yang digunakan dalam pemodelan *geometry* benda uji serta tahapan *pre-processing* dan tahapan *post-processing* menggunakan perangkat lunak *CFD* komersial.
2. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dengan profil kecepatan udara *uniform* pada sisi *inlet upstream*. Aliran fluida bersifat *incompressible flow*, *viscous* dan *steady flow*.
3. Temperatur fluida udara diasumsikan konstan, pada $T = 28^\circ$.
4. Aliran yang melintasi saluran udara memiliki *region* aliran turbulen.
5. Studi numerik dilakukan pada kecepatan 5, 11 dan 17 m/s.

1.4 Tujuan penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh interaksi aliran antara *square duct* dimana terdapat *inlet disturbance body* dengan variasi diameter (d/D_h) = 0,064; 0,08 dan 0,1 terhadap kelengkungan *elbow* 90°. Selain itu terdapat

tujuan khusus untuk menganalisa baik dalam bentuk kuantitatif maupun kualitatif, adapun tujuan khusus penelitian ini yaitu :

1. Mengetahui dan menganalisa *velocity profile* dan kontur kecepatan bidang *horizontal*.
2. Mengetahui dan menganalisa kontur *pathline* serta *velocity vector*.
3. Mengetahui dan menganalisa *pressure drop upstream duct, elbow 90°, downstream duct*, serta *inlet* dan *outlet ducting*.
4. Mengetahui dan menganalisa *coefficient of pressure elbow 90°*.

1.5 Manfaat penelitian

Adapun manfaat setelah melakukan penelitian kajian numerik ini yaitu :

1. Memberikan gambaran tentang fenomena aliran yang melewati saluran berpenampang bujur sangkar dimana pada sisi *inner upstream duct* terdapat *inlet body disturbance* dengan variasi diameter, beberapa fenomena aliran yang dapat dilihat yaitu *secondary flow* dan *velocity profile*.
2. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* yang terjadi apabila *square duct* dipasang *inlet body disturbance* dengan *square duct* yang tidak dipasang *inlet disturbance body*.
3. Memberikan penjelasan tentang pengaruh adanya *inlet body disturbance* pada sisi *inner upstream duct* dengan variasi diameter terhadap karakteristik aliran sepanjang *square duct*.

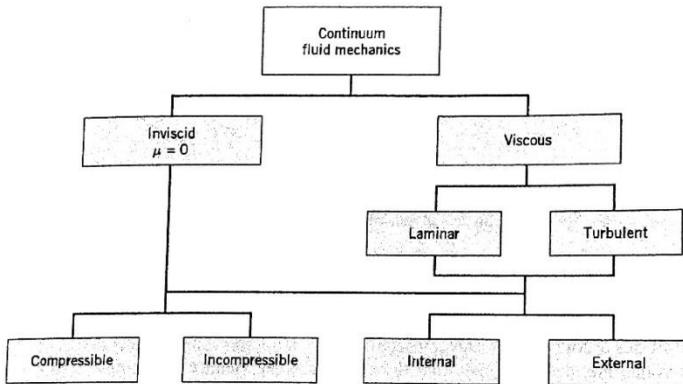
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang mendukung penelitian ini serta referensi pendukung tentang penelitian terdahulu yang terkait.

2.1 Klasifikasi fluida

Sulitnya menganalisa partikel berbentuk *liquid* maupun *gasses* secara mikroskopis, maka dilakukan pendekatan secara makroskopis dengan harapan mampu melihat karakter fluida yang dibahas, fluida harus diasumsikan sebagai *Fluid as continuum*, sebagai konsekuensinya bahwa seluruh *properties* fluida merupakan suatu fungsi dari kedudukan dan waktu. Klasifikasi jenis fluida diilustrasikan pada gambar 2.1.

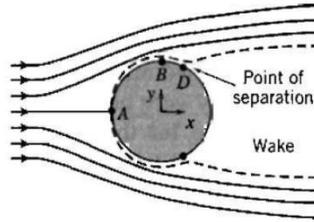


Gambar 2.1. Klasifikasi jenis fluida
(Fox dan Mc. Donald, 2011).

2.1.1. Aliran *viscous*

Aliran *viscous* adalah jenis aliran fluida yang memiliki kekentalan atau viskositas fluida ($\mu > 0$). Viskositas fluida berpengaruh saat fluida mengalir di pipa/saluran sehingga dapat menghasilkan tegangan geser pada dinding saluran tersebut.

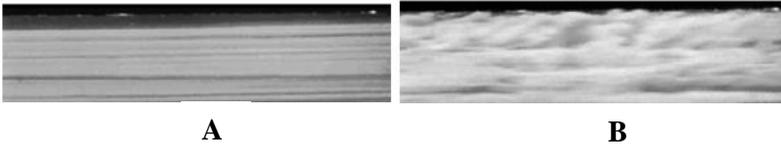
Aliran *viscous* pada silinder diilustrasikan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Aliran *viscous* pada silinder
(Fox dan Mc. Donald, 2011).

2.1.2. Aliran laminar dan turbulen

Aliran suatu fluida dibedakan menjadi dua tipe, yaitu aliran *laminar* dan aliran *turbulent*. Aliran dikatakan *laminar* apabila partikel-partikel fluida yang bergerak secara teratur dalam lapisan-lapisan, sedangkan aliran disebut *turbulent* apabila tiap partikel fluida bergerak secara acak. Aliran *laminar* dan *turbulent* diilustrasikan pada gambar 2.3. A dan B.



Gambar 2.3. (A) Aliran *laminar* dan (B) *turbulent* dalam perpipaan

(Cengel & Cimbala, 2006).

Kondisi aliran *laminar* atau *turbulent* dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds*. Bilangan *Reynolds* pada *ducting* dirumuskan pada persamaan 2.1.

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot Dh}{\mu} \quad (2.1)$$

dimana :

Re = bilangan *Reynold*

U_{ref} = kecepatan aliran fluida ($\frac{m}{s}$)

D_h = diameter dalam saluran (m)

μ = viskositas kinematis fluida ($\frac{Nm}{s}$)

2.1.3. *Incompressible flow*

Incompressible flow adalah aliran dimana variasi densitas dianggap konstan sehingga dapat diabaikan, aliran *incompressible* mempunyai bilangan *Mach number* (M) $< 0,3$ serta perubahan densitas $< 5\%$. Bilangan *Mach number* (M) dirumuskan pada persamaan 2.2.

$$M = \frac{\bar{V}}{c} \quad (2.2)$$

dimana :

M = bilangan *Mach number*.

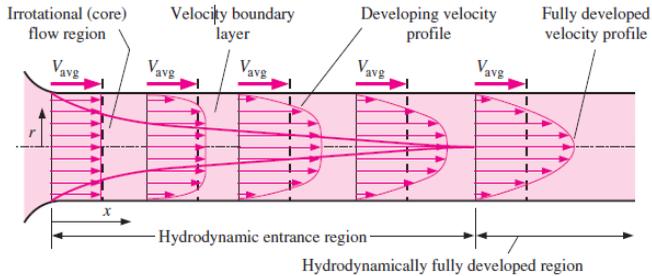
\bar{V} = kecepatan rata-rata suatu aliran.

c = kecepatan rambat bunyi local.

2.1.4. *Internal flow*

Internal flow adalah aliran dimana fluida mengalir secara penuh serta dilingkupi secara utuh oleh permukaan padat / batas padat, seperti aliran pada pipa. Gambar 2.4 mengilustrasikan aliran yang masuk pada pipa mulai dari kecepatan *uniform* hingga membentuk aliran *fully developed*. Aliran *fully developed* dapat terbentuk ketika sudah melewati *entrance region*, *entrance length* pada aliran *turbulent* yaitu $10 D$ sedangkan menurut **Fox & Mc**.

Donald's (2011), aliran dapat dikatakan *fully developed* ketika sudah melewati $25-40 D_h$.



Gambar 2.4. Internal flow pada pipa

(Cengel & Cimbala, 2006).

2.2 Karakteristik aliran fluida dalam pipa

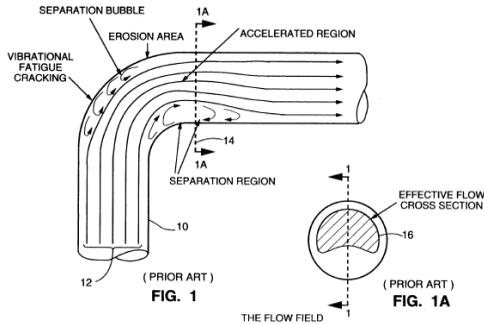
Karakteristik aliran dalam pipa ditentukan dari beberapa parameter sebagai contoh *velocity*, densitas maupun *geometry*. Pada sistem saluran udara terdapat beberapa faktor yang menyebabkan kerugian energi diantaranya adalah separasi yang diakibatkan adanya tekanan balik (*adverse pressure*) serta *secondary flow*.

2.2.1 Separasi

Separasi terjadi akibat ketidakmampuan momentum suatu aliran fluida untuk menahan gaya gesek serta tekanan balik (*adverse pressure*). Separasi suatu aliran adalah suatu fenomena yang menyebabkan *pressure drop* serta kerugian tekanan pada *elbow*, karena adanya perubahan kecepatan dalam aliran yang menyebabkan terjadinya *vortex* pada dinding *elbow*.

Separasi aliran dijelaskan oleh **Cheng (1994)** pada *curved pipe* dengan menginjeksikan cairan berwarna pada pipa *transparent* untuk memperoleh ilustrasi *streamline* di dalam *elbow*.

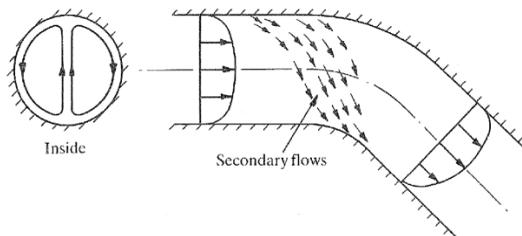
Separasi aliran diilustrasikan pada gambar 2.5.



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

2.2.2 Aliran sekunder (*secondary flow*)

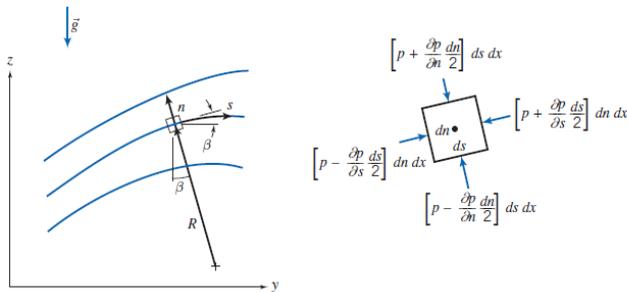
Aliran yang melintasi suatu *fitting* seperti *elbow* mengakibatkan terbentuknya aliran sekunder. Aliran sekunder terjadi ketika sisi *inner* dan *outer wall* mengalami perbedaan distribusi tekanan. Adanya perbedaan tekanan pada kedua sisi menyebabkan aliran dalam *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama sehingga terjadinya penyumbatan aliran. Aliran sekunder diilustrasikan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Aliran sekunder (Miller, 1999).

2.3 Persamaan Euler dalam koordinat streamline

Streamline adalah suatu garis yang digambarkan pada suatu medan aliran dimana pada setiap kecepatan tidak ada aliran yang memotong garis *streamline* sehingga *streamline* dapat dinyatakan sebagai suatu batas padat yang tidak bisa dilalui oleh aliran itu sendiri. Garis yang bersinggungan dengan titik pada suatu garis tertentu dapat dinyatakan sebagai arah kecepatan aliran. Gerakan partikel fluida sepanjang aliran *streamline* diilustrasikan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline*

(Fox dan Mc. Donald, 2011).

Pada gambar 2.7 diatas partikel fluida pada bidang koordinat y-z dimana *s* sebagai jarak sepanjang *streamline*, *n* sebagai jarak normal terhadap *streamline* sedangkan *p* adalah pusat tekanan dari suatu elemen. Persamaan Euler pada aliran *inviscid* dapat dibentuk dari persamaan gerak partikel pada suatu aliran dalam koordinat *streamline*, sehingga dirumuskan pada persamaan 2.3.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \tag{2.3}$$

Asumsi kondisi aliran *steady*, *body force* diabaikan serta aliran dianggap sebagai aliran *incompressible* sehingga

persamaan *Euler* sepanjang *streamline* kearah *s* dapat dirumuskan pada persamaan 2.4.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.4)$$

Sedangkan pada kondisi *steady flow* dimana *R* adalah radius lengkungan *streamline*. Sehingga menyebabkan persamaan *Euler* berubah dimana persamaan *Euler* normalnya dinyatakan pada persamaan 2.5.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{\bar{v}^2}{R} \quad (2.5)$$

Untuk aliran *steady* pada bidang horizontal / arah *n*, maka persamaan *Euler* dinyatakan dengan persamaan 2.6.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{\bar{v}^2}{R} \quad (2.6)$$

Persamaan 2.6 di atas menunjukkan adanya peningkatan tekanan ke arah keluar dari pusat radius kelengkungan *streamline*, disebabkan karena gaya yang bekerja pada partikel hanya berupa tekanan sehingga menyebabkan adanya percepatan *sentripetal*. Adapun daerah-daerah *streamline* dimana pada *streamline* lurus maupun *streamline* dengan jari-jari kelengkungan *R* yang tak terhingga menyebabkan tidak adanya perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline*.

2.4 Model turbulensi

Model turbulensi ialah prosedur dalam proses komputasi untuk mendekati hasil eksperimen. Model turbulensi diharapkan dapat diaplikasikan dalam beberapa kasus studi numerik dengan hasil yang akurat. Terdapat beberapa macam model turbulensi yang banyak dipakai salah satu contohnya ialah model *k-ε*, *k-ω* dan *RSM*.

2.4.1 Model *k-ε*

Model *k-ε* merupakan model turbulen dengan menggunakan dua persamaan, sehingga kecepatan turbulen dan skala panjang ditentukan secara independen. Model *k-ε*

dikhususkan untuk mekanisme yang memberikan efek terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa) k , sedangkan ε merupakan laju disipasi. Beberapa macam model k - ε yaitu :

- ***k*- ε Standard**

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

- ***k*- ε RNG (renormalization-group)**

Pemodelan ini merupakan variasi dari model *standard k*- ε . Model ini digunakan ketika aliran mempunyai bilangan *Reynolds* rendah serta untuk memprediksi aliran dengan efek *swirling*.

- ***k*- ε Realizable**

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

2.4.2 Model *k*- ω

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Pada model *k*- ω ini, terdapat *inverse time scale* dimana ω merupakan *specific dissipation rate* yang berkaitan dengan aliran turbulensi. Karakteristik numerik dari model ini hampir sama dengan model *k*- ε . Beberapa macam model *k*- ω yaitu :

- ***k*- ω Standard**

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

- ***k- ω SST (shear-stress transport)***

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

2.4.3 Model RSM

Model ini memiliki 7 persamaan, sehingga dapat dikatakan model ini memiliki keakuratan yang lebih tinggi. Model ini dapat memprediksi aliran kompleks seperti aliran *cyclone* atau aliran yang berotasi.

2.5 Boundary condition

Boundary condition digunakan untuk menentukan batasan-batasan yang akan digunakan dalam memasukkan parameter kedalam perangkat lunak. Berikut ini beberapa *boundary condition* yang umum digunakan :

- ***Velocity inlet***

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

- ***Pressure outlet***

Boundary condition ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar dari suatu media laluan, dimana tekanan statis *outlet* diketahui sehingga aliran masih belum bisa dikategorikan *fully developed state*.

- ***Wall***

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

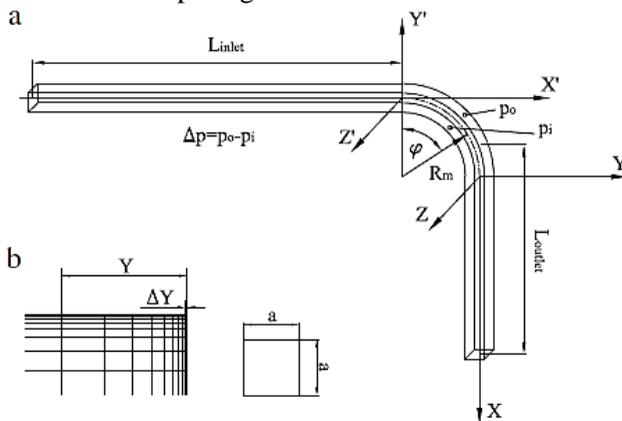
wall yang didefinisikan bergerak secara translasi atau rotasi dari batas dinding, atau model “*slip*” dinding.

2.6 Penelitian terdahulu

Beberapa penelitian telah membahas serta mengamati karakteristik aliran yang melewati suatu *ducting* dengan penambahan *elbow* yang dilakukan secara studi eksperimen maupun studi numerik, menggunakan beberapa variasi untuk menurunkan *pressure drop* maupun kerugian energi diantaranya dengan menambah suatu bodi pengganggu. Berikut beberapa penelitian terdahulu :

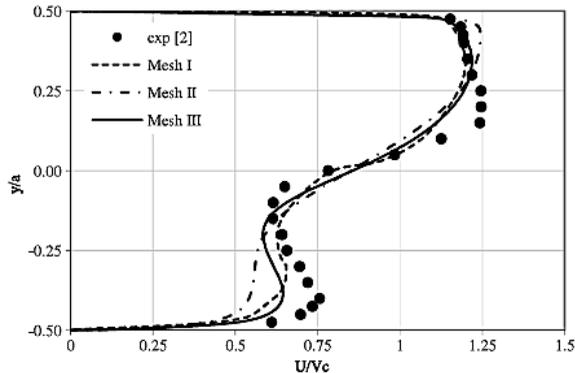
2.6.1 Karakteristik aliran melalui *ducting* dengan *elbow*.

Rup dan Sarna (2011) melakukan studi numerik serta studi eksperimen aliran yang melalui *square duct* serta penambahan *elbow* 90° . Studi numerik dengan menggunakan model *turbulent RSM* (*Reynolds stress model*) dilakukan pada $Re = 40000$ dengan geometri *ducting* yaitu $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm serta $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm. *Geometry* penelitian diilustrasikan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. (a) *Geometry ducting* (b) Bentuk *mesh* serta Y^+
(Rup dan Sarna, 2011).

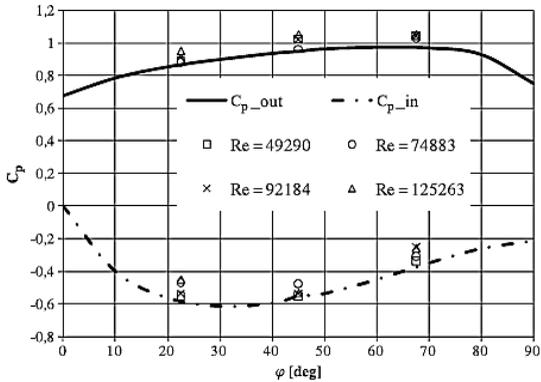
Hasil yang didapatkan yaitu dengan membandingkan hasil eksperimen dengan hasil simulasi. Perbandingan profil kecepatan dengan jarak $x/D_h = 1.0$ ($z/D_h = 0.0$) diilustrasikan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Perbandingan profil kecepatan dari hasil simulasi dan eksperimen $x/D_h = 1.0$ ($z/D_h = 0.0$) (Rup dan Sarna, 2011).

Pada uji simulasi menggunakan 3 variasi kerapatan *meshing* dengan jumlah *mesh* sebagai berikut $Vk_1 = 553052$, $Vk_2 = 1766079$, dan $Vk_3 = 1034775$. Gambar 2.9 profil kecepatan pada lokasi $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ dimana variasi *mesh* yang mendekati hasil eksperimen yaitu variasi *mesh* III ($Vk_3 = 1034775$). Selain itu peneliti juga membahas mengenai koefisien tekanan maksimum, dimana koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$).

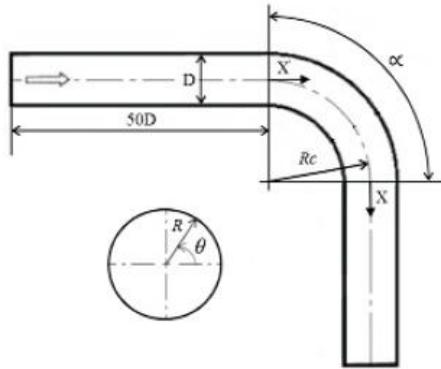
Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar *koefisien losses* pada *elbow*. Perbandingan koefisien tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall* diilustrasikan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. Perbandingan koefisien tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen (Rup dan Sarna, 2011).

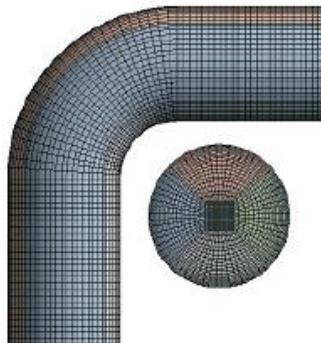
Dutta dan Nandi (2015) melakukan studi eksperimen serta numerik tentang pengaruh *Reynolds number* (Re) dan *curvature ratio* (Rc/D) pada aliran dalam *elbow* 90° . Batasan penelitian ini yaitu menggunakan *elbow* 90° berpenampang silinder dengan variasi radius lengkung ($Rc/D = 1-5$) serta bilangan Re dari 1×10^5 sampai 10×10^5 . *Geometry* yang digunakan yaitu diameter *ducting* sebesar 0,01 m, panjang *inlet* $50D$ dan panjang *outlet* $20D$.

Geometry ducting diilustrasikan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Geometri *ducting* berpenampang silinder (Dutta dan Nandi, 2015).

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi numerik, untuk menghasilkan hasil numerik yang optimal dilakukan metode *grid independency*. *Meshing* yang digunakan yaitu 3D *mesh* dengan *hexahedral* sebagai elemen *meshing* dengan ketentuan $Y^+ < 3$. *Computational grid meshing* diilustrasikan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. *Computational grid meshing* (Dutta dan Nandi, 2015).

Boundary condition yang digunakan yaitu *inlet velocity* (U_{in}), energi *kinetic* pada aliran *turbulent* dirumuskan pada persamaan 2.7.

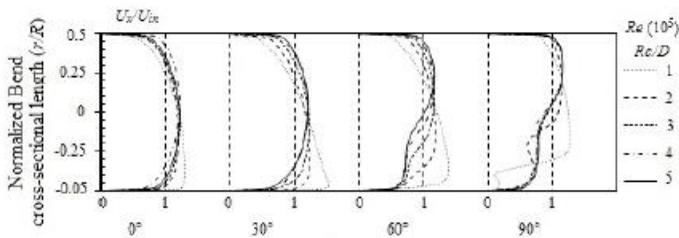
$$k_{in} = 1.5(I*U_{in})^2 \quad (2.7)$$

Dimana, I merupakan intensitas turbulensi. Sedangkan *specific dissipation* dirumuskan pada persamaan 2.8. Serta untuk menghitung intensitas turbulen dirumuskan pada persamaan 2.9.

$$\varepsilon_{in} = (C_{\mu} k^{3/2})/0.3D \quad (2.8)$$

$$I = 0.16(Re)^{-0.125} \quad (2.9)$$

Wall dianggap tidak *slip*, sedangkan pada *outlet gradient* alirannya dianggap nol. Hasil *velocity profile* pada beberapa posisi dengan variasi rasio kelengkungan diilustrasikan pada gambar 2.13.

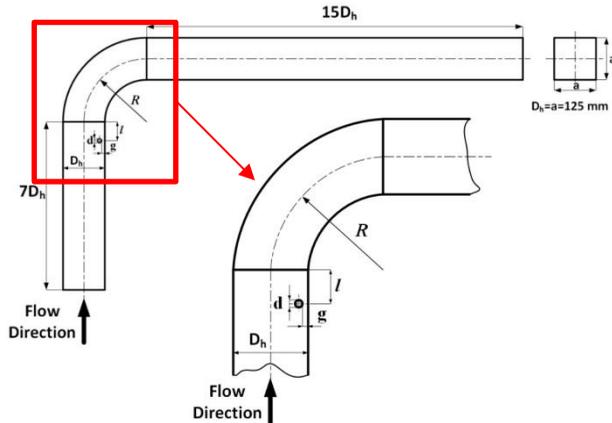


Gambar 2.13. *Velocity profile* pada beberapa posisi pengambilan data dengan variasi Re serta rasio kelengkungan (Dutta dan Nandi, 2015).

Didapatkan hasil akselerasi kecepatan tertinggi didapat pada rasio kelengkungan paling rendah yaitu $Rc/D = 1$. Sedangkan akselerasi kecepatan pada sisi *inner* dalam mengembalikan menjadi bentuk *fully developed* terdapat pada rasio lengkungan yang besar yaitu $Rc/D = 5$.

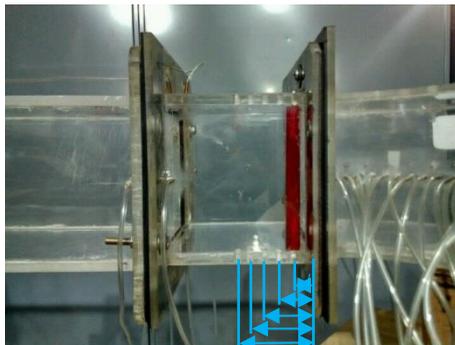
Hardhian (2017) melakukan studi eksperimen mengenai pengaruh jarak *inlet disturbance body* terhadap aliran melalui *square duct* dengan *elbow* 90°. Domain yang digunakan yaitu *square duct* dengan diameter $D_h = 125$ mm, $g/d = 0,2$ dengan

rasio kelengkungan *elbow* $R/D_h = 1,5$ dan variasi jarak *inlet disturbance body* ($l/D_h = 0,1 - 0,5$). Skema penelitian diilustrasikan pada gambar 2.14.



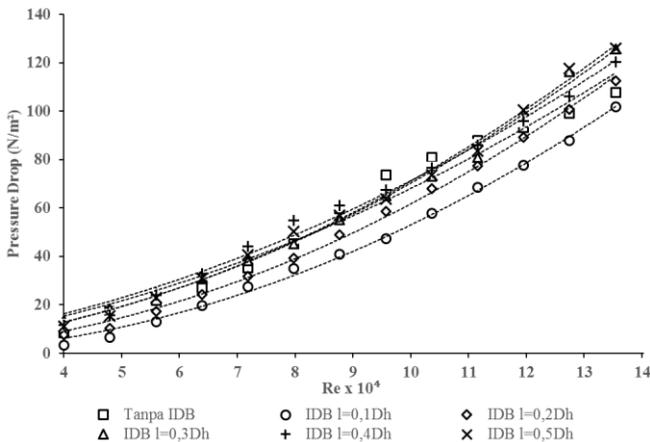
Gambar 2.14. Skema penelitian serta gambar detail peletakan *inlet disturbance body* (Hardhian, 2017).

Variasi yang digunakan yaitu variasi jarak *inlet disturbance body* dari 0,1 – 0,5 sehingga dapat digambarkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15. Variasi jarak *inlet disturbance body* (Hardhian, 2017).

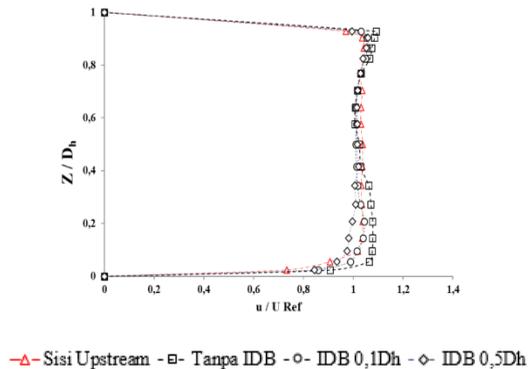
Didapatkan hasil *pressure drop* pada *square duct* terendah ada pada variasi jarak $l/D_h = 0,1$ untuk masing-masing variasi $Re = 3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$, *pressure drop* ini lebih kecil daripada ketika *square duct* tersebut tidak dipasang *inlet disturbance body*. Dengan adanya *inlet disturbance body* dapat membuat intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner* maupun *outer*. *Pressure drop* pada *square duct* dengan variasi jarak *inlet disturbance body* pada masing-masing variasi Re diilustrasikan pada gambar 2.16.



Gambar 2.16. *Pressure drop* pada *square duct* dengan variasi jarak *inlet disturbance body* pada $Re = 3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (Hardhian, 2017).

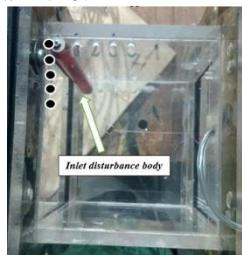
Selain itu pada variasi jarak $l/D_h = 0,1$ *recovery* aliran bidang *horizontal* untuk mendekati *fully developed* paling baik diantara variasi jarak lainnya tetapi pada variasi jarak tersebut intensitas turbulensi pada sisi *inner outlet elbow* 90° dinilai cukup tinggi dibandingkan dengan variasi jarak $l/D_h = 0,4$ yang bernilai 8,07 %.

Gambar 2.17 mengilustrasikan visualisasi *recovery* aliran bidang *horizontal* pada jarak *cross section* $14 D_h$.



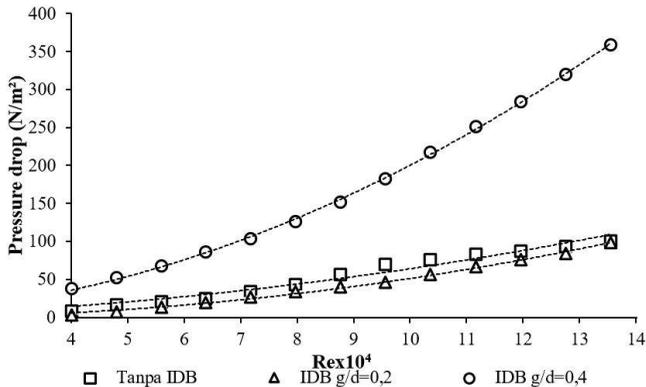
Gambar 2.17. Visualisasi *velocity profile* bidang *horizontal* pada jarak *cross section* $14 D_h$ (Hardhian, 2017).

Selain itu **Pratama (2017)** juga melakukan hal yang sama dengan **Hardhian (2017)**, mengenai studi eksperimen pengaruh *gap inlet disturbance body* terhadap *square duct* dan *elbow* 90° . Domain yang digunakan hampir sama dengan **Hardhian (2017)** tetapi perbedaan ada pada variasi *gap* ($g/d = 0,1$ sampai $0,5$) dan jarak *inlet disturbance body* ($l/D_h = 0,1$) ditunjukkan pada gambar 2.18.



Gambar 2.18. Variasi *gap inlet disturbance body* (Pratama, 2017).

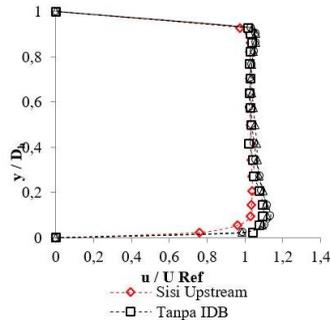
Gambar 2.19 menjelaskan pada variasi $gap = 0,2$ dengan variasi Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$ dapat menurunkan *pressure drop* dibanding dengan variasi gap lainnya. Selain itu terjadi peningkatan *pressure drop* seiring dengan bertambahnya Re_{Dh} . Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya IDB menyebabkan separasi aliran memiliki momentum aliran tinggi sehingga lebih mampu melawan *advers pressure* pada sisi *inner elbow* 90° .



Gambar 2.19. *Pressure drop* pada *square duct* dengan variasi *gap inlet disturbance body* pada $Re = 3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (Pratama, 2017).

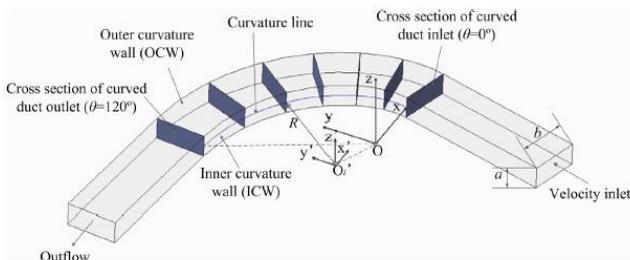
Perbandingan tanpa menggunakan IDB dengan $g/d=0,2$ didapatkan penurunan Δp sebesar 20,52%. Kondisi paling efektif terjadi pada Re_{Dh} $8,74 \times 10^4$, karena terjadi perbedaan Δp yang paling besar. Adanya penurunan Δp pada variasi $g/d=0,2$ mengindikasikan terjadinya penundaan separasi aliran sehingga *blockage area* yang ditimbulkan menjadi lebih kecil.

Selain itu dalam hal *recovery* aliran lebih cepat terjadi pada *square duct* tanpa *IDB* hal ini diilustrasikan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20. Visualisasi *velocity profile* bidang *horizontal* pada jarak *cross section* $13 D_h$ (Pratama, 2017).

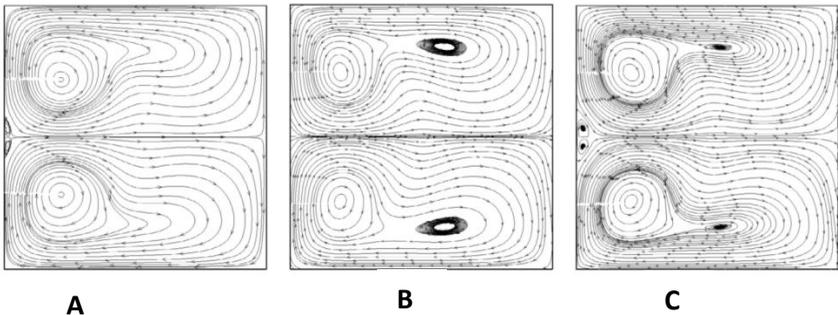
Li et.al (2016) melakukan penelitian mengenai aliran melintasi *curved rectangular duct* dengan variasi kelengkungan, domain yang digunakan yaitu *curved rectangular duct* dengan sudut 120° , 2 *straight duct* pada *inlet* dan *outlet* dengan panjang $20D_h$, 3 tipe kelengkungan yaitu *double circular line*, *spiral line* dan *involute line*, 3 *aspect ratio* ($Ar = 0,4; 1$ dan $2,3$) pada $Re_b = 2,4 \times 10^4 - 1,4 \times 10^5$. Geometri penelitian diilustrasikan pada gambar 2.21.



Gambar 2.21. Geometri dan koordinat penelitian (Li et.al, 2016).

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dan numerik, untuk penelitian numerik dilakukan secara 3D *incompressible flow* dengan model turbulensi *k- ω sst*, *boundary condition* yang digunakan yaitu *uniform flow* pada *inlet*, *no-slip boundary condition* pada *wall* serta *pressure outlet* pada *downstream*. Hasil yang didapatkan pada $Ar < 1$, *secondary flow* yang terbentuk ada 4 macam yaitu *base vortex* yang terbentuk pada setiap aliran yang melewati *rectangular cross section*, *split vortex* yang terbentuk dari *base vortex*, *ICW dean vortex* yang terbentuk di tengah *inner wall* serta *corner region dean vortex* yang terbentuk di sudut bawah/atas dari *wall*.

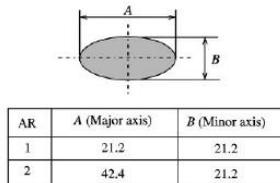
Gambar 2.22 menjelaskan *secondary flow* yang terbentuk pada $Ar = 1$ dan $Re = 1,4 \times 10^5$ pada 3 variasi kelengkungan *double*, *spiral* dan *involute line*. Terlihat pada sudut 100° pada tiap variasi kelengkungan memiliki *base vortex* yang terletak pada sisi *inner wall* bagian *upper* dan *lower wall* serta *ICW Dean vortex*, terdapat juga *split vortex* yang terjadi pada *spiral* dan *involute line*.



Gambar 2.22. *Secondary flow* pada $Ar = 1$
 A. *Double line*, B. *Spiral line*, C. *Involute line*
 (Li et.al, 2016).

2.6.2 Pengaruh variasi *gap* serta jarak silinder terhadap karakteristik aliran

Choi & Lee (2000), meneliti mengenai karakteristik aliran yang melewati silinder *elips* serta silinder sirkular dengan $Re = 14000$. Eksperimen dilakukan di *closed return wind tunnel* dengan tinggi 0,6 m, lebar 0,72 m dan panjang 6 m. *Turbulent Intensity* yang digunakan yaitu 0,08 % pada kecepatan 10 m/s. $AR = A/B$ dimana A adalah sumbu *major* dan B adalah sumbu *minor* dari silinder *elips*. Sedangkan untuk silinder sirkular pada $AR = 1$, $D = 21,2$ mm dan $L/D = 28,3$. *Geometry* simulasi diilustrasikan pada gambar 2.23.

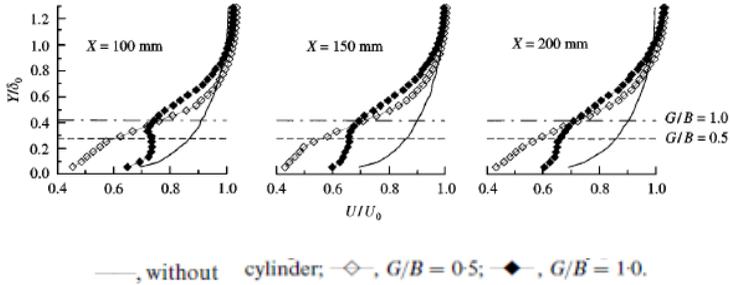


Gambar 2.23. *Geometry* silinder sirkular $Ar = 1$ (Choi & Lee, 2000).

Selain itu terdapat U/U_0 atau rata rata dari *streamwise velocity* dengan beberapa variasi jarak secara *vertical* dimana pada $G/B = 0,5$ rata rata *streamwise* memiliki profil yang sama dengan *downstream* aliran yang melewati *gap* ini akan terhalang karena semakin dekatnya dengan dinding maka aliran akan melalui saluran sempit.

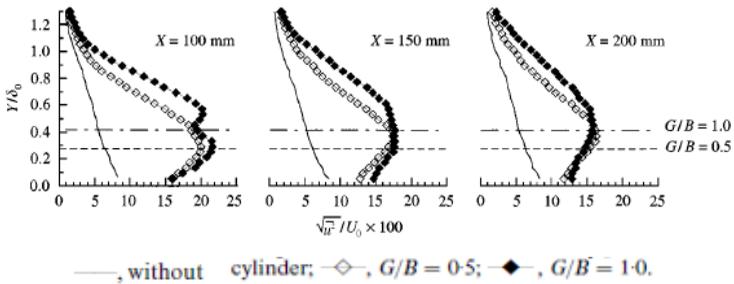
Sedangkan untuk perbandingan *turbulent intensity* pada jarak $X = 100, 150$ dan 200 mm dimana pada jarak $X = 100$ mm *turbulent intensity* yang dihasilkan lebih tinggi dengan adanya silinder, sehingga aliran dapat melawan *adverse pressure* yang terjadi sehingga momentum aliran semakin kuat. Sedangkan pada $G/B = 1$ defisit aliran terjadi lebih awal dari $G/B = 0,5$

Mean streamwise velocity dan streamwise turbulence intensity digambarkan pada gambar 2.24 dan 2.25.



Gambar 2.24. Mean streamwise velocity profile pada $X = 100$, 150 dan 200 mm

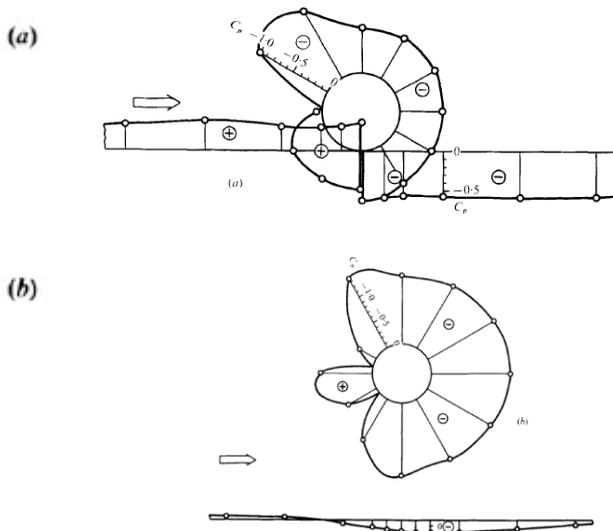
(Choi & Lee, 2000).



Gambar 2.25. Streamwise turbulence intensity profiles pada $X = 100$, 150 dan 200 mm

(Choi & Lee, 2000).

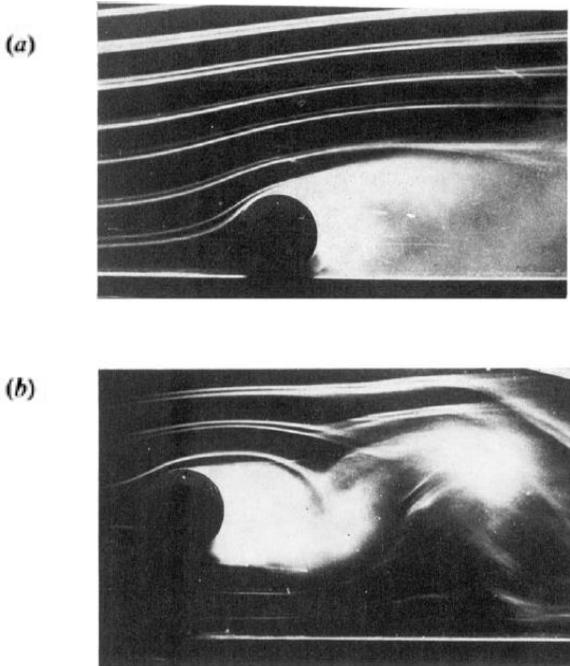
Bearman & Zdravkovich (1978), meneliti mengenai aliran yang melewati silinder sirkular yang ditempatkan pada sebuah plat datar. Eksperimen yang diteliti menggunakan *wind tunnel* dengan *test section* tinggi 1 m, lebar 0,61 m dan panjang 3 m, diameter silinder yang digunakan yaitu 1,9 cm, dengan $Re = 2,5 \times 10^4$ dan $4,8 \times 10^4$ dengan variasi gap dari 0 sampai 2. Hasil yang didapatkan ialah distribusi tekanan dengan $G/D = 0$ terjadi pemegatan tekanan yang tidak jelas antara silinder dengan plat, tetapi pada tampak 3D *upstream* dan *downstream* pada *upstream* terdapat region separasi dan C_p yang dihasilkan hampir mendekati konstan positif sedangkan *downstream* C_p yang dihasilkan mendekati konstan negatif, pada $G/D = 2$ terjadi formasi tekanan yang simetri diilustrasikan pada gambar 2.26 (a) dan (b)



Gambar 2.26. Distribusi tekanan sekitar silinder dan plat
(a) $G/D = 0$ (b) $G/D = 2$

(Bearman & Zdravkovich, 1978).

Selain itu hasil yang didapatkan juga divisualisasikan di *smoke tunnel* sehingga terlihat *vortex shedding* terbesar ada pada $G/D = 0$ sedangkan *vortex shedding* terkecil ada pada $G/D = 2$ (gambar 2.27 (a) dan (b)).



Gambar 2.27. *Flow pattern* pada $Re = 2,5 \times 10^4$ (a) $G/D = 0$ (b) $G/D = 2$

(Bearman & Zdravkovich, 1978).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan metode penelitian aliran melalui *square duct* dengan penambahan *elbow 90°* serta bodi silinder pengganggu yang dilakukan secara numerik. Studi numerik ini menggunakan perangkat lunak simulasi *CFD* komersial untuk menggambarkan *geometry*, serta untuk menggambarkan simulasi numerik. Studi numerik dilakukan untuk menganalisa fenomena aliran tiga dimensi (3D) dalam *square duct* serta *elbow 90°* dimana terdapat *inlet disturbance body* pada sisi *inner upstream duct* dengan variasi diameter $d/D_h = 0,064; 0,08$ dan $0,1$.

Metodologi pada penelitian ini yaitu :

1. Studi literatur

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

2. Simulasi

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui adanya fenomena aliran tiga dimensi (3D) dengan adanya penambahan *inlet disturbance body* pada *inner upstream duct* dengan variasi diameter d/D_h . Pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

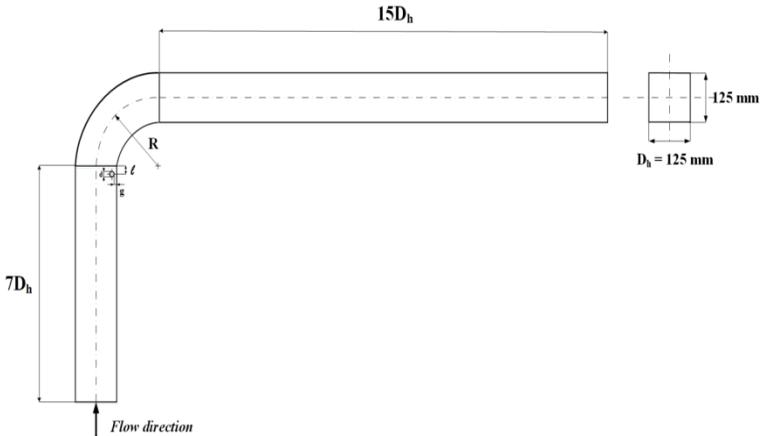
3. Penyusunan Laporan

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

3.1 Geometri benda uji

Penelitian secara numerik ini menggunakan saluran udara berpenampang bujur sangkar (*square duct*), dan pada bagian sisi

upstream duct terhubung *elbow* 90° , dimana pada *inner upstream duct* terdapat *inlet disturbance body*, serta bagian sisi *downstream duct*. Skema instalasi diilustrasikan pada gambar 3.1.

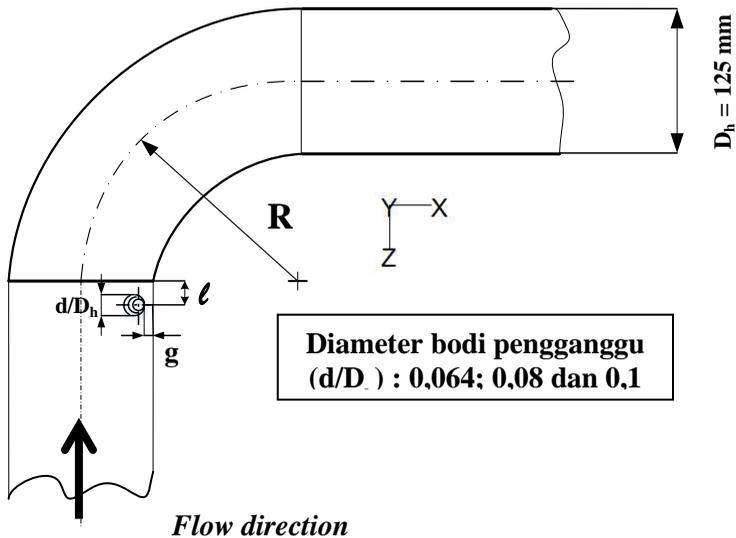


Gambar 3.1. Skema instalasi.

Spesifikasi dari geometri ini adalah sebagai berikut:

- Bentuk Penampang : *Square duct*
- Panjang *upstream duct* : $7 D_h$
- Panjang *downstream duct* : $15 D_h$
- Sisi *square duct* : $125 \times 125 \text{ mm}$
- Jarak sumbu imajiner (R) : $187,5 \text{ mm}$
- Jari jari lengkung *elbow* 90° (R/D_h) : $1,5$
- *Hydraulic diameter* (D_h) : 125 mm
- Diameter bodi pengganggu (d) : $8, 10, 12,5 \text{ (mm)}$
- Gap (g) : $2,5 \text{ mm}$
- Jarak silinder dengan inlet elbow (l) : $12,5 \text{ mm}$

Variasi yang akan dibuat yaitu variasi diameter bodi silinder pengganggu sehingga apabila gambar 3.1 diperjelas menjadi gambar detail posisi bodi silinder pengganggu dapat diilustrasikan pada gambar 3.2.



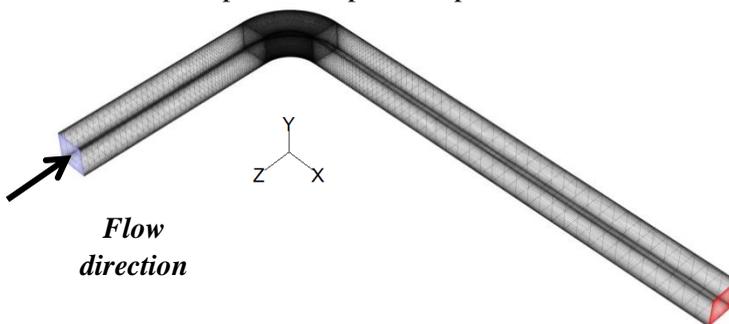
Gambar 3.2. Gambar detail posisi penempatan bodi silinder pengganggu.

3.2 Metode numerik

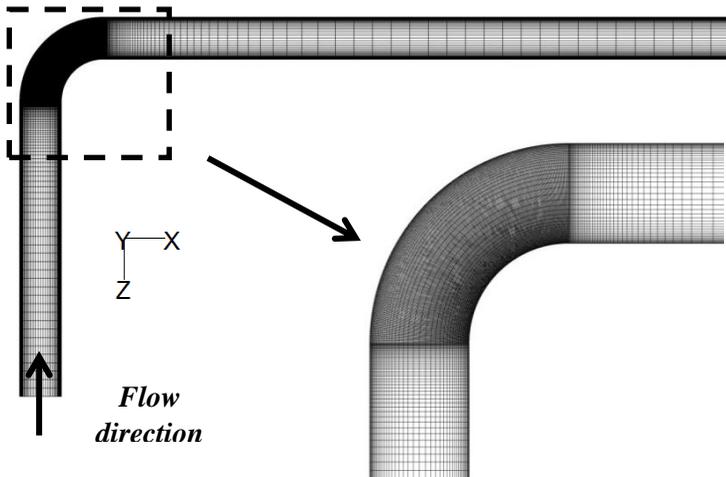
Penelitian ini menggunakan perangkat lunak komputasi fluida (CFD) komersial untuk melakukan pendekatan numerik, membuat geometri model, serta melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada penelitian numerik dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap *pre-processing*,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

3.2.1 Tahap *pre-processing*

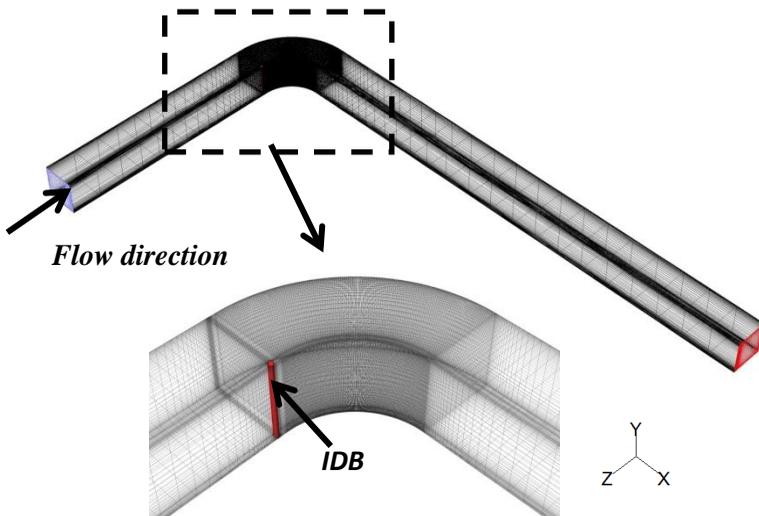
- a) Pembuatan model 3D berupa *ducting* mengacu pada geometri gambar 3.1 dan gambar 3.2. Model *ducting* pertama dibuat tanpa adanya *inlet disturbance body*, model ini digunakan untuk proses *grid independency* test. Model *ducting* yang sudah melalui *grid independency* diolah kembali dengan menambahkan *inlet disturbance body* serta memvariasikan diameter *inlet disturbance body*. Pembuatan *geometry* dilakukan dengan membuat beberapa koordinat serta *edge* yang tersedia.
- b) Pembuatan *meshing* dilakukan untuk setiap variasi. *Meshing* dilakukan dengan membagi volume menjadi 3 bagian, yaitu *upstream duct*, *elbow 90°*, *inlet disturbance body* dan *downstream duct*. *Meshing* volume yang digunakan tipe *hexahedral-map*. Metode *meshing* yang digunakan yaitu sistem *grading* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada sisi dekat dinding serta rapat pada sisi bodi pengganggu. Hasil dari *meshing* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ diilustrasikan pada gambar 3.3, 3.4, 3.5 dan 3.6. Untuk *mesh* dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ dan 0,1 dapat dilihat pada lampiran 1.



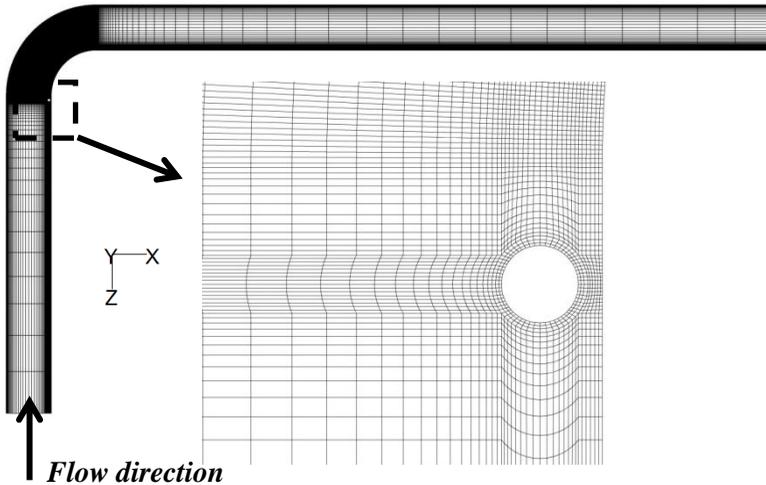
Gambar 3.3. *Meshing* tanpa *IDB* (*isometric*).



Gambar 3.4. Meshing square duct tanpa IDB (atas)



Gambar 3.5. Meshing square duct dengan IDB $d/D_h = 0,064$ (isometric).



Gambar 3.6. Meshing square duct dengan IDB $d/D_h = 0,064$ (atas)

3.2.2 Tahap *processing* dan *post-processing*

a) *Grid*

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

b) *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver pressure based*, *steady/unsteady flow* dan serta pemilihan model turbulensi.

c) *Materials*

Data *properties* material fluida yaitu udara pada temperatur ruangan $T = 28^\circ\text{C}$ dengan *density* (ρ) $1,182 \text{ kg/m}^3$ dan *viskositas absolute* (μ) $1,86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.

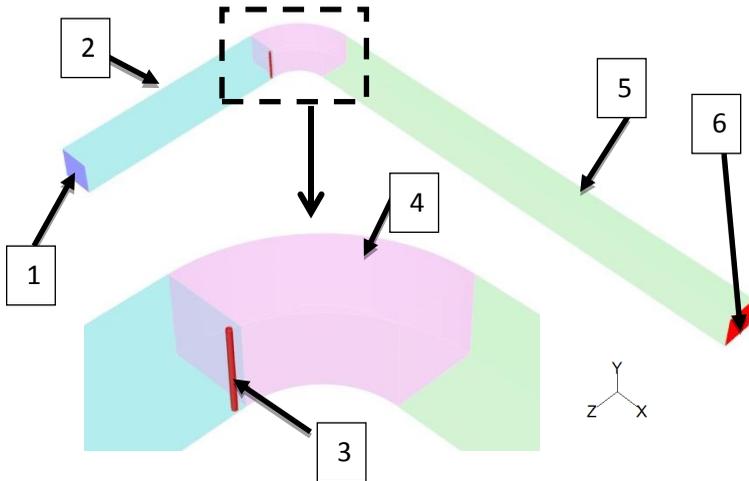
d) *Operating conditions*

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

e) *Boundary conditions*

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji pada *inlet*, *outlet* serta *wall*. Daerah *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dalam (m/s) dimana *velocity* yang dimasukkan yaitu variasi 5, 11 dan 17 m/s serta *turbulence intensity* yang sudah dihitung sebelumnya yaitu 4 % dan diameter hidraulik 125 mm, kondisi batas *upstream straight duct*, *downstream straight duct*, *inlet disturbance body*, *elbow 90°* didefinisikan sebagai *wall* dengan faktor kekasaran dibuat *default* dan *no slip*, sedangkan pada daerah *outlet* didefinisikan sebagai *pressure outlet* yang didapat dari hasil eksperimen.

Domain pemodelan simulasi digambarkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7. Domain pemodelan *square duct*.

Bagian – bagian dari model *square duct* :

1. *Inlet (velocity inlet)*
2. *Upstream straight duct (wall)*
3. *Inlet disturbance body (wall)*
4. *Elbow 90° (wall)*
5. *Downstream straight duct (wall), dan*
6. *Outlet (pressure outlet)*

f) *Solution*

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

g) *Initialize*

Merupakan langkah awal untuk proses iterasi agar mudah mencapai konvergensi, langkah ini dapat dihitung

dari *inlet*, *outlet*, atau daerah lainnya. Dalam kasus ini langkah awal dimulai dari sisi *inlet*.

h) *Monitor residual*

Pada proses iterasi berlangsung harga kriteria konvergensi ditentukan agar proses iterasi tidak berlangsung terlalu lama. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-5} . Proses iterasi dinyatakan telah konvergensi setelah residualnya mencapai nilai lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan. Serta ditentukan juga plot proses iterasi.

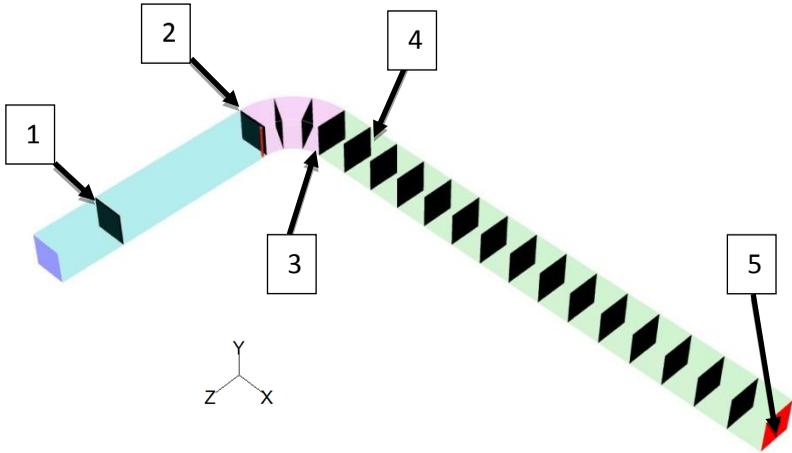
i) *Iterate*

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

j) *Post-processing*

Merupakan penampilan hasil setelah dilakukan iterasi. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa distribusi nilai *pressure drop* dan *coefficient of pressure*. Data kualitatif berupa penampilan *velocity profile* pada setiap *cross section*, penampilan kontur kecepatan serta *pathline* dan vektor kecepatan untuk menampilkan *secondary flow*.

Posisi pengambilan data diilustrasikan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8. Posisi pengambilan data.

Gambar 3.8 mengilustrasikan posisi pengambilan data mulai dari profil kecepatan, kontur kecepatan, *pathline* dan vektor kecepatan pada sisi *upstream*, *elbow* serta *downstream*. Posisi pengambilan data pada *upstream* diambil pada $z/D_h = 3$ (1) sebagai acuan untuk menampilkan *recovery* aliran serta *section* sebelum terkena dampak dari *elbow*, pada *elbow* diambil di posisi 0° (2) sampai sudut 90° (3) dan pada *downstream* posisi pengambilan diambil pada jarak $x/D_h = 1$ (4) sampai $x/D_h = 15$ (5) dimana referensi titik 0 terdapat di *outlet elbow* (3).

3.3 Langkah-langkah penelitian

Langkah-langkah penelitian numerik pada *square duct* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan tabel sehingga dapat diilustrasikan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Urutan langkah penelitian

Langkah-langkah penelitian
Membuat model geometri <i>ducting</i> dengan menggunakan perangkat lunak <i>CFD</i> komersial (<i>pre-processing</i>). Model awal tanpa adanya <i>inlet disturbance body</i> .
Membuat <i>meshing</i> dengan metode <i>grading mesh</i> serta memakai <i>mesh</i> tipe <i>hexa-hedral map</i> . Terdapat 5 variasi <i>mesh</i> .
Hasil dari <i>pre-processing</i> dimasukkan ke dalam perangkat lunak <i>CFD</i> komersial untuk dilakukan <i>processing</i> serta <i>post-processing</i> .
Menentukan batas operasi dalam simulasi model uji, meliputi : <i>models, materials, boundary condition, solution, initialize, monitor residual, dan iterate (processing serta post-processing)</i> .
Melakukan iterasi hingga mencapai konvergensi. Bila simulasi belum konvergen, maka pembuatan <i>mesh</i> pada model uji diulangi lagi.
Setelah didapatkan hasil konvergensi maka selanjutnya dilakukan analisa <i>grid independency</i> .
Analisa <i>grid independency</i> dilakukan untuk menentukan variasi <i>mesh</i> serta variasi model turbulensi.
Selanjutnya ialah membuat <i>meshing</i> dengan variasi diameter <i>IDB</i> serta dilakukan simulasi pada model uji variasi diameter ($d/D_h = 0,064; 0,08$ dan $0,1$) serta variasi kecepatan dari 5, 11 dan 17 m/s.

Langkah-langkah penelitian
Melakukan <i>post-processing</i> tiap variasi.
Analisa hasil dan penarikan kesimpulan.

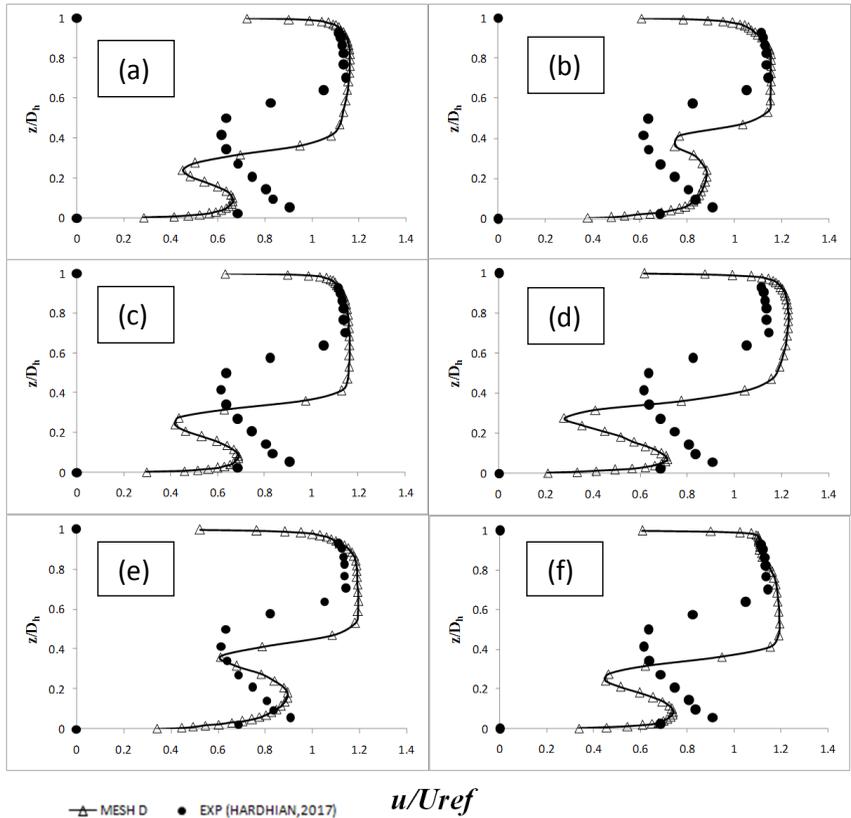
3.4 Analisa *grid independency*

Grid independency test berfungsi untuk menentukan variasi *mesh* yang dipilih serta mempercepat waktu komputasi. *Grid independency test* pada penelitian ini menggunakan model *ducting* tanpa *inlet disturbance body (IDB)* dengan 5 variasi *mesh* serta 6 model turbulensi. *Grid independency* untuk menentukan model turbulensi mengambil 1 variasi *mesh* secara acak, *mesh D* dipilih sebagai variasi *mesh* yang digunakan. Tabel 3.2 menjelaskan mengenai jumlah *mesh nodes* dan *cells* tiap variasi model uji.

Tabel 3.2 Jumlah *mesh nodes* dan *cells* variasi model uji.

Variasi <i>mesh</i>	Jumlah <i>mesh</i> (<i>nodes</i>)	Jumlah <i>mesh</i> (<i>cells</i>)
<i>Mesh A</i>	366993	344064
<i>Mesh B</i>	574938	544388
<i>Mesh C</i>	765142	727440
<i>Mesh D</i>	1150889	1100320
<i>Mesh E</i>	1397382	1338624

Hasil komputasi 6 model turbulensi diilustrasikan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9. Hasil komputasi variasi *mesh D* dan 6 model turbulensi ($x/D_h = 1$)

(a) *k-ε standard*, (b) *k-ε RNG*, (c) *k-ε realizable*, (d) *k-ω standard*,
(e) *k-ω SST*, (f) *RSM*.

Pengambilan data acuan menggunakan $V_{average}$ hasil eksperimen dengan hasil numerik. Penyimpangan hasil numerik

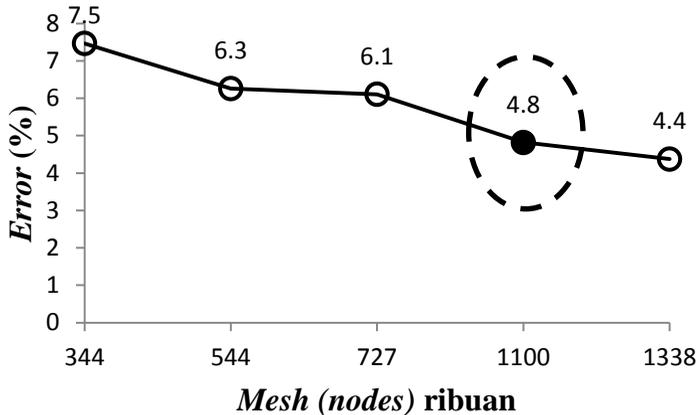
dengan hasil eksperimen pada 6 model turbulensi digambarkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Penyimpangan hasil eksperimen dengan hasil numerik ditinjau dari $V_{average}$ pada $x/D_h = 1$.

Hasil eksperimen / numerik	<i>Error</i> (%)
Eksperimen (Hardhian,2017)	-
<i>k-ε standard</i>	4.8
<i>k-ε RNG</i>	10.6
<i>k-ε realizable</i>	5.2
<i>k-ω standard</i>	5.8
<i>k-ω SST</i>	10.6
<i>RSM</i>	8.0

Dari tabel 3.3. didapatkan hasil *error* yang terkecil ada pada model turbulensi *k-ε standard* dengan *error* 4,8 %. Sehingga *k-ε standard* dipakai sebagai acuan untuk menentukan variasi *mesh* yang akan digunakan.

Apabila dikembalikan pada 5 variasi *mesh* sebelumnya dapat digambarkan grafik *grid independency* dengan tinjauan $V_{average}$ pada gambar 3.10

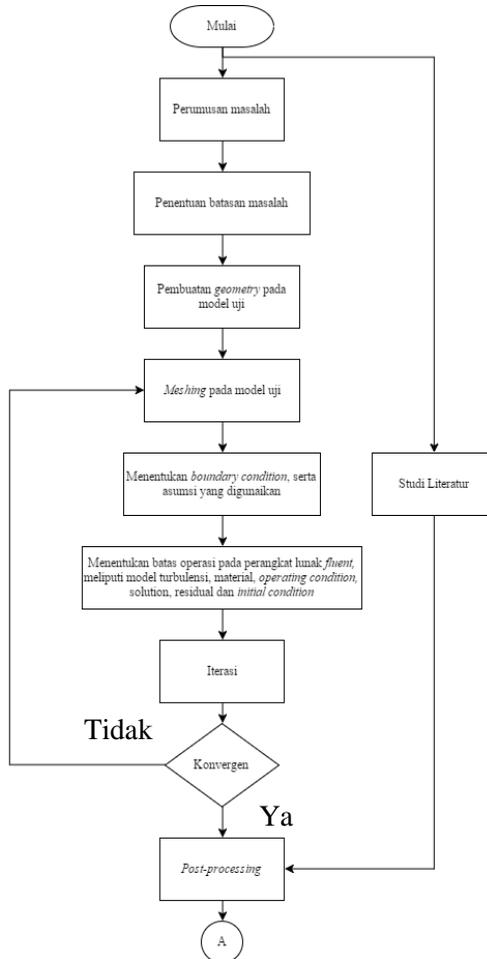


Gambar 3.10. Penyimpangan antar jumlah *mesh* dengan tinjauan $V_{average}$

Dalam hal ini peneliti juga membandingkan *mesh* yang dibuat dengan data hasil eksperimen sehingga pada gambar 3.10 menunjukkan hasil dari penyimpangan $V_{average}$ pada tiap variasi *mesh*, dimana pada antara *mesh* C, *mesh* D serta *mesh* E tidak terjadi perubahan yang signifikan sehingga *mesh* D dipilih untuk dijadikan acuan *mesh* pada model *ducting* tanpa dan dengan *inlet disturbance body (IDB)*.

3.5 Flowchart penelitian

Secara singkat prosedur penelitian numerik pada *square duct* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *flow chart* yang ditunjukkan pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Flowchart penelitian numerik.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab analisa dan pembahasan ini menampilkan data hasil studi numerik secara kuantitatif dan kualitatif. Hasil numerik secara kuantitatif ditampilkan berupa data grafik profil kecepatan pada setiap *cross-section*, grafik *coeffitient of pressure elbow* 90° dan grafik *pressure drop*. Sedangkan hasil numerik secara kualitatif ditampilkan berupa visualisasi aliran pada *ducting* seperti kontur kecepatan sepanjang *ducting* dengan profil kecepatan serta vektor kecepatan dan kontur *pathline* untuk menunjukkan *secondary flow*.

Analisa dan pembahasan studi numerik ini dilakukan pada *ducting* tanpa *IDB* dan *ducting* dengan variasi *inlet disturbance body (IDB)* ($d/D_h = 0,064; 0,08$ dan $0,1$) dengan variasi kecepatan yang telah ditentukan yaitu $5, 11, \text{ dan } 17$ m/s. Hasil numerik secara kuantitatif dan kualitatif seperti profil kecepatan pada setiap *cross-section*, kontur kecepatan dan *pathline* tanpa *IDB* dan dengan masing-masing variasi *IDB* disajikan dengan menggunakan kecepatan 5 m/s atau $Re = 3,97 \times 10^4$, sedangkan untuk *pressure drop* aliran disajikan dengan menggunakan kecepatan $5, 11, \text{ dan } 17$ m/s atau $Re = 3,97 \times 10^4, 8,74 \times 10^4, \text{ dan } 13,5 \times 10^4$. Analisa dan pembahasan ini dijelaskan dalam beberapa bab dan sub bab.

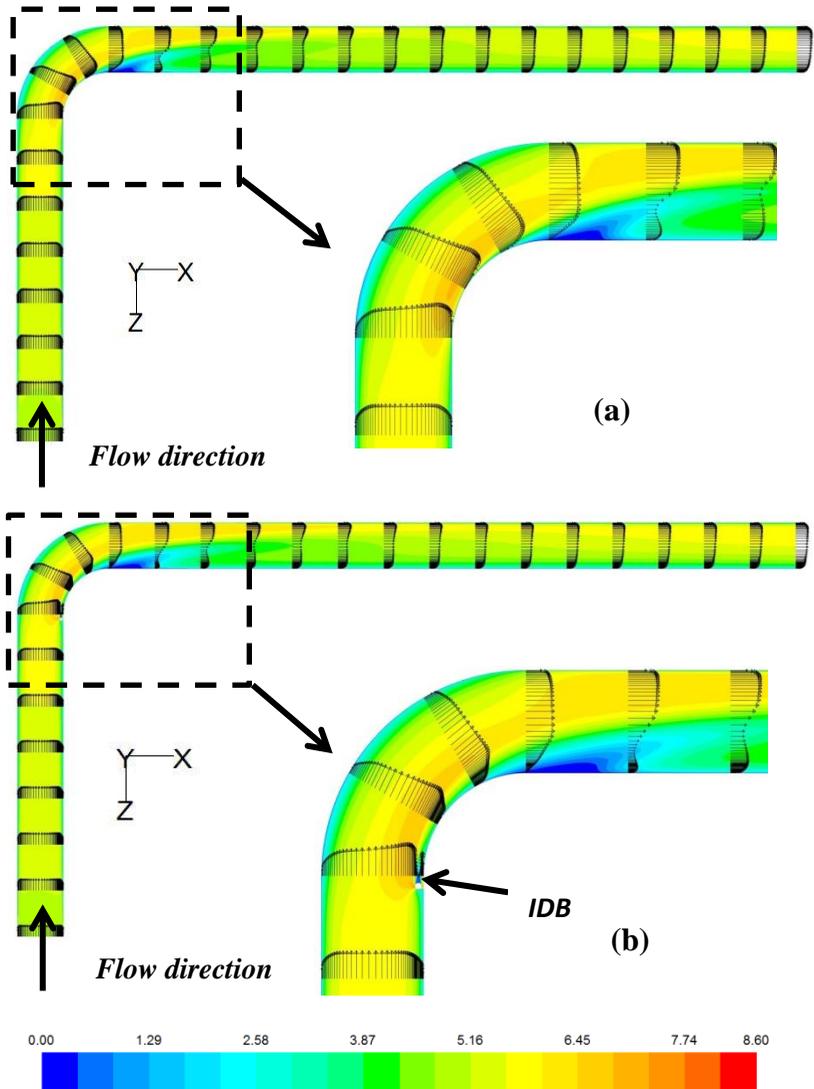
4.1 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang *ducting* dengan kontur kecepatan.

Data yang ditampilkan pada bab ini yaitu profil kecepatan sepanjang *ducting* tanpa *IDB* dan dengan variasi *IDB* serta visualisasi aliran berupa kontur kecepatan yang diambil dari potongan *ducting* searah sumbu y ($y/D_h = 0,5$) variasi Re yang digunakan yaitu $Re = 3,97 \times 10^4$. Data tersebut diperoleh dari *post-processing* perangkat lunak *fluent*.

4.1.1 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang *ducting* dengan kontur kecepatan (tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$), $Re = 3,97 \times 10^4$.

Profil kecepatan aliran yang melewati *ducting* dengan *elbow* 90° berpenampang *square* ditampilkan dalam bentuk visualisasi aliran sehingga dapat terlihat pola suatu aliran yang melewati *ducting* serta kontur kecepatan untuk memperjelas daerah-daerah dalam *ducting* yang memiliki pengaruh kuat terhadap terjadinya *pressure drop* suatu aliran. *Pressure drop* terjadi akibat adanya penambahan *elbow* 90° dimana besarnya jari-jari kelengkungan berpengaruh besar dalam munculnya *pressure drop* selain itu *pressure drop* juga dapat terjadi akibat gaya gesek antara aliran dengan dinding dari *ducting*.

Profil kecepatan ditampilkan untuk melihat profil tiap *cross-section* serta sejauh mana aliran dapat *recovery* serta mencapai *fully-developed flow*. Perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ bidang *horizontal* koordinat $y/D_h = 0,5$ diilustrasikan pada gambar 4.1. Dari gambar 4.1 dapat terlihat aliran saat memasuki *ducting* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ bagian sisi *upstream* profil kecepatan yang terbentuk mengalami perkembangan sampai sejauh $6D_h$, perubahan terjadi saat aliran melalui *upstream* $7D_h$, dimana aliran sudah mulai dipaksakan untuk mengikuti kontur dari *elbow* 90° .

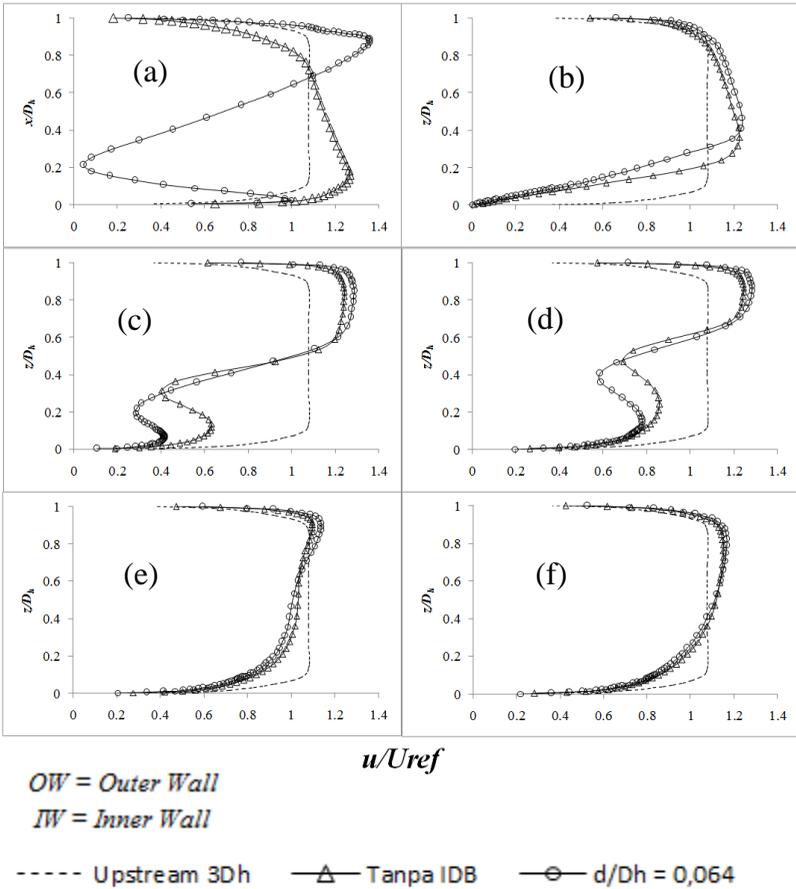


Gambar 4.1 Visualisasi profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran bidang *horizontal*
 (a) tanpa dan (b) dengan IDB $d/D_h = 0,064$.

Dapat terlihat pada profil kecepatan tanpa *IDB* sisi *upstream* $7D_h$ profil kecepatan tertinggi ada pada bagian sisi *inner wall elbow* sampai sejauh *outlet elbow* sedangkan profil kecepatan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ sisi *upstream* $7D_h$ aliran terpecah menjadi 3 bagian, yaitu bagian pertama aliran mengarah ke sisi *outer wall*, bagian kedua adanya aliran balik atau *backflow* yang terjadi akibat adanya *IDB* yang berbentuk silinder sehingga membentuk *vortex* pada daerah *wake*, sedangkan bagian ketiga aliran lebih mengarah pada sisi *inner wall*. Pada *elbow* 90° diambil beberapa data yaitu sudut 30° dan 60° , tanpa adanya *IDB* aliran dengan kecepatan tertinggi ada di sisi *inner wall* sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ aliran sudah mulai mengarah ke bagian *outer wall* dikarenakan adanya *IDB*. Sedangkan profil kecepatan sisi *downstream*, tanpa ada *IDB* terjadi defisit aliran pada $x/D_h = 1$ hal ini diduga akibat adanya *secondary flow* yang terbentuk, *secondary flow* ialah pusaran yang terbentuk akibat adanya kelengkungan *elbow* 90° dan perbedaan tekanan dimana tekanan *outer wall* lebih besar daripada tekanan *inner wall* sehingga profil aliran lebih mengarah pada sisi *outer wall* dan pusaran *secondary flow* membuat aliran utama searah sumbu x terhambat atau disebut sebagai *blockage area*. Sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ sama halnya tanpa *IDB* yaitu pada $x/D_h = 1$ aliran mengalami defisit di sisi sekitar *inner wall* dan sisi *center*. Dari gambar 4.1 juga ditampilkan kontur kecepatan, sisi *upstream* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ kontur kecepatan berwarna hijau yang menandakan kecepatan pada daerah tersebut tinggi sedangkan pada sisi *inner* dan *outer wall* berwarna biru muda yang menandakan pada daerah tersebut memiliki kecepatan rendah tetapi pada sisi *upstream* dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ terdapat kontur yang berbeda dikarenakan adanya *IDB* sehingga dapat terlihat sisi *upper* dan *lower* dari *IDB* yang berupa silinder terdapat kontur berwarna merah dan oranye yang mengindikasikan kecepatan berkisar 8 m/s atau kecepatan tinggi sedangkan pada bagian belakang *IDB* terdapat warna biru yang mengindikasikan kecepatan rendah berkisar antara 0 – 1 m/s dan

bisa juga diindikasikan adanya kecepatan minus karena adanya *backflow* pada daerah tersebut, sisi *elbow* 90° tanpa *IDB* menunjukkan kontur sisi *inner wall* dengan warna kuning dan sedikit warna hijau, untuk kontur sisi *center* berwarna hijau dan kontur sisi *outer wall* berwarna biru hal ini yang mengindikasikan bahwa pada *elbow* 90° terjadi perbedaan tekanan yang diduga mulai terbentuknya *secondary flow* sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ hampir sama dengan tanpa *IDB* tetapi pada sisi *inner wall* kontur berwarna oranye sudah tereduksi dan lebih banyak kontur berwarna hijau hal ini diduga dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,064$ dapat mereduksi *pressure drop* akibat adanya efek dari kelengkungan *elbow* 90° . Sisi *downstream* menunjukkan perbedaan kontur antara tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$, dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,064$ kontur kecepatan sisi *inner* lebih besar daripada tanpa *IDB* hal ini ditunjukkan dengan warna kontur biru yang lebih luas tersebar. Kontur kecepatan berwarna biru mengindikasikan kecepatan rendah dan diduga dapat membuat adanya aliran yang mengalami *backflow* dan juga dapat dikatakan pada daerah tersebut terdapat *energy kinetic losses* yaitu aliran yang kecepataannya berkurang akibat adanya *secondary flow* yang menyebabkan aliran lebih mengarah ke sisi *outer wall*.

Untuk memperjelas profil kecepatan sepanjang *ducting* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dari gambar 4.1 akan dibahas pada gambar 4.2 dalam bentuk grafik. Distribusi kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}) dimana u adalah kecepatan local pada suatu titik tertentu atau disebut sebagai *velocity magnitude* pada perangkat lunak *fluent* sedangkan U_{ref} yaitu kecepatan udara masuk/*velocity inlet ducting* yang sudah ditentukan diawal sebesar 5 m/s. Absis grafik profil kecepatan menunjukkan nilai z/D_h dimana nilai $z/D_h = 1$ merupakan sisi *outer wall* sedangkan $z/D_h = 0$ merupakan sisi *inner wall*, pada ordinat grafik profil kecepatan menunjukkan nilai u/U_{ref} dimana nilai $u/U_{ref} = 1,4$.



Gambar 4.2. Grafik profil kecepatan bidang *horizontal* tanpa dan dengan IDB $d/D_h = 0,064$

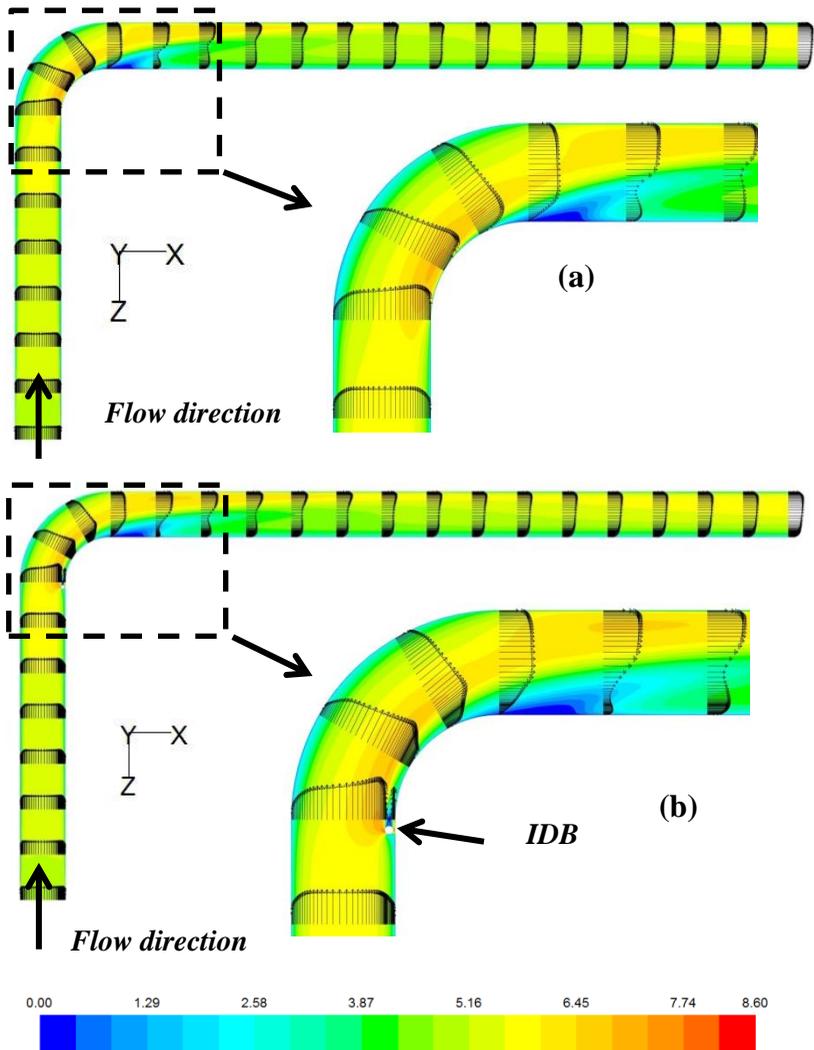
- (a) Sudut 0° (b) sudut 90° (c) $x/D_h = 1$ (d) $x/D_h = 2$ (e) $x/D_h = 8$
 (f) $x/D_h = 14$

Untuk melihat proses *recovery* aliran maka diperlukan *section* acuan yaitu *section upstream* $3D_h$. Aliran pada sudut 0° atau *inlet elbow* yang melewati *ducting* tanpa *IDB* mengalami perubahan profil kecepatan dimana pada sisi *inner wall* profil kecepatan lebih besar dari sisi *outer wall* sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ aliran mengalami defisit diakibatkan penambahan *IDB* yang berbentuk silinder membuat adanya aliran yang diduga mengalami *backflow* sehingga aliran utama yang mengarah sisi *inner wall* mulai berpindah pada sisi *outer wall* sehingga kecepatan tertinggi ada pada sisi *outer wall* hal ini ditunjukkan pada gambar 4.2 (a). Gambar 4.2 (b) menunjukkan profil kecepatan yang sama antara tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ tetapi dengan adanya *IDB* kecepatan tertinggi masih berada pada sisi *center* sedangkan tanpa *IDB* kecepatan tertinggi berada pada sisi *inner wall*. Defisit aliran mulai terbentuk pada $x/D_h = 1$, dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,064$ aliran terdefisit lebih awal yang dapat diduga dengan penambahan *IDB* $d/D_h = 0,064$ membuat separasi aliran lebih awal terjadi sehingga membuat *pressure drop* yang terjadi lebih besar bentuk profil kecepatan ini diilustrasikan pada gambar 4.2 (c dan d) sedangkan pada gambar 4.2 (e dan f) aliran sudah mulai sama antara tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dan sudah mulai *recovery* hingga mendekati sisi *upstream* $3D_h$.

4.1.2 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang *ducting* dengan kontur kecepatan (tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$), $Re = 3,97 \times 10^4$

Profil kecepatan ditampilkan untuk melihat profil tiap *cross-section* serta sejauh mana aliran dapat *recovery* serta mencapai *fully-developed flow*. Perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ bidang *horizontal* koordinat $y/D_h = 0,5$ diilustrasikan pada gambar 4.3. Dari gambar 4.3 dapat terlihat aliran saat memasuki *ducting* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ sisi *upstream* profil kecepatan yang terbentuk mengalami perkembangan sampai sejauh $6D_h$, perubahan terjadi saat aliran melalui *upstream* $7D_h$.

Dapat terlihat pada profil kecepatan tanpa *IDB* sisi *upstream* $7D_h$ profil kecepatan tertinggi ada pada bagian sisi *inner wall elbow* sampai sejauh *outlet elbow* sedangkan profil kecepatan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ sisi *upstream* $7D_h$ aliran terpecah menjadi 3 bagian sama halnya dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$. Pada *elbow* 90° terdapat 2 sudut yang mengilustrasikan profil kecepatan pada daerah tersebut, terdapat 2 sudut yang diambil yaitu sudut 30° dan 60° , tanpa adanya *IDB* aliran dengan kecepatan tertinggi ada di sisi *inner wall* sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ aliran sudah mulai mengarah ke bagian *outer wall* dikarenakan pengaruh besarnya diameter *IDB*. Pada profil kecepatan sisi *downstream*, tanpa *IDB* terjadi defisit aliran pada $x/D_h = 1$ yang diduga terjadi akibat adanya *secondary flow*, sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ terjadi pula defisit aliran. Selain profil kecepatan, gambar 4.3 juga menampilkan kontur kecepatan untuk melihat daerah mana saja yang memiliki kecepatan rendah maupun tinggi seperti pada sisi *upstream* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ terdapat kontur kecepatan berwarna hijau sedangkan pada sisi *inner* dan *outer wall* berwarna biru muda yang menandakan pada daerah tersebut memiliki kecepatan rendah, dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ sama halnya dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ pada sisi *upstream* terdapat kontur yang berbeda dikarenakan pengaruh dari *IDB*.



Gambar 4.3 Visualisasi profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran bidang *horizontal*
(a) tanpa dan (b) dengan IDB $d/D_h = 0,08$.

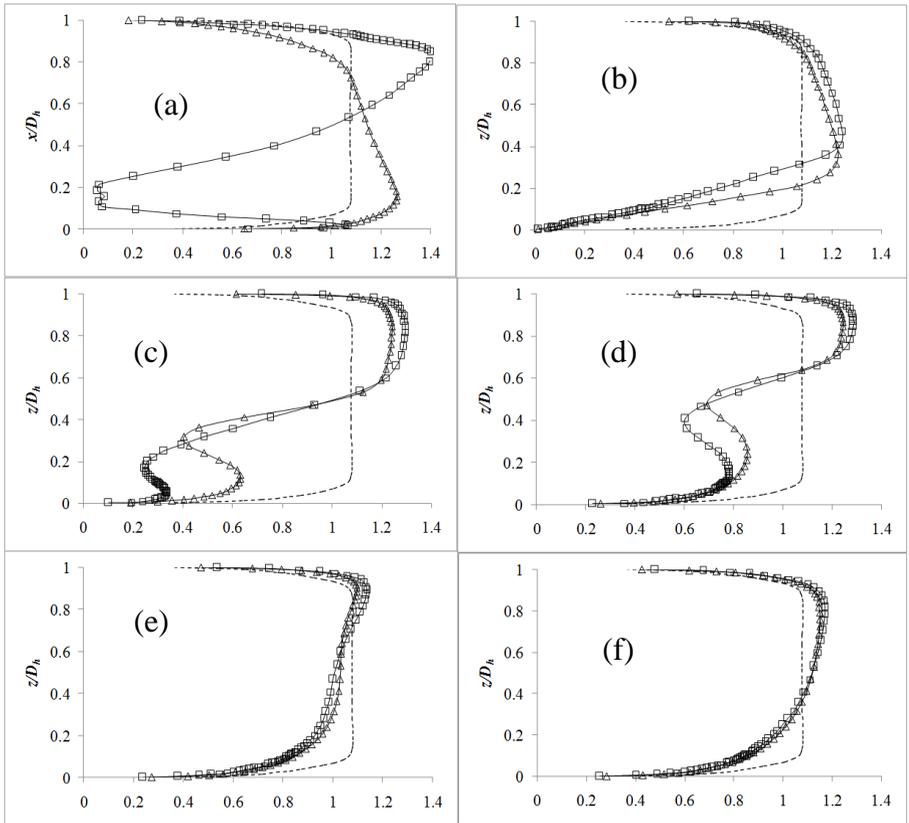
Pada *section elbow* 90° tanpa *IDB* menunjukkan perbedaan kontur kecepatan antara sisi *inner* dan *outer wall* diakibatkan sudah mulai terbentuknya *secondary flow* ditunjukkan dengan kontur sisi *inner wall* lebih tinggi nilainya dari sisi *outer wall*. Sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ sama halnya dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dimana bagian sisi *inner wall* sudah dapat tereduksi akibat penambahan *IDB* tetapi reduksi ini tidak sebgus dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$. Sisi *downstream* menunjukkan perbedaan kontur antara tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$, dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,08$ kontur kecepatan sisi *inner* lebih besar daripada tanpa *IDB* hal ini ditunjukkan dengan kontur biru atau kecepatan rendah yang lebih menyebar dibandingkan tanpa *IDB* yang diduga terdapat aliran yang berbalik arah dan tidak dapat mengikuti kontur bodi sehingga terdapat *energy kinetic losses*.

Untuk memperjelas profil kecepatan sepanjang *ducting* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ dari gambar 4.3 akan dibahas pada gambar 4.4 dalam bentuk grafik. Distribusi kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}) dimana u adalah kecepatan local pada suatu titik tertentu atau disebut sebagai *velocity magnitude* pada perangkat lunak *fluent* sedangkan U_{ref} yaitu kecepatan udara masuk/*velocity inlet ducting* yang sudah ditentukan diawal sebesar 11 m/s. Absis grafik profil kecepatan menunjukkan nilai z/D_h dimana nilai $z/D_h = 1$ merupakan sisi *outer wall* sedangkan $z/D_h = 0$ merupakan sisi *inner wall*, pada ordinat grafik profil kecepatan menunjukkan nilai u/U_{ref} dimana nilai $u/U_{ref} = 1,4$.

Untuk melihat proses *recovery* aliran maka diperlukan *section* acuan yaitu *section upstream* $3D_h$. Aliran pada sudut 0° atau *inlet elbow* yang melewati *ducting* tanpa *IDB* mengalami perubahan profil kecepatan dimana pada sisi *inner wall* profil kecepatan lebih tinggi dari sisi *outer wall* sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ aliran mengalami defisit diakibatkan variasi *IDB* sehingga membuat adanya aliran mengarah sisi *inner wall* mulai berpindah pada sisi *outer wall* sehingga kecepatan tertinggi ada

pada sisi *outer wall* dan *center* hal ini ditunjukkan pada gambar 4.4 (a) berbeda dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dimana sisi *outer wall* lebih kuat dibandingkan sisi *center* maupun *inner wall*.

Gambar 4.4 (b) menunjukkan profil kecepatan dengan adanya *IDB* kecepatan tertinggi masih berada pada sisi *center* sedangkan tanpa *IDB* kecepatan tertinggi berada pada sisi *inner wall*. Defisit aliran mulai terbentuk pada $x/D_h = 1$, dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,08$ aliran terdefisit lebih awal sehingga adanya aliran yang terseparasi atau tidak dapat mengikuti kontur bodi bentuk profil kecepatan ini diilustrasikan pada gambar 4.4 (c dan d) sedangkan pada gambar 4.4 (e dan f) aliran sudah mulai sama antara tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$ dan sudah mulai *recovery*.



OW = Outer Wall

IW = Inner Wall

----- Upstream 3Dh —△— Tanpa IDB —□— $d/D_h = 0,08$

Gambar 4.4. Grafik profil kecepatan bidang *horizontal* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,08$

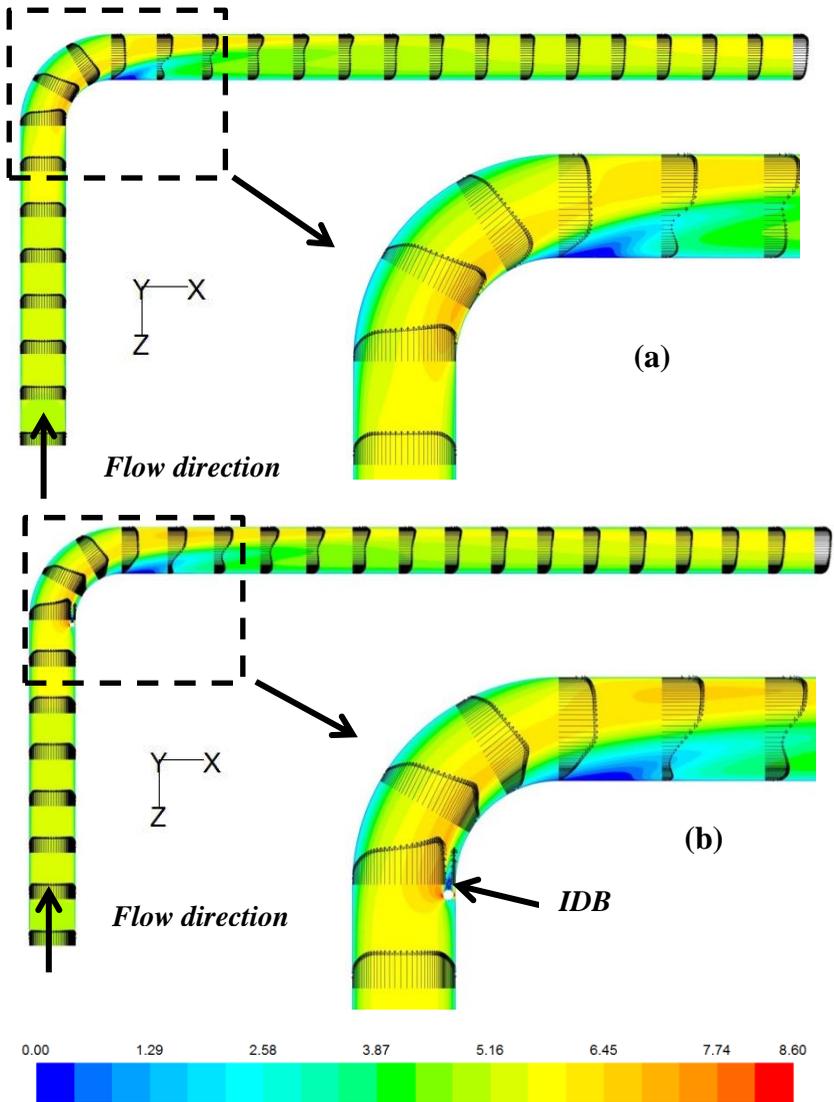
(a) Sudut 0° (b) sudut 90° (c) $x/D_h = 1$ (d) $x/D_h = 2$ (e) $x/D_h = 8$
(f) $x/D_h = 14$

4.1.3 Perbandingan distribusi profil kecepatan sepanjang *ducting* dengan kontur kecepatan (tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$), $Re = 3,97 \times 10^4$

Perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ bidang *horizontal* koordinat $y/D_h = 0,5$ diilustrasikan pada gambar 4.5. Dari gambar 4.5 dapat terlihat aliran saat memasuki *ducting* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ sisi *upstream* profil kecepatan yang terbentuk mengalami perkembangan sampai sejauh $6D_h$.

Dapat terlihat pada profil kecepatan tanpa *IDB* sisi *upstream* $7D_h$ profil kecepatan tertinggi ada pada bagian sisi *inner wall elbow* sampai sejauh *outlet elbow* sedangkan profil kecepatan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ sisi *upstream* $7D_h$ aliran terpecah menjadi 3 bagian sama halnya dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dan *IDB* $d/D_h = 0,08$ tetapi pada *IDB* $d/D_h = 0,1$ terdapat aliran yang berbalik arah dari aliran utama dikarenakan variasi *IDB* $d/D_h = 0,1$ adalah variasi diameter yang besar sehingga *vortex* pada area wake yang ditimbulkan *IDB* berdampak pada *inlet elbow*. Pada *elbow* 90° terdapat 2 sudut yang mengilustrasikan profil kecepatan pada daerah tersebut, terdapat 2 sudut yang diambil yaitu sudut 30° dan 60° , tanpa adanya *IDB* aliran dengan kecepatan tertinggi ada di sisi *inner wall* sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ aliran sudah mulai mengarah ke bagian *outer wall* dikarenakan pengaruh besarnya diameter *IDB*. Profil kecepatan sisi *downstream*, tanpa *IDB* dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ terjadi defisit aliran pada $x/D_h = 1$ yang diduga terjadi akibat adanya *secondary flow*, defisit aliran sudah mulai berkurang ketika aliran melewati sisi *downstream* $x/D_h = 2$ sampai dengan *outlet* dari *ducting*. Selain profil kecepatan bidang *horizontal* gambar 4.5 juga menampilkan kontur kecepatan untuk melihat daerah mana saja yang memiliki kecepatan rendah maupun tinggi sehingga dapat terlihat potensi aliran yang mengalami *backflow*, separasi maupun *backflow* seperti pada sisi *upstream* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ terdapat kontur kecepatan berwarna hijau

sedangkan pada sisi *inner* dan *outer wall* berwarna biru muda yang menandakan pada daerah tersebut memiliki kecepatan rendah, dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ sama halnya dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dan *IDB* $d/D_h = 0,08$ pada sisi *upstream* terdapat kontur yang berbeda dikarenakan pengaruh variasi *IDB*, sisi *upper* dan *lower IDB* terdapat kontur berwarna merah dan oranye yang mengindikasikan kecepatan tinggi akibat adanya aliran yang dipaksakan mengikuti kontur dari bodi *IDB* dan juga pada bagian *upper* dan *lower* hampir sama dengan *nozzle* dimana kecepatan tertinggi di sisi *upper* berada dekat dengan *IDB* sedangkan daerah *wake* silinder berwarna biru yang diindikasikan terjadi *vortex* pada daerah tersebut. Selain itu *vortex* yang terjadi di daerah *IDB* diindikasikan karena momentum aliran yang kurang untuk dapat melawan *adverse pressure* sisi *upper* dan *lower* dari *IDB*. Pada *section elbow* 90° tanpa *IDB* menunjukkan perbedaan kontur kecepatan antara sisi *inner* dan *outer wall* diakibatkan sudah mulai terbentuknya *secondary flow* ditunjukkan dengan kontur sisi *inner wall* lebih tinggi nilainya dari sisi *outer wall*. Sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ sama halnya dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dan *IDB* $d/D_h = 0,08$ dimana bagian sisi *inner wall* sudah dapat tereduksi akibat penambahan *IDB* tetapi reduksi ini masih belum dapat mengatasi momentum akibat *adverse pressure* sehingga dapat dikatakan semakin besar variasi *IDB* maka semakin besar pula *pressure drop* yang ditimbulkan. Sisi *downstream* menunjukkan perbedaan kontur antara tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$, dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,1$ kontur kecepatan sisi *inner* lebih besar daripada tanpa *IDB* hal ini ditunjukkan dengan kontur biru atau kecepatan rendah yang lebih menyebar dibandingkan tanpa *IDB* yang diduga terdapat aliran yang berbalik arah dan tidak dapat mengikuti kontur bodi sehingga terdapat *energy kinetic losses*.

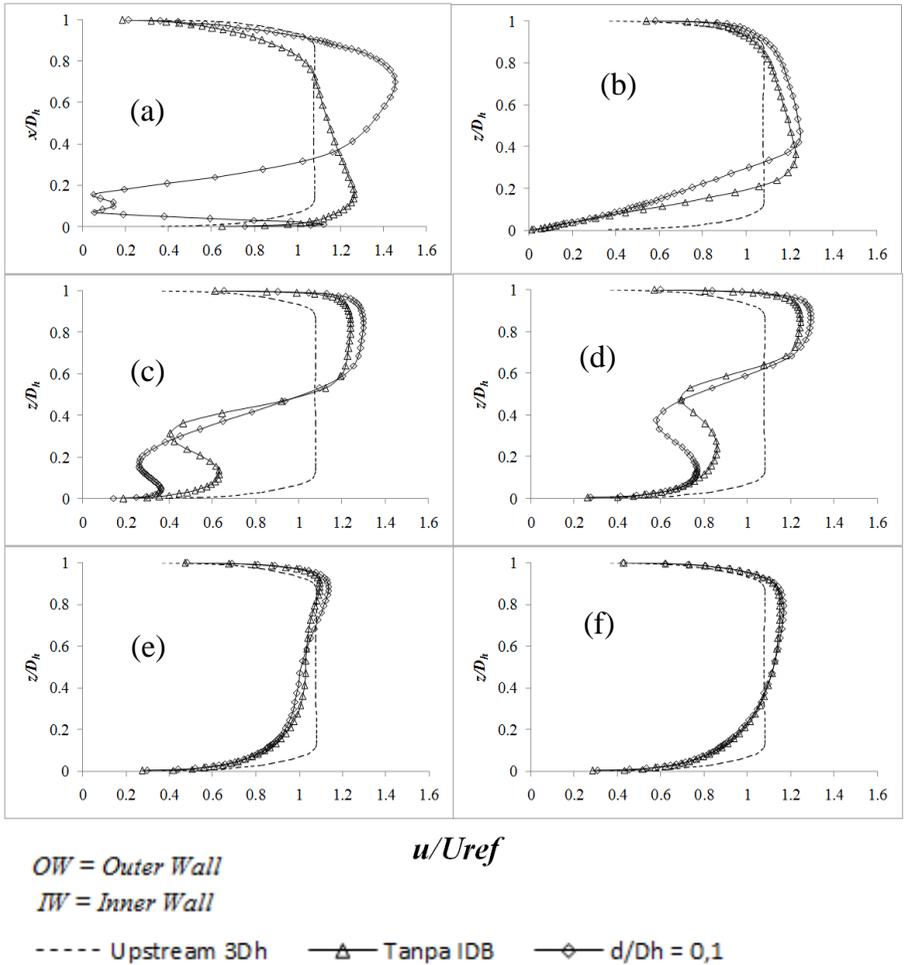


Gambar 4.5 Visualisasi profil kecepatan dan kontur kecepatan aliran bidang *horizontal*
(a) tanpa dan (b) dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$.

Untuk memperjelas profil kecepatan sepanjang *ducting* tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ dari gambar 4.5 akan dibahas pada gambar 4.6 dalam bentuk grafik. Distribusi kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}) dimana u adalah kecepatan local pada suatu titik tertentu atau disebut sebagai *velocity magnitude* pada perangkat lunak *fluent* sedangkan U_{ref} yaitu kecepatan udara masuk/*velocity inlet ducting* yang sudah ditentukan diawal sebesar 11 m/s. Absis grafik profil kecepatan menunjukkan nilai z/D_h dimana nilai $z/D_h = 1$ merupakan sisi *outer wall* sedangkan $z/D_h = 0$ merupakan sisi *inner wall*, pada ordinat grafik profil kecepatan menunjukkan nilai u/U_{ref} dimana nilai $u/U_{ref} = 1,6$.

Untuk melihat proses *recovery* aliran maka diperlukan *section* acuan yaitu *section upstream* $3D_h$. Aliran pada sudut 0° atau *inlet elbow* yang melewati *ducting* tanpa *IDB* mengalami perubahan profil kecepatan dimana pada sisi *inner wall* profil kecepatan lebih tinggi dari sisi *outer wall* sedangkan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ aliran mengalami defisit diakibatkan variasi *IDB* yang lebih besar dari sebelumnya sehingga membuat adanya aliran mengarah sisi *inner wall* mulai berpindah pada sisi *outer wall* sehingga kecepatan tertinggi ada pada sisi *outer wall* dan *center* selain itu sebagian aliran sisi *center* terdapat *backflow* atau adanya aliran balik hal ini ditunjukkan pada gambar 4.6 (a) dimana adanya aliran yang bernilai negatif pada $x/D_h = 0,1$ sehingga semakin besar *IDB* maka akan terbentuk aliran *backflow* yang mempengaruhi kontur dari *elbow* 90° berbeda dengan *IDB* $d/D_h = 0,064$ dan *IDB* $d/D_h = 0,08$ dimana sisi *outer wall* lebih kuat dibandingkan sisi *center* maupun *inner wall* dan tidak terdapat *backflow*. Gambar 4.6 (b) menunjukkan profil kecepatan dengan adanya *IDB* kecepatan tertinggi masih berada pada sisi *center* sedangkan tanpa *IDB* kecepatan tertinggi berada pada sisi *inner wall*. Defisit aliran terbentuk akibat adanya aliran yang terseparasi lebih awal sehingga aliran tidak lagi mengikuti kontur bodi selain itu defisit aliran juga dapat terjadi akibat adanya *secondary flow* yang berpusat di *centerline* dari *ducting* atau pada

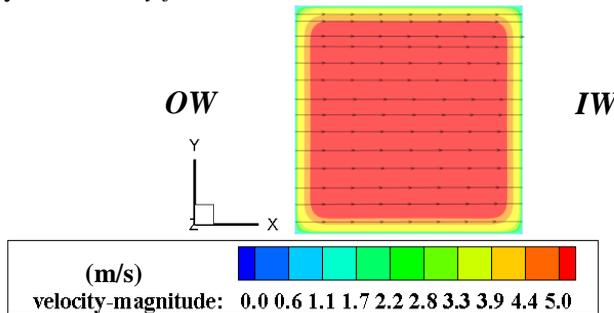
$z/D_h = 0,5$ yang bermula diakibatkan oleh kelengkungan *elbow* 90° , defisit aliran ini mulai terbentuk pada $x/D_h = 1$, dapat dilihat pada gambar 4.6 (c dan d) dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,1$ aliran terdefisit lebih awal sehingga aliran tidak dapat mengikuti kontur bodi sedangkan pada gambar 4.6 (e dan f) aliran sudah mulai sama antara tanpa dan dengan *IDB* $d/D_h = 0,1$ dan sudah mulai mendekati profil sisi *upstream* $5D_h$ atau dapat dikatakan aliran tersebut sudah dapat *recovery* tetapi tanpa dan dengan adanya *IDB* setiap variasi belum dapat menunjukkan adanya aliran yang sudah *fully developed* hal ini diakibatkan pendeknya saluran sisi *downstream*, **Fox & McDonald's** menjelaskan bahwa aliran dapat mencapai *fully developed* ketika saluran sisi *downstream* mencapai lebih dari $25 D_h$ pada kasus ini masih belum tercapainya aliran yang *fully developed* karena panjang sisi *downstream* yaitu $15 D_h$. Hasil visualisasi aliran dengan $Re = 8,74 \times 10^4$ dan $13,5 \times 10^4$ dapat dilihat pada lampiran 2 dan 3.



Gambar 4.6. Grafik profil kecepatan bidang *horizontal* tanpa dengan IDB $d/D_h = 0,1$
 (a) Sudut 0° (b) sudut 90° (c) $x/D_h = 1$ (d) $x/D_h = 2$ (e) $x/D_h = 8$
 (f) $x/D_h = 14$.

4.2 Perbandingan vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section* tanpa dan dengan *IDB* pada $Re = 3,97 \times 10^4$

Pada bab ini akan disampaikan data berupa visualisasi aliran dengan vektor kecepatan dan kontur *pathline* di setiap *surface cross-section* yang diambil dari perangkat lunak *fluent* dan *tecplot*. Dari visualisasi aliran tersebut akan diperoleh perbandingan yang jelas mengenai perilaku aliran yang terjadi pada *ducting* secara 3 D. Hasil dari masing-masing *surface cross-section* yang diambil akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya. Gambar 4.7. mengilustrasikan sisi *upstream* $3D_h$, dimana gambar ini digunakan sebagai pembandingan untuk melihat proses terjadinya *secondary flow*.



Gambar 4.7 Visualisasi *pathline* sisi *upstream* $3D_h$

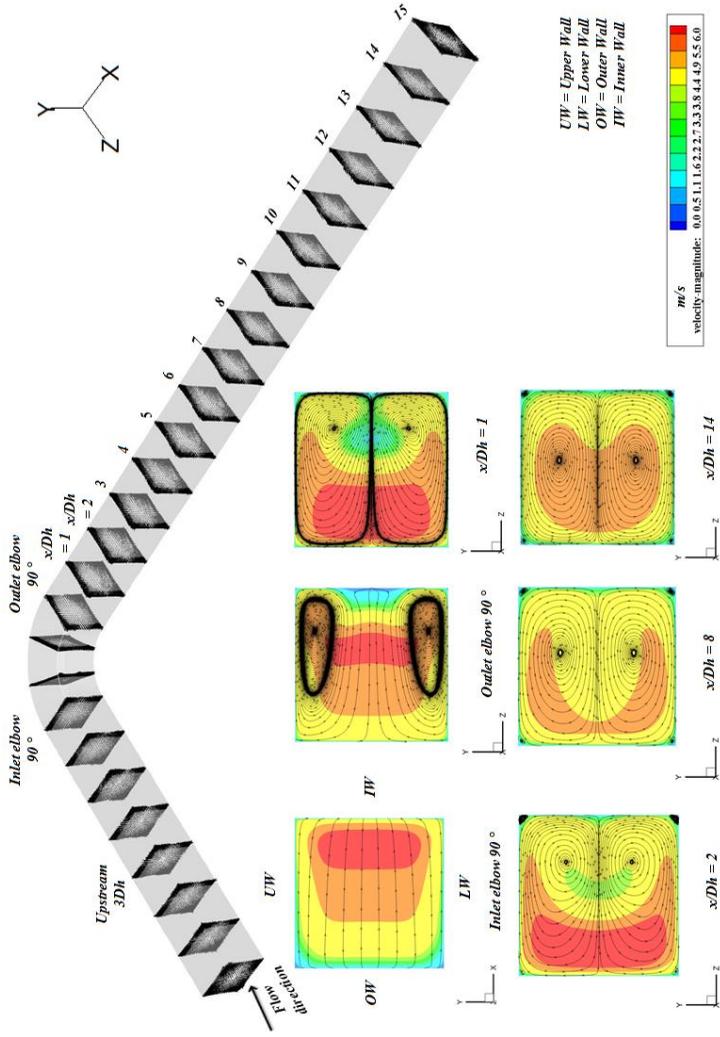
4.2.1 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section* tanpa *IDB*

Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section* tanpa *IDB* mampu menampilkan *secondary flow*. *Surface cross-section* yang diambil mulai dari *inlet elbow*, *outlet elbow*, $x/D_h = 1$, $x/D_h = 2$, $x/D_h = 8$, dan $x/D_h = 14$ untuk kontur *pathline* dan keseluruhan *surface cross-section* untuk vektor kecepatan.

Pada gambar 4.8 *inlet elbow* aliran mengalir dari sisi *outer wall* menuju *inner wall* dikarenakan masih dalam saluran lurus sehingga masih belum terdapat *secondary flow* sedangkan

pada *outlet elbow* sampai dengan $x/D_h = 15$ atau *outlet ducting* aliran sudah mulai terbentuk *secondary flow*, hal ini diakibatkan karena efek kelengkungan *elbow*. Dapat terlihat pada *surface outlet elbow* aliran mengalir dari *inner wall* menuju *outer wall* berulang-ulang hingga membentuk pusaran yang membuat aliran utama dari arah x terhambat. Pusaran tersebut menurut penelitian **Lie et al** 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* mulai berkembang semakin besar pada bagian tengah dari *surface* serta terdapat *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* hal ini ditunjukkan pada *surface* $x/D_h = 1$ selain itu *corner vortex* juga mulai muncul pada $x/D_h = 2$ di *outer wall* bagian *upper* dan *lower wall* sedangkan *base vortex* mulai berkurang dan mulai menjauhi sisi *inner wall* atau sampai $x/D_h = 15$.

Selain kontur *pathline* terdapat juga kontur kecepatan tiap *surface cross-section* dimana pada *inlet elbow* kontur kecepatan tertinggi berada di sisi *inner wall* hal ini ditandai dengan kontur berwarna hijau yaitu memiliki kecepatan tinggi selain itu pada sisi *outer wall* memiliki kecepatan rendah ditandai dengan kontur kecepatan berwarna biru. Sedangkan pada *outlet elbow* sisi *inner wall* terdapat kecepatan rendah diakibatkan *energy kinetic losses* dimana aliran tidak mampu melawan *adverse pressure* sehingga pada bagian tertentu ada aliran yang mengalami *backflow*. Selain itu pada $x/D_h = 1$ sampai dengan $x/D_h = 15$ kontur kecepatan tertinggi mulai berpindah menuju sisi *outer wall* dari *surface* hal ini menunjukkan aliran sudah mampu untuk dapat *recovery* atau profil kecepatan pada *section* tersebut sudah menyerupai *section* bagian *upstream ducting*.



Gambar 4.8. Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline square ducting* bidang horizontal (tanpa *IDB*)

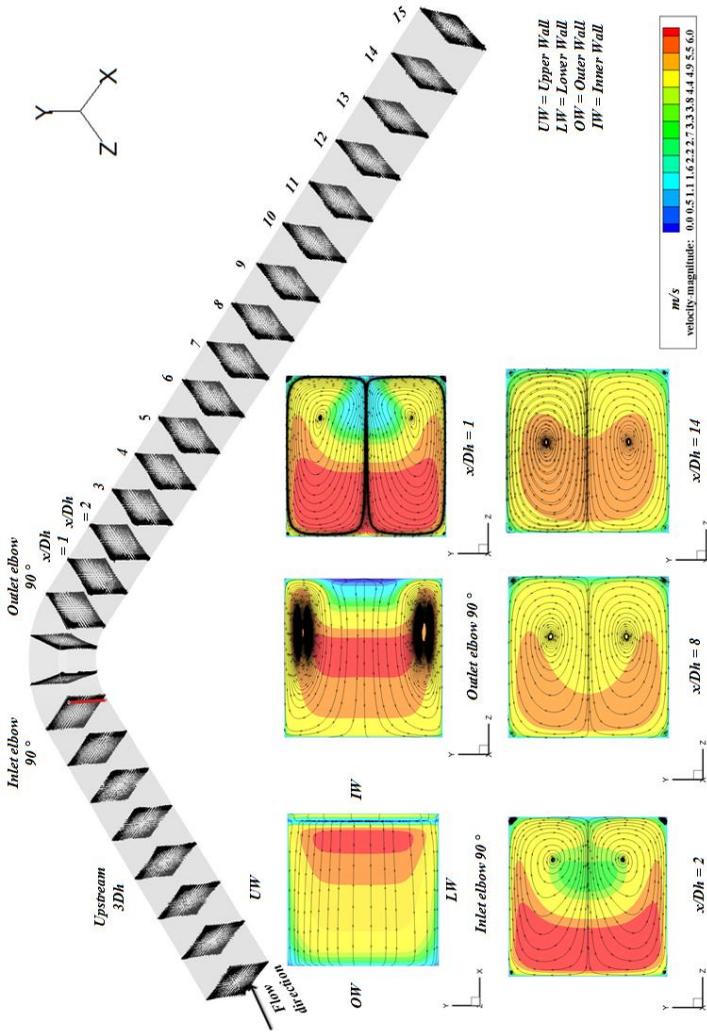
4.2.2 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section IDB* $d/D_h = 0,064$

Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section IDB* $d/D_h = 0,064$ mampu menampilkan *secondary flow* yang terjadi pada *surface* tersebut sehingga apabila diilustrasikan vektor kecepatan yang terjadi dapat dilihat pada gambar 4.9. *Surface cross-section* yang diambil mulai dari *inlet elbow*, *outlet elbow*, $x/D_h = 1$, $x/D_h = 2$, $x/D_h = 8$, dan $x/D_h = 14$ untuk kontur *pathline* dan keseluruhan *surface cross-section* untuk vektor kecepatan.

Pada *inlet elbow* aliran mengalir dari sisi *outer wall* menuju *inner wall* dikarenakan masih dalam saluran lurus sehingga masih belum terdapat *secondary flow* sedangkan pada *outlet elbow* aliran sudah mulai terbentuk *secondary flow* hal ini diakibatkan karena adanya pengaruh *elbow* serta penambahan *IDB* yang membentuk *secondary flow*, dapat terlihat pada *surface outlet elbow* aliran mengalir dari *inner wall* menuju *outer wall* berulang-ulang hingga membentuk pusaran dinamakan sebagai *base vortex*. Dengan adanya penambahan *IDB*, *base vortex* yang terjadi lebih besar daripada tanpa adanya *IDB* selain itu hampir sama dengan tanpa adanya *IDB* terdapat juga *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* hal ini ditunjukkan pada *surface* $x/D_h = 1$ serta *corner vortex* juga mulai muncul pada *outer wall* bagian *upper* dan *lower wall* sedangkan *base vortex* mulai berkurang dan mulai menjauhi sisi *inner wall* atau sampai $x/D_h = 15$.

Selain kontur *pathline* terdapat juga kontur kecepatan tiap *surface cross-section* dimana pada *inlet elbow* kontur kecepatan berbeda dengan tanpa *IDB* dimana karena adanya *IDB* kontur kecepatan pada sisi *inner* mengalami penurunan hal ini ditandai dengan warna hijau muda dan biru selain itu bagian *outer wall* memiliki kontur kecepatan tertinggi ditandai dengan kontur berwarna hijau yaitu memiliki kecepatan tinggi hal ini dikarenakan celah/*gap* yang ada pada *IDB* mempengaruhi jumlah kecepatan yang masuk sehingga aliran utama akan berbelok

kearah *outer wall*. Sedangkan pada *outlet elbow* sisi *inner wall* terdapat kecepatan rendah diakibatkan karena adanya aliran yang terseparasi saat melewati *elbow* serta munculnya *energy kinetic losses* tetapi *backflow* yang diakibatkan oleh aliran yang terseparasi masih belum tampak hal ini terlihat pada sudut 90° atau *outlet elbow*, *base vortex* yang terbentuk masih berada pada sisi *centre* tetapi pada *suction* setelah melewati *elbow*, *base vortex* mulai berpindah ke sisi *inner wall* hal ini berakibat munculnya aliran balik atau *backflow* di daerah tersebut. Pada $x/D_h = 1$ sampai dengan $x/D_h = 15$ kontur kecepatan tertinggi mulai menyebar menuju sisi *outer wall* dan *center* dari *surface* hal ini menunjukkan aliran sudah mampu untuk dapat *recovery* atau profil kecepatan pada *section* tersebut sudah menyerupai *section* bagian *upstream ducting*.



Gambar 4.9. Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* square ducting bidang horizontal ($d/D_h = 0,064$)

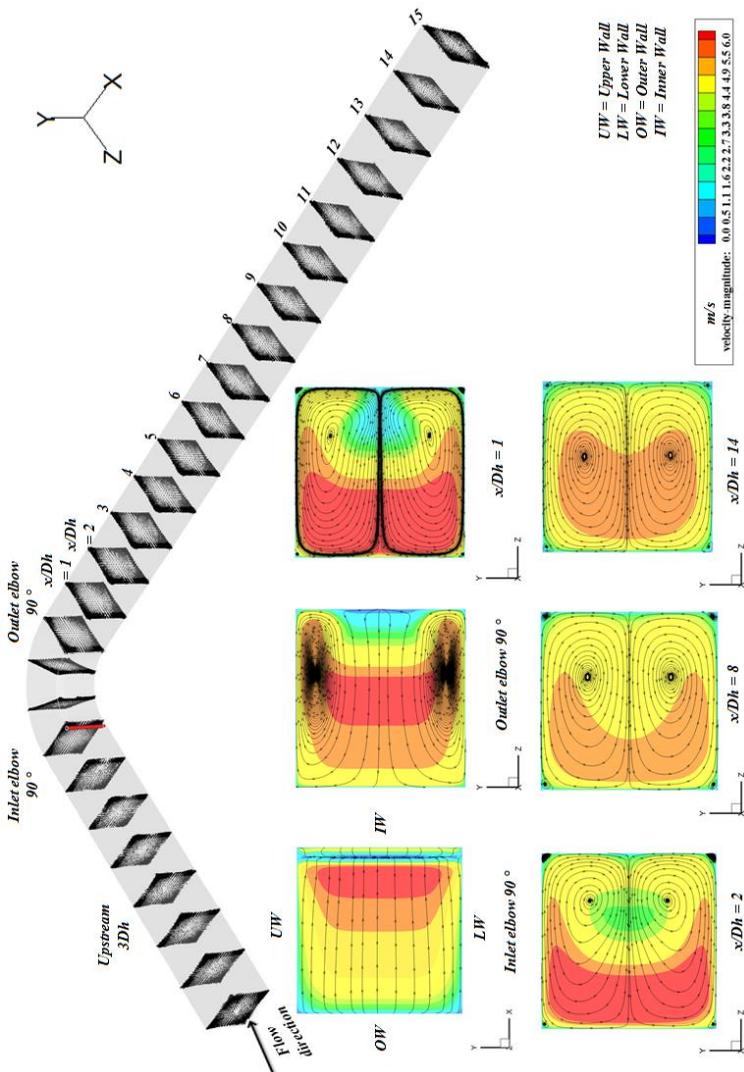
4.2.3 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section IDB* $d/D_h = 0,08$

Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section IDB* $d/D_h = 0,08$ mampu menampilkan *secondary flow* yang terjadi pada *surface* tersebut sehingga apabila diilustrasikan vektor kecepatan yang terjadi dapat dilihat pada gambar 4.10. *Surface cross-section* yang diambil mulai dari *inlet elbow*, *outlet elbow*, $x/D_h = 1$, $x/D_h = 2$, $x/D_h = 8$, dan $x/D_h = 13$ untuk kontur *pathline* dan keseluruhan *surface cross-section* untuk vektor kecepatan.

Pada *inlet elbow* aliran mengalir dari sisi *outer wall* menuju *inner wall* dikarenakan masih dalam saluran lurus sehingga masih belum terdapat *secondary flow* tetapi dikarenakan adanya penambahan *IDB* pada sisi *inner wall* menyebabkan pusaran kecil pada sekitar *upper wall* sisi *IDB* dan juga *lower wall* sisi *IDB* hal ini diakibatkan karena adanya *IDB* membentuk *vortex* di belakang *IDB* akibat adanya daerah *wake* dan kurangnya momentum aliran untuk dapat melawan *adverse pressure* selain itu kontur pada *inlet elbow* menunjukkan warna biru yang mengindikasikan bahwa kecepatan pada daerah tersebut rendah lain halnya dengan bagian *outer wall* dimana pada bagian tersebut memiliki kontur kecepatan tinggi ditandai dengan warna hijau, sedangkan pada *outlet elbow* sampai dengan $x/D_h = 15$ atau *outlet ducting* aliran sudah mulai terbentuk *secondary flow* hal ini diakibatkan karena adanya pengaruh *elbow* serta penambahan *IDB* yang membentuk terjadinya *secondary flow*, dapat terlihat pada *surface outlet elbow* terdapat *base vortex* yang cukup kuat.

Dengan adanya penambahan *IDB*, *base vortex* yang terjadi lebih besar daripada tanpa adanya *IDB* selain itu hampir sama dengan tanpa adanya *IDB* terdapat juga *corner vortex* pada bagian sudut *inner wall* bagian *upper wall* dan *lower wall* hal ini ditunjukkan pada *surface* $x/D_h = 1$ 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* sedangkan *base vortex* mulai berkurang dan mulai menjauhi sisi *inner wall* atau sampai $x/D_h = 15$ tetapi *corner vortex* pada sisi *inner wall* dan *outer wall* masih cukup kuat. Kontur kecepatan dengan ditambahkan *IDB* masih belum bisa mereduksi aliran dikarenakan pusaran *base vortex* yang kuat dibandingkan tanpa *IDB*. 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° .



Gambar 4.10. Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline square ducting* bidang horizontal ($d/D_h = 0,08$)

4.2.4 Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section IDB* $d/D_h = 0,1$

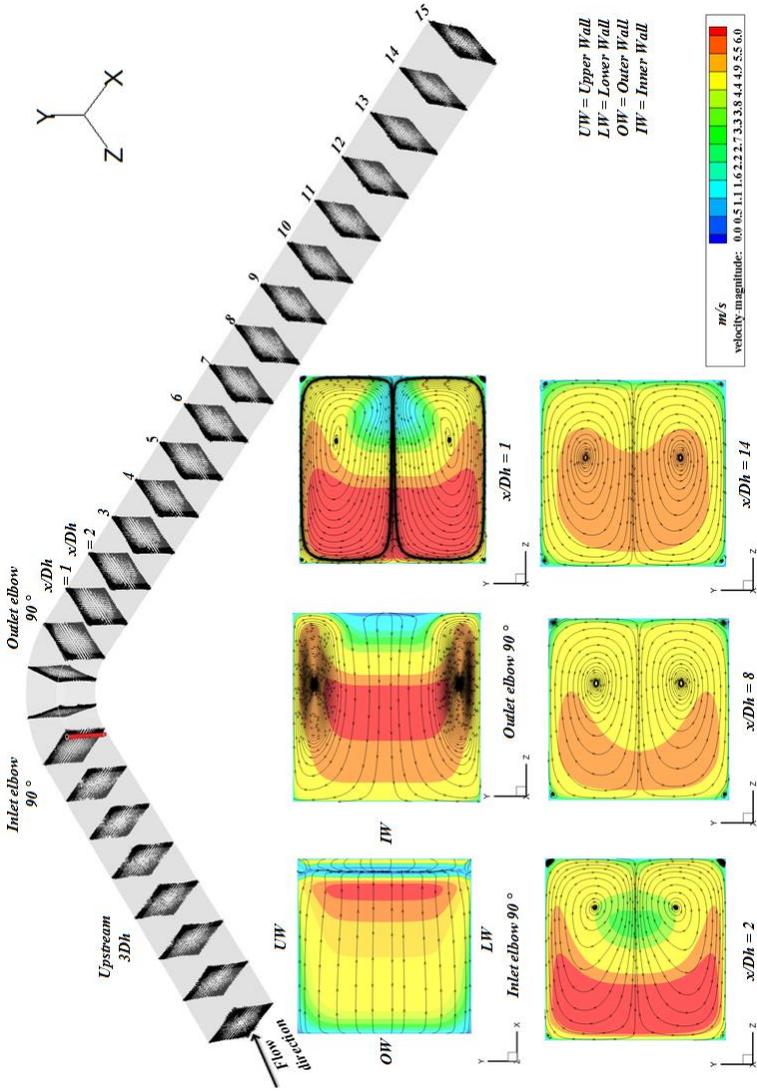
Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline* setiap *surface cross-section IDB* $d/D_h = 0,1$ mampu menampilkan *secondary flow* yang terjadi pada *surface* tersebut sehingga apabila diilustrasikan vektor kecepatan yang terjadi dapat dilihat pada gambar 4.11. *Surface cross-section* yang diambil mulai dari *inlet elbow*, *outlet elbow*, $x/D_h = 1$, $x/D_h = 2$, $x/D_h = 8$, dan $x/D_h = 14$ untuk kontur *pathline* dan keseluruhan *surface cross-section* untuk vektor kecepatan.

Pada *inlet elbow* aliran mengalir dari sisi *outer wall* menuju *inner wall* dikarenakan masih dalam saluran lurus sehingga masih belum terdapat *secondary flow* tetapi dikarenakan adanya penambahan *IDB* pada sisi *inner wall* menyebabkan pusaran kecil yang cukup kuat pada sekitar *upper wall* sisi *IDB* dan juga *lower wall* sisi *IDB* selain itu kontur pada *inlet elbow* menunjukkan warna biru yang mengindikasikan bahwa kecepatan pada daerah tersebut rendah lain halnya dengan bagian *outer wall* dimana pada bagian tersebut memiliki kontur kecepatan tinggi ditandai dengan warna hijau, sedangkan pada *outlet elbow* sampai dengan $x/D_h = 15$ atau *outlet ducting* aliran sudah mulai terbentuk *secondary flow* hal ini diakibatkan karena adanya pengaruh *elbow* serta penambahan *IDB* yang membentuk terjadinya *secondary flow*, dapat terlihat pada *surface outlet elbow* terdapat *base vortex* yang cukup kuat.

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 ulang hingga membentuk *base vortex*. Semakin besar *base vortex* yang terjadi maka akan berdampak pada *pressure drop* dimana *pressure drop* yang terjadi akan semakin besar sehingga penggunaan *ducting* akan berkurang fungsinya. Dengan bertambahnya diameter *IDB* ternyata masih belum bisa mereduksi *secondary flow* yang terjadi dapat terlihat pada $x/D_h = 1$ *base vortex* yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan tanpa *IDB*

dan juga variasi diameter sebelumnya selain itu pada $x/D_h = 2$ *base vortex* sudah mulai cepat berpindah menuju sisi tengah dan *outer wall* sehingga aliran utama yang terhambat pada bagian *upper wall* dan *lower wall* sudah mulai berkurang serta kontur kecepatan pada bagian *outer wall* sudah mulai berkurang atau bisa disebut sebagai *recovery* aliran.

Dapat dikatakan dengan adanya *IDB* ternyata dapat menambah *pressure drop* yang terjadi hal ini digambarkan dengan perbedaan ukuran *base vortex* dimana dengan penambahan *IDB* dan berbagai variasinya menimbulkan *base vortex* yang lebih besar daripada tanpa adanya *IDB*. Hasil kontur *pathline* dengan $Re = 8,74 \times 10^4$ dan $13,5 \times 10^4$ dapat dilihat pada lampiran 4 dan 5.



Gambar 4.11. Visualisasi vektor kecepatan dan kontur *pathline square ducting* bidang horizontal ($d/D_h = 0,1$)

4.3 Perbandingan data pada setiap variasi model uji *ducting*

Pada sub bab ini akan disampaikan data kuantitatif dan kualitatif dari keseluruhan hasil variasi *IDB*, data kuantitatif yang disampaikan berupa tabel dan grafik *pressure drop ducting*, grafik profil kecepatan serta grafik *coefficient of pressure elbow*. Data kualitatif yang disampaikan berupa visualisasi *pathline* pada *section* uji.

Data kuantitatif berupa tabel *pressure drop ducting* diambil dari hasil olahan perangkat lunak *fluent* menggunakan *facet average static pressure* pada *section* $2D_h$ dari *inlet duct* yang dijadikan sebagai *pressure inlet* dan $14D_h$ dari *outlet elbow* yang dijadikan sebagai *pressure outlet* pada 3 variasi *Re* serta dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh **Ramadan,2017** sehingga dapat diilustrasikan pada tabel 4.1, 4.2 dan 4.3.

Tabel 4.1 *Pressure drop section inlet dan outlet pada $Re = 3,97 \times 10^4$*

Variasi <i>IDB</i>	<i>Inlet</i> (Pa) simulasi	<i>Outlet</i> (Pa) simulasi	ΔP (Pa) simulasi	ΔP (Pa) eksperimen
Tanpa <i>IDB</i>	-19.4942	-33.415	13.92084	8.54
$d/D_h = 0,064$	-15.1678	-30.1304	14.96257	10.69
$d/D_h = 0,08$	-8.99522	-24.5345	15.53931	10.86
$d/D_h = 0,1$	-1.49696	-17.1274	15.63043	3.46

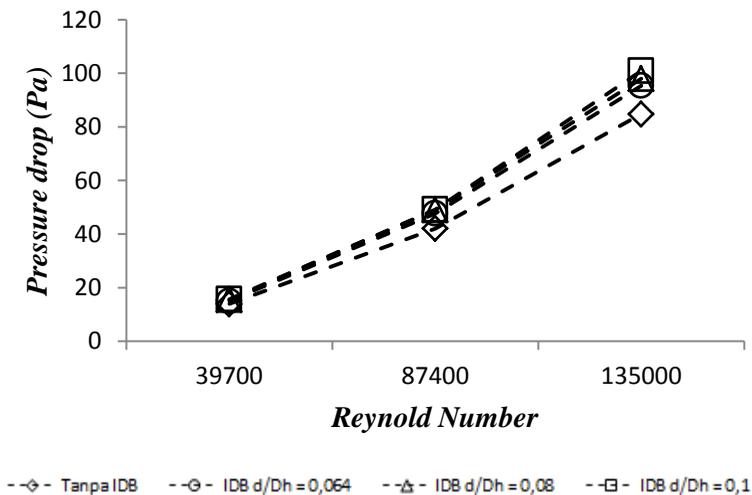
Tabel 4.2 *Pressure drop section inlet dan outlet pada $Re = 8,74 \times 10^4$*

Variasi <i>IDB</i>	<i>Inlet</i> (Pa) simulasi	<i>Outlet</i> (Pa) simulasi	ΔP (Pa) simulasi	ΔP (Pa) eksperimen
Tanpa <i>IDB</i>	-88.2324	-130.293	42.06109	59.74
$d/D_h = 0,064$	-79.7152	-127.413	47.69766	45.31
$d/D_h = 0,08$	-73.3918	-122.428	49.03589	45.95
$d/D_h = 0,1$	-71.0697	-120.24	49.17018	40.88

Tabel 4.3 *Pressure drop section inlet dan outlet pada $Re = 13,5 \times 10^4$*

Variasi <i>IDB</i>	<i>Inlet</i> (Pa) simulasi	<i>Outlet</i> (Pa) simulasi	ΔP (Pa) simulasi	ΔP (Pa) eksperimen
Tanpa <i>IDB</i>	-222.727	-307.482	84.75494	107.75
$d/D_h = 0,064$	-199.77	-295.135	95.36538	101.79
$d/D_h = 0,08$	-202.529	-300.511	97.98184	107.29
$d/D_h = 0,1$	-202.109	-302.984	100.875	101.65

Nilai *pressure drop* dipengaruhi oleh kelengkungan *elbow* serta penambahan *IDB* dapat dilihat pada tabel 4.1, 4.2 dan 4.3 tanpa adanya *IDB pressure drop* yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan ketika ditambahkan *IDB*, *pressure drop* yang terjadi semakin naik seiring dengan variasi diameter sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan adanya *IDB* maka *pressure drop* yang terjadi akan naik. Dapat dikatakan bahwa dengan adanya *IDB*, aliran belum mampu untuk melawan momentum aliran yang diakibatkan oleh kelengkungan *elbow* sehingga dengan adanya *IDB* aliran akan terseparasi lebih awal dibandingkan tanpa *IDB*. Selain itu dengan bertambahnya variasi $Re = 3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ *pressure drop* yang terjadi semakin besar dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 *Pressure drop square duct* dengan *elbow* 90°. Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$ dan $0,1$.

Dari gambar 4.12 dapat terlihat tanpa adanya *IDB* dalam berbagai variasi *Re* dapat mereduksi *pressure drop* dibandingkan dengan adanya penambahan *IDB*. Selain itu seiring dengan bertambahnya kecepatan maka *pressure drop* yang terjadi semakin besar. Perbedaan terjadi pada hasil *pressure drop* simulasi dan hasil *pressure drop* eksperimen dimana pada hasil eksperimen dengan adanya *IDB pressure drop* semakin turun sedangkan hasil numerik menunjukkan *trendline* kenaikan dengan adanya *IDB* terdapat beberapa hal yang menyebabkan hal tersebut dapat terjadi diantaranya factor dari model turbulensi yang kurang akurat untuk dapat menampilkan *reattachment* dari *IDB* ke *elbow 90°* sehingga aliran masih tetap lurus mengikuti kontur selain itu perbedaan material yang dibuat *default* dari perangkat lunak *fluent* masih belum dapat menyamakan hasil dengan material eksperimen hal ini berdampak pada kekasaran dinding permukaan *ducting*.

Untuk dapat melihat bagian dari *ducting* yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar sehingga dibuatkan tabel dan grafik *pressure drop upstream, elbow 90°, dan downstream* yang ditunjukkan pada gambar 4.13, 4.14 dan 4.15 serta tabel 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12.

Tabel 4.4 *Pressure drop section upstream* pada $Re = 3,97 \times 10^4$

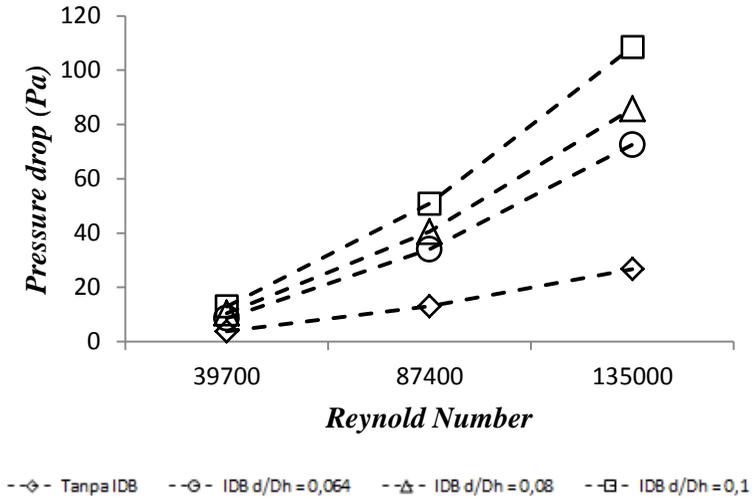
Variasi <i>IDB</i>	<i>Inlet duct</i> (Pa)	<i>Inlet elbow</i> (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa <i>IDB</i>	-19.4942	-23.29	3.7958
$d/D_h = 0,064$	-15.1678	-23.80	8.6322
$d/D_h = 0,08$	-8.99522	-19.43	10.43478
$d/D_h = 0,1$	-1.49696	-14.45	12.95304

Tabel 4.5 *Pressure drop section upstream pada $Re = 8,74 \times 10^4$*

Variasi <i>IDB</i>	<i>Inlet duct</i> (Pa)	<i>Inlet elbow</i> (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa <i>IDB</i>	-88.2324	-101.23	12.9976
$d/D_h = 0,064$	-79.7152	-113.71	33.9948
$d/D_h = 0,08$	-73.3918	-113.87	40.4782
$d/D_h = 0,1$	-71.0697	-121.86	50.7903

Tabel 4.6 *Pressure drop section upstream pada $Re = 13,5 \times 10^4$*

Variasi <i>IDB</i>	<i>Inlet duct</i> (Pa)	<i>Inlet elbow</i> (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa <i>IDB</i>	-222.727	-249.45	26.723
$d/D_h = 0,064$	-199.77	-272.27	72.5
$d/D_h = 0,08$	-202.529	-288.30	85.771
$d/D_h = 0,1$	-202.109	-310.58	108.471



Gambar 4.13. *Pressure drop upstream square duct.* Variasi Reynolds Number $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter IDB $d/D_h = 0,064$; $0,08$; $0,1$.

Tabel 4.7 *Pressure drop section elbow pada $Re = 3,97 \times 10^4$*

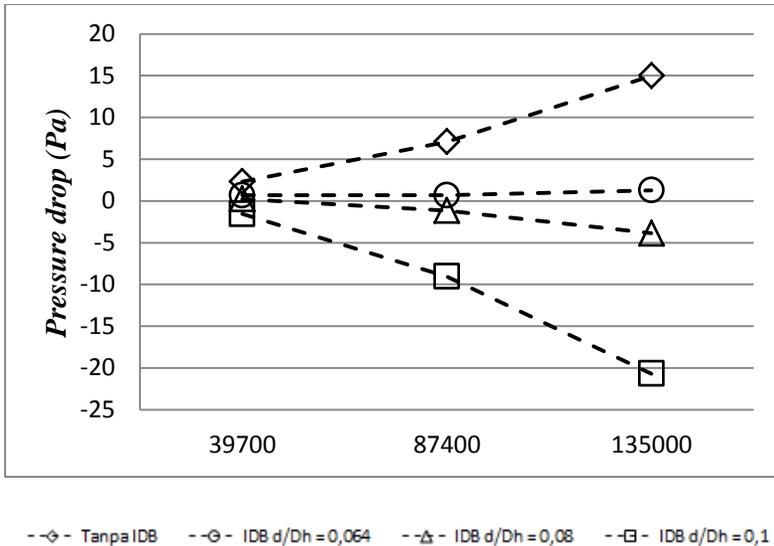
Variasi IDB	Inlet elbow (Pa)	Outlet elbow (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa IDB	-23.29	-25.60	2.3
$d/D_h = 0,064$	-23.80	-24.47	0.66
$d/D_h = 0,08$	-19.43	-18.89	-0.54
$d/D_h = 0,1$	-14.45	-11.86	-2.59

Tabel 4.8 *Pressure drop section elbow pada $Re = 8,74 \times 10^4$*

Variasi IDB	Inlet elbow (Pa)	Outlet elbow (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa IDB	-101.23	-108.32	7.08
$d/D_h = 0,064$	-113.71	-114.25	0.54
$d/D_h = 0,08$	-113.87	-109.21	-4.65
$d/D_h = 0,1$	-121.86	-107.64	-14.22

Tabel 4.9 *Pressure drop section elbow pada $Re = 13,5 \times 10^4$*

Variasi IDB	Inlet elbow (Pa)	Outlet elbow (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa IDB	-249.45	-264.43	14.97
$d/D_h = 0,064$	-272.27	-273.35	1.08
$d/D_h = 0,08$	-288.30	-277.84	-10.46
$d/D_h = 0,1$	-310.58	-280.38	-30.19



Gambar 4.14. Pressure drop elbow 90°. Variasi Reynolds Number $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter IDB $d/D_h = 0,064; 0,08; 0,1$.

Tabel 4.10 Pressure drop section downstream pada $Re = 3,97 \times 10^4$

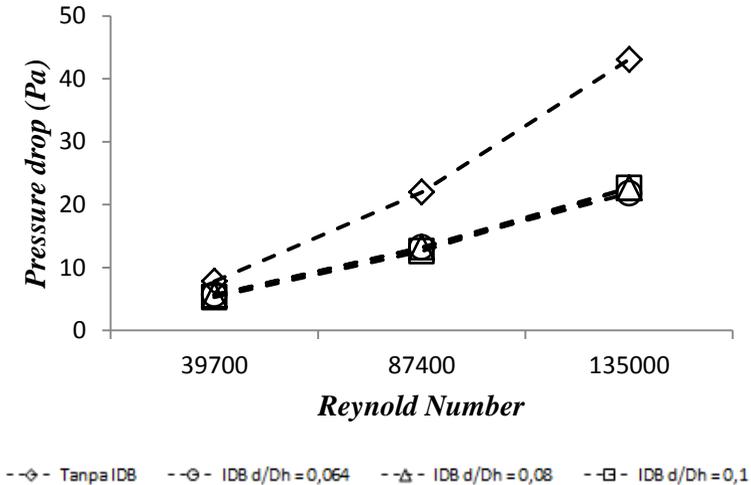
Variasi IDB	Outlet elbow (Pa)	Outlet duct (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa IDB	-25.60	-33.415	7.815
$d/D_h = 0,064$	-24.47	-30.1304	5.6604
$d/D_h = 0,08$	-18.89	-24.5345	5.6445
$d/D_h = 0,1$	-11.86	-17.1274	5.2674

Tabel 4.11 *Pressure drop section downstream pada $Re = 8,74 \times 10^4$*

Variasi IDB	Outlet elbow (Pa)	Outlet duct (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa IDB	-108.32	-130.293	21.973
$d/D_h = 0,064$	-114.25	-127.413	13.163
$d/D_h = 0,08$	-109.21	-122.428	13.218
$d/D_h = 0,1$	-107.64	-120.24	12.6

Tabel 4.12 *Pressure drop section downstream pada $Re = 13,5 \times 10^4$*

Variasi IDB	Outlet elbow (Pa)	Outlet duct (Pa)	ΔP (Pa)
Tanpa IDB	-264.43	-307.482	43.052
$d/D_h = 0,064$	-273.35	-295.135	21.785
$d/D_h = 0,08$	-277.84	-300.511	22.671
$d/D_h = 0,1$	-280.38	-302.984	22.604

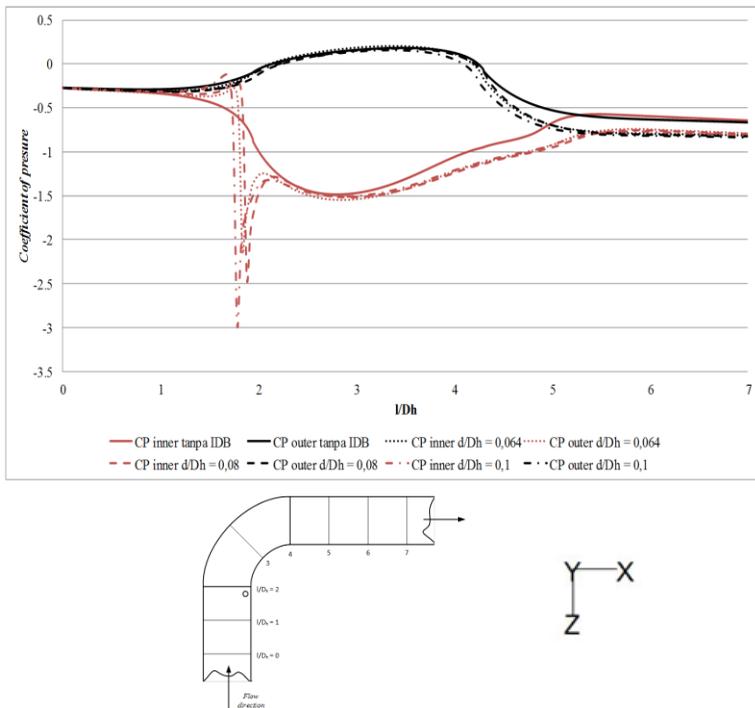


Gambar 4.15. *Pressure drop downstream square duct.* Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$; $0,1$.

Gambar 4.13 terlihat *pressure drop* sisi *upstream* menunjukkan tanpa adanya *IDB*, *pressure drop* yang dihasilkan lebih baik daripada dengan adanya *IDB* hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya *IDB* mempengaruhi *friction* yang terjadi antara aliran dengan *IDB* sehingga membuat *pressure drop* naik selain itu seiring dengan bertambahnya kecepatan di sisi *upstream* membuat *trendline pressure drop* juga naik. Sedangkan gambar 4.14 menunjukkan *pressure drop* sisi *elbow* terlihat dengan adanya *IDB* mempengaruhi sisi *elbow* sehingga membuat *pressure drop* menjadi minus berbeda halnya dengan tanpa *IDB*, *pressure drop* yang terjadi lebih besar, untuk *pressure drop* sisi *downstream* (gambar 4.15) tanpa adanya *IDB* ternyata tidak bagus untuk sisi *downstream* terlihat *trendline* tanpa *IDB* yang lebih tinggi dibandingkan dengan adanya *IDB* selain itu dengan adanya *IDB* $d/D_h = 0,1$ terlihat lebih mampu

untuk mereduksi *pressure drop* sisi *elbow* dan *downstream*. Dalam hal ini *pressure drop* yang sangat mempengaruhi aliran dalam *ducting* ialah sisi *upstream* karena pada sisi *upstream* dengan ditambahkan *IDB* sebagai pengganggu membuat *pressure drop* semakin naik.

Untuk memperjelas sejauh mana perbedaan tekanan antara tanpa dan dengan *IDB* ditunjukkan pada gambar 4.16.



Gambar 4.16. Grafik *coefficient of pressure*. Reynolds Number $3,97 \times 10^4$ dan variasi diameter *IDB* $d/D_h = 0,064$; $0,08$ dan $0,1$.

Coefficient of pressure ditinjau dari $l/D_h = 0$ atau $2D_h$ dari *inlet elbow* sampai $l/D_h = 7$ atau $3D_h$ dari *outlet elbow* serta diambil pada potongan searah sumbu y ($y/D_h = 0,5$).

C_p dihitung menggunakan persamaan 4.1

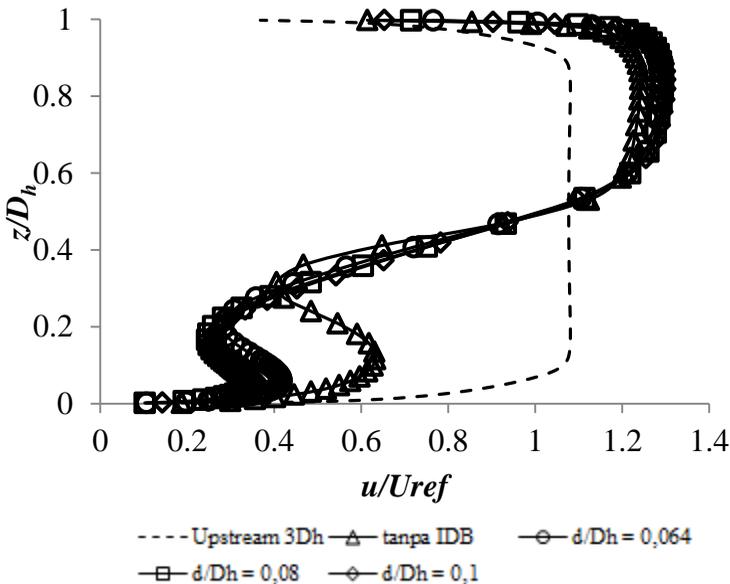
$$C_p = \frac{p_c - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (4.1)$$

Dimana p_c merupakan tekanan kontur atau tekanan pada *section* yang akan ditinjau, p_∞ merupakan tekanan *freestream* tepat pada *inlet ducting* serta V_∞ merupakan kecepatan *freestream*. Apabila dilihat pada gambar 4.16, tanpa adanya *IDB* pada posisi $l/D_h = 0$ sampai 1 tekanan antara *outer wall* dan *inner wall* sama sehingga membentuk garis yang berhimpit. Pada *elbow*, tanpa adanya *IDB* c_p yang terjadi pada sisi *inner wall* dari $l/D_h = 2$ mengalami akselerasi atau percepatan yang ditandai dengan *trendline* turun sampai dengan $l/D_h = 2,8$ hal ini dikarenakan pada sudut tersebut penampang *elbow* mirip dengan *nozzle* sehingga kecepatan maksimum ada pada sisi *inner wall*, daerah ini disebut sebagai daerah *favorable pressure* sedangkan pada $l/D_h = 2,8$ sampai dengan $l/D_h = 3$ *coefficient of pressure* yang terjadi tidak ada kenaikan maupun penurunan sehingga dapat dikatakan pada daerah tersebut tekanannya konstan selain itu pada $l/D_h = 3$ sampai dengan $l/D_h = 5,3$ terjadi deselerasi atau percepatan dimana aliran sudah mulai berpindah dari sisi *inner wall* menuju *outer wall* sehingga sisi *inner wall* aliran sudah mulai berkurang kecepatannya. Sedangkan pada sisi *outer wall* aliran mulai terjadi deselerasi dimana pada sisi *outer wall elbow* mirip dengan *diffuser* sehingga dapat dikatakan pada daerah tersebut ada *adverse pressure* dan tekanan pada daerah tersebut lebih besar daripada tekanan sisi *inner wall*. Sama halnya dengan bagian *upstream* dimana c_p pada $l/D_h = 5,3$ sampai $l/D_h = 7$ tidak terjadi perbedaan antara c_p *outer* dan c_p *inner* sehingga garisnya berhimpit.

Sedangkan dengan adanya penambahan *IDB* seperti pada $d/D_h = 0,064$ atau $d = 8$ pada sisi *upstream* terjadi perlambatan di

sisi *inner wall* mulai dari $l/D_h = 1,2$ sampai $1,7$ hal ini yang menyebabkan aliran mulai mengarah ke sisi *outer wall* akibat adanya bodi pengganggu setelah itu aliran mulai terjadi percepatan sampai $l/D_h = 2$ yang diduga sebagai aliran yang terseparasi akibat bodi pengganggu, percepatan yang terjadi sangat cepat sehingga apabila dilihat dari cp sangat kecil sekali percepatan yang terjadi hal ini dikarenakan efek dari kecepatan yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan efek dari IDB kurang kuat untuk mengatasi *adverse pressure*. Sedangkan pada *elbow* terjadi perlambatan dari $l/D_h = 2,2$ sampai dengan $l/D_h = 2,3$ hal ini diakibatkan karena adanya IDB membuat adanya aliran yang mengalami *backflow* pada daerah tersebut sehingga kecepatan aliran pada daerah tersebut lebih kecil dibandingkan tanpa IDB setelah itu dari $l/D_h = 2,4$ sampai $l/D_h = 2,5$ aliran mengalami akselerasi sama halnya tanpa IDB, untuk sisi *outer wall* tidak terjadi perubahan karena penambahan IDB hanya mempengaruhi sisi *inner wall*. Sama halnya pada tanpa IDB di $l/D_h = 2,7$ sampai $l/D_h = 3$ tekanan konstan sehingga *trendline* nya lurus selain itu pada $l/D_h = 3$ sampai $l/D_h = 5,4$ terjadi perlambatan sehingga kecepatan pada daerah tersebut lebih kecil daripada kecepatan pada *outer wall*. Dapat dilihat dari gambar 4.16 dengan ditambahkan IDB, *gap* yang terjadi antara sisi *outer* dan *inner wall* sangatlah jauh sehingga dapat dikatakan *pressure drop* yang terjadi pada daerah tersebut cukuplah besar serta pada bagian *elbow* dan *downstream* yang membuat cp atau tekanan yang dihasilkan tanpa dan dengan adanya IDB berbeda hal ini memperkuat pada tabel 4.1, 4.2 dan 4.3 yang menyatakan bahwa dengan adanya IDB membuat *pressure drop* yang terjadi lebih besar. Grafik *coefficient of pressure* pada *elbow* yang dimulai dari $l/D_h = 2$ atau sudut 0° sampai dengan $l/D_h = 4$ atau sudut 90° digambarkan pada lampiran 6.

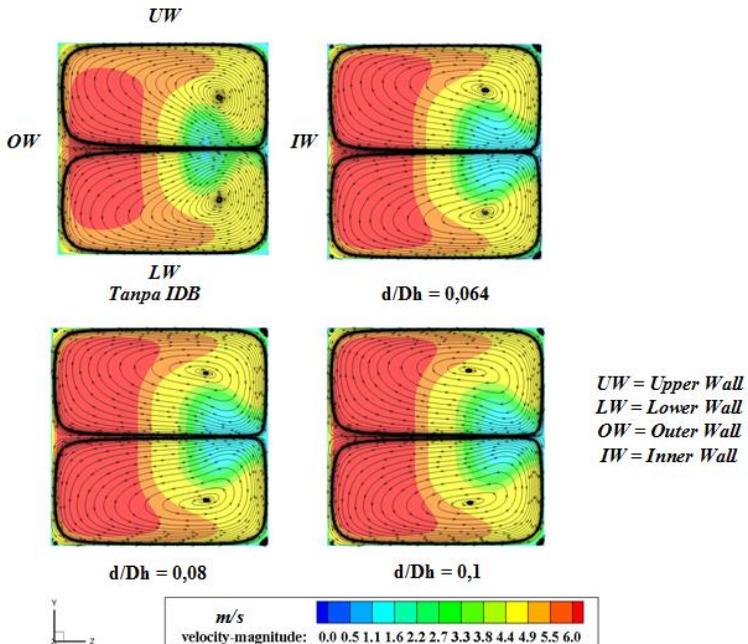
Pressure drop juga berdampak pada profil kecepatan aliran sebelum melewati *elbow* dan sesudah melewati *elbow* dikarenakan aliran dipaksa untuk mengikuti kontur dari *elbow*. Karakteristik aliran yang diinginkan ialah aliran yang melewati *elbow* dan juga *IDB* mampu *recovery* sehingga menyerupai sisi *upstream* $3D_h$. Profil kecepatan aliran tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 1$ diilustrasikan pada gambar 4.17.



Gambar 4.17. Profil kecepatan aliran tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 1$.

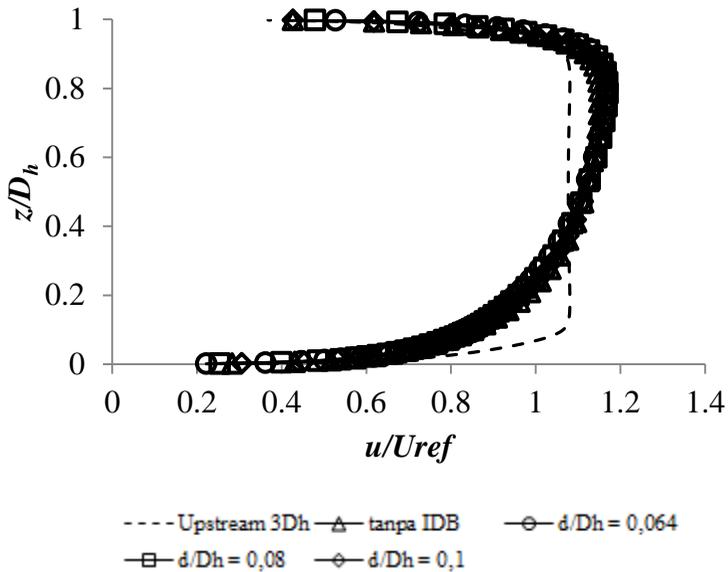
Dari gambar 4.17 dapat dilihat profil kecepatan tanpa *IDB* dan tiap variasi *IDB* memiliki profil yang sama, tetapi tanpa adanya *IDB* kecepatan sisi *center* meluas hingga mendekati *inner wall* dikarenakan aliran tidak memiliki pengganggu di sisi *inner wall* berbeda dengan tiap variasi *IDB* aliran lebih kuat di sisi *center* serta *outer wall* dikarenakan *gap* antara *IDB* dengan *inner*

wall yang terlalu sempit sehingga pada saat sebelum dan sesudah melewati *elbow* aliran akan lebih mengarah pada sisi *outer*, selain itu dikarenakan adanya perbedaan tekanan yang diakibatkan oleh kelengkungan *elbow* membuat aliran lebih mengarah pada sisi *outer wall*. Profil kecepatan sesudah melewati *elbow* masih belum mengindikasikan adanya *backflow* aliran yang terjadi sehingga dapat dikatakan tanpa maupun dengan *IDB* bisa menunda separasi yang terjadi serta kelengkungan *radius* dari *elbow* yang kecil belum bisa menampilkan adanya *backflow*. Profil kecepatan pada gambar 4.17 juga diperjelas dengan menampilkan *pathline surface* sehingga dapat dilihat secara 3D *secondary flow* yang terjadi pada *section* tersebut. *Pathline surface* tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 1$ diilustrasikan pada gambar 4.18.



Gambar 4.18. *Pathline surface* tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 1$.

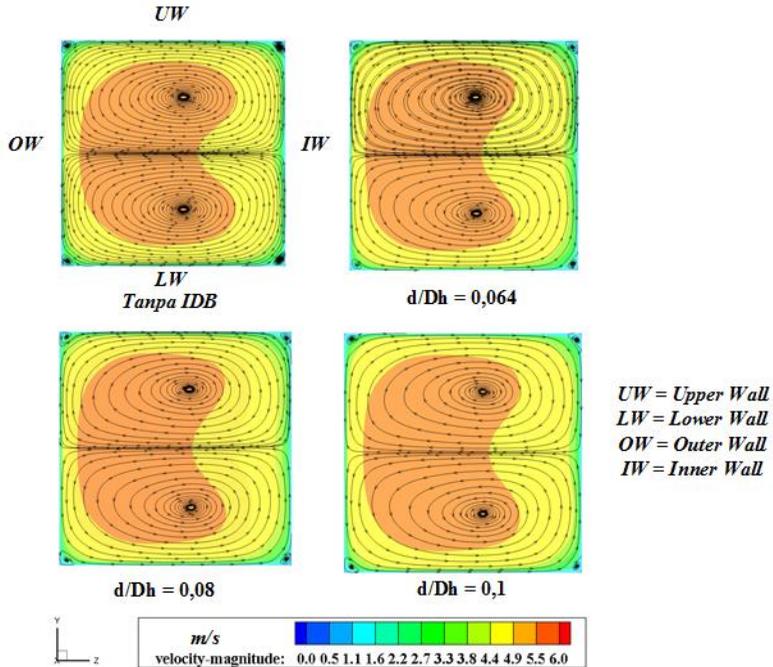
Secondary flow terjadi akibat adanya perbedaan tekanan antara *inner wall* dan *outer wall* sehingga aliran akan bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan rendah dimana dalam penelitian ini yaitu aliran bergerak dari *outer wall* menuju *inner wall*. *Secondary flow* yang besar dapat menyebabkan *pressure drop* yang ditimbulkan juga besar, dapat dilihat pada gambar 4.18 tanpa *IDB base vortex* yang timbul berada pada sisi *upper* dan *lower wall* bagian *inner wall*, *base vortex* yang dihasilkan cukup kuat diperjelas dengan pusaran yang cukup lebar di sisi *upper* dan *lower* sedangkan dengan variasi *IDB*, *base vortex* yang timbul cukup lah besar tetapi seiring dengan bertambahnya diameter *secondary flow* yang terjadi bukan lagi pada sisi *inner wall* melainkan mendekati sisi *center* sehingga apabila dikaitkan dengan kontur kecepatan maka pada sisi *inner wall* kecepatan rendah lebih kuat dibuktikan dengan warna biru yang cukup kuat di sisi *inner wall* hal ini menyebabkan separasi yang terjadi tinggi di daerah tersebut sehingga membuat *pressure drop* semakin naik. Dapat juga terlihat di sisi *outer wall*, kontur kecepatan tanpa *IDB* lebih rendah daripada dengan *IDB* dibuktikan dengan warna kontur kuning yang lebih luas daripada tanpa *IDB* sehingga membuat profil kecepatan pada daerah tersebut berbeda dimana tanpa adanya *IDB* lebih mengarah sisi *inner wall* sedangkan dengan *IDB* lebih mengarah pada *center* dan juga *outer wall*. Pada *outlet elbow* masih belum muncul *corner vortex*. Untuk memperjelas sejauh mana aliran tersebut dapat *recovery* sehingga dibuat profil kecepatan tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 14$ seperti pada gambar 4.19.



Gambar 4.19. Profil kecepatan aliran tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 14$.

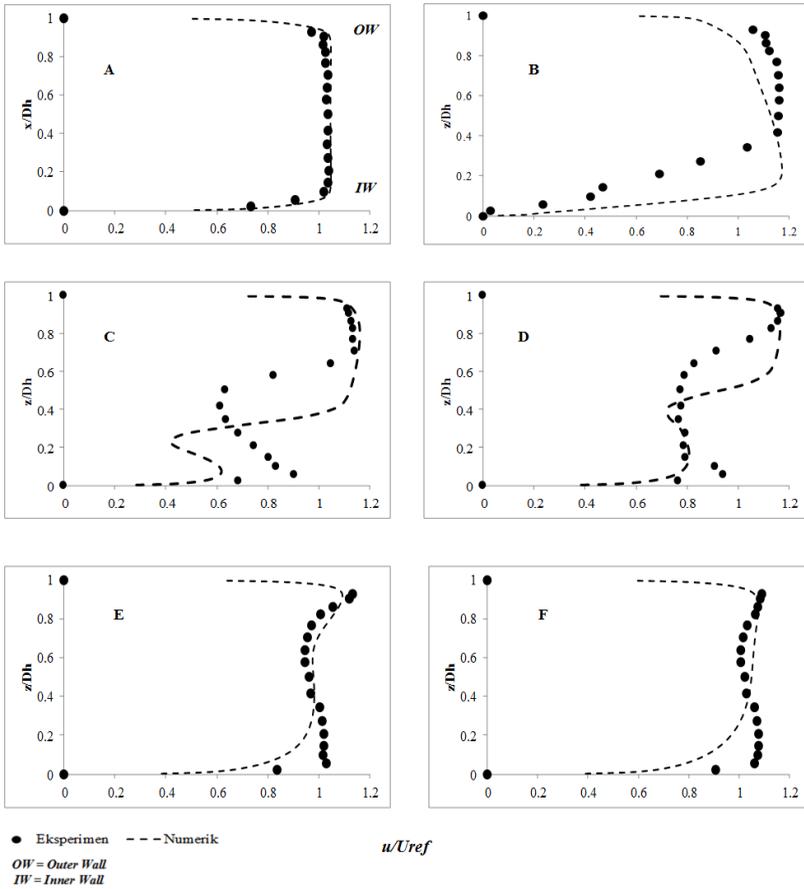
Dari gambar 4.19 terlihat profil kecepatan tiap variasi *ducting* sudah menunjukkan profil yang sama dikarenakan sudah tidak terpengaruhi lagi oleh efek kelengkungan *elbow* maupun *IDB*. Selain itu profil kecepatan tersebut belum dapat dikatakan *recovery* dikarenakan masih terdapat profil kecepatan yang kuat pada sisi *outer wall*, tetapi profil kecepatan tanpa dan dengan adanya penambahan *IDB* masih belum dapat dikatakan *fully developed flow* karena pendeknya *downstream* dari *ducting* membuat aliran kurang mampu untuk membentuk *fully developed*. Selain itu profil kecepatan masih cukup kuat di sisi *outer wall* serta terjadi perlambatan di sisi *inner wall* hal ini dikarenakan semakin panjang suatu lintasan maka semakin besar pula *friction* yang ditimbulkan akibat gesekan antara partikel fluida dengan dinding *ducting*. Gambar 4.20 mengilustrasikan *secondary flow* yang terjadi pada $x/D_h = 14$ tiap variasi model uji

ducting dimana terlihat *base vortex* serta *corner vortex* yang ditimbulkan dari *secondary flow* sudah sama serta kontur kecepatan tiap variasi model uji *ducting* sudah sama juga sehingga dapat disimpulkan bahwa pada $x/D_h = 14$ aliran dengan *IDB* sudah dapat menyerupai aliran tanpa *IDB* meskipun masih terdapat efek *secondary flow* pada sisi *center* dan juga *corner*.



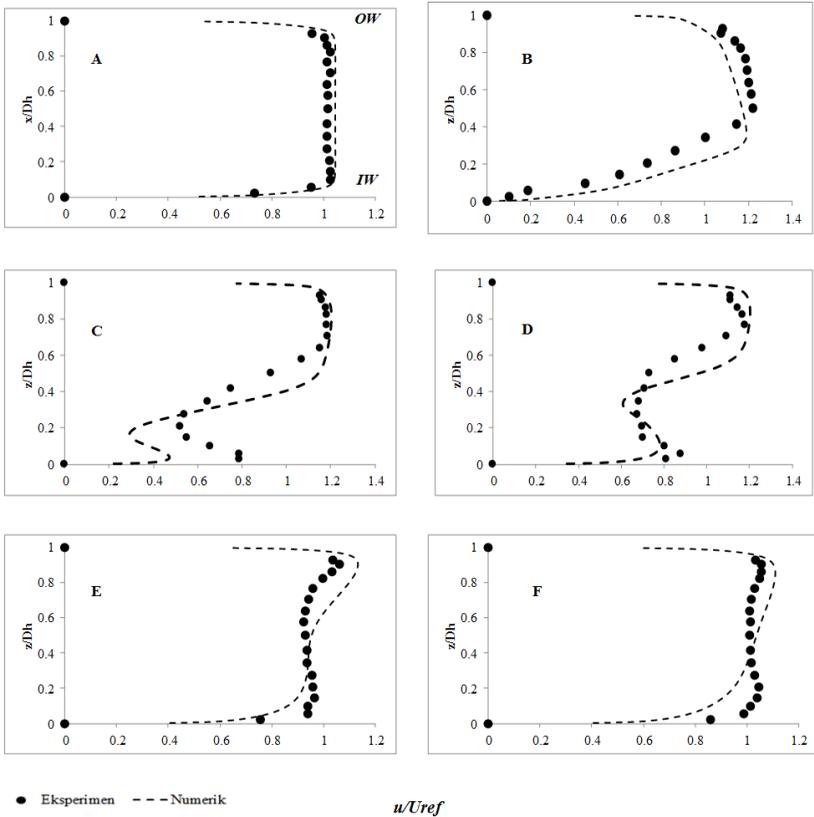
Gambar 4.20. *Pathline surface* tiap variasi *ducting* pada $x/D_h = 14$.

Untuk melihat kesalahan dalam proses pengambilan data antara hasil eksperimen dan numerik sehingga perlunya perbandingan profil kecepatan. Perbandingan profil kecepatan diambil pada $Re = 3,97 \times 10^4$ tanpa IDB dan dengan IDB $d/D_h = 0,1$ pada posisi tertentu serta data eksperimen yang diambil berdasarkan data eksperimen dari **Ramadan(2017)**. Gambar 4.21 menunjukkan pada *section upstream* $3D_h$ tanpa IDB tidak terjadi perbedaan antara hasil eksperimen dengan hasil numerik. Sedangkan pada $x/D_h = 0$ mulai terjadi perbedaan profil kecepatan dimana hasil dari numerik profil kecepatan tinggi ada pada sisi dekat *inner wall* sedangkan hasil dari eksperimen profil kecepatan tertinggi ada pada sisi *centre* dan *outer wall* hal ini terjadi karena pengambilan data pada numerik yang lebih banyak dan akurat sehingga hasil dari eksperimen tidak dapat menyerupai hasil numerik tetapi dari hasil visualisasi grafik profil kecepatan yang terbentuk hampir sama. Pada $x/D_h = 1$ mulai terjadi perbedaan antara hasil eksperimen dengan numerik dikarenakan separasi yang terbentuk dari hasil numerik kurang akurat akibat pemodelan turbulensi yang digunakan kurang dapat menampilkan titik terjadinya separasi aliran dan aliran balik, dapat dilihat hasil numerik di sisi *inner wall* terjadi perlambatan sehingga aliran yang terdefisit terjadi pada $u/U_{ref} = 0,4$ sedangkan hasil dari eksperimen terjadi pada $u/U_{ref} = 0,7$. Pada $x/D_h = 2$ sampai 8 tidak terjadi perbedaan antara hasil eksperimen dan numerik hanya saja pada $x/D_h = 13$ hasil dari eksperimen sudah dapat *recovery* atau sama dengan bagian *upstream* $3D_h$ sedangkan hasil numerik masih terjadi perlambatan sisi *inner wall* sehingga hasil dari numerik masih belum dapat dikatakan aliran tersebut ter-*recovery*, hal ini dapat diakibatkan kurang rapatnya *meshing* pada bagian *downstream* serta pemodelan turbulensi yang masih belum dapat menyerupai hasil eksperimen.



Gambar 4.21. Perbandingan profil kecepatan numerik dan eksperimen (**Ramadan,2017**) tanpa *IDB* pada posisi (A) *Upstream* $3D_h$, (B) $x/D_h = 0$, (C) $x/D_h = 1$, (D) $x/D_h = 2$, (E) $x/D_h = 8$, (F) $x/D_h = 13$.

Untuk perbandingan profil kecepatan dengan IDB $d/D_h = 0,1$ dapat dilihat pada gambar 4.22.



Gambar 4.22. Perbandingan profil kecepatan numerik dan eksperimen (**Ramadan,2017**) dengan IDB $d/D_h = 0,1$ pada posisi (A) $Upstream\ 3D_h$, (B) $x/D_h = 0$, (C) $x/D_h = 1$, (D) $x/D_h = 2$, (E) $x/D_h = 8$, (F) $x/D_h = 13$.

Sisi bagian *upstream* tidak terjadi perbedaan antara hasil numerik dan numerik sama halnya pada $x/D_h = 0$ dimana profil kecepatan yang terbentuk sudah menyerupai hasil eksperimen, profil kecepatan yang terbentuk yaitu kecepatan tertinggi adapada sisi *centre* dan sisi *outer wall* yang diakibatkan efek dari *IDB* dan kelengkungan *elbow*. Perbedaan terjadi mulai $x/D_h = 1$ dimana defisit aliran yang terbentuk dari hasil numerik terjadi perlambatan sehingga u/U_{ref} yang dihasilkan sebesar 0,25 sedangkan defisit aliran hasil eksperimen u/U_{ref} yang dihasilkan sebesar 0,5 sama halnya dengan tanpa *IDB* hal ini diakibatkan karena model turbulensi yang kurang akurat untuk menampilkan separasi aliran. Profil kecepatan $x/D_h = 2$ dan 8 hasil dari numerik sudah menyerupai hasil eksperimen sedangkan pada $x/D_h = 13$ sama halnya dengan tanpa *IDB* dimana masih terdapat perlambatan sisi *inner wall* hasil numerik sehingga aliran masih belum dapat *recovery*.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi numerik sehingga diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Dari setiap variasi model uji *ducting* tanpa maupun dengan *IDB*, bentuk profil kecepatan pada *upstream* tidak terjadi perbedaan yang signifikan, tetapi setelah melewati *elbow* dengan adanya penambahan *IDB* aliran lebih kuat mengarah ke sisi *outer wall* sehingga aliran utama tidak bisa mengatasi *adverse pressure* yang diakibatkan oleh kelengkungan *elbow*.
- 2) Profil kecepatan setiap variasi model uji *ducting* pada $x/D_h = 14$ belum dapat *recovery* aliran sehingga profil kecepatan yang terjadi belum dapat menyerupai profil kecepatan *upstream* $3D_h$.
- 3) Kontur *pathline* yang diperoleh tiap variasi model uji *ducting* terdapat perbedaan pada *base vortex*, dimana *base vortex* yang cukup kuat terjadi dengan ditambahkan variasi *IDB* sehingga *secondary flow* yang terjadi lebih besar daripada tanpa *IDB*. *Secondary flow* pada $x/D_h = 14$ tidak terjadi perbedaan yang cukup signifikan.
- 4) Nilai *pressure drop* sangat dipengaruhi oleh kelengkungan *elbow* maupun dengan penambahan suatu bodi dikarenakan efek gesekan yang kuat pada *Re* tinggi. Dari hasil studi numerik, *pressure drop* yang terjadi sepanjang aliran *ducting* mengalami peningkatan seiring dengan penambahan variasi *IDB*, selain itu *pressure drop* yang tinggi diakibatkan pada daerah *upstream duct*.
- 5) Nilai *coefficient of pressure* didapat karena adanya perbedaan tekanan akibat kelengkungan *elbow*, terlihat jelas bahwa dengan variasi *IDB gap* yang ditimbulkan oleh *coefficient of pressure* cukup besar dibandingkan tanpa adanya *IDB* sehingga masih belum dapat melawan momentum aliran serta *adverse pressure*.

- 6) Hasil dari perbandingan profil kecepatan antara numerik dan eksperimen sudah hampir sama, perbedaan terjadi pada $x/D_h = 1$ dan $x/D_h = 13$, dimana pada $x/D_h = 1$ defisit aliran hasil numerik terjadi perlambatan hal ini diakibatkan karena kurang akuratnya pemodelan turbulensi sehingga masih belum dapat menampilkan separasi aliran, sedangkan pada $x/D_h = 13$ terdapat perlambatan pada sisi *inner wall* sehingga aliran masih belum dapat *recovery* diakibatkan kurang rapatnya *meshing* pada bagian *downstream*.

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 :

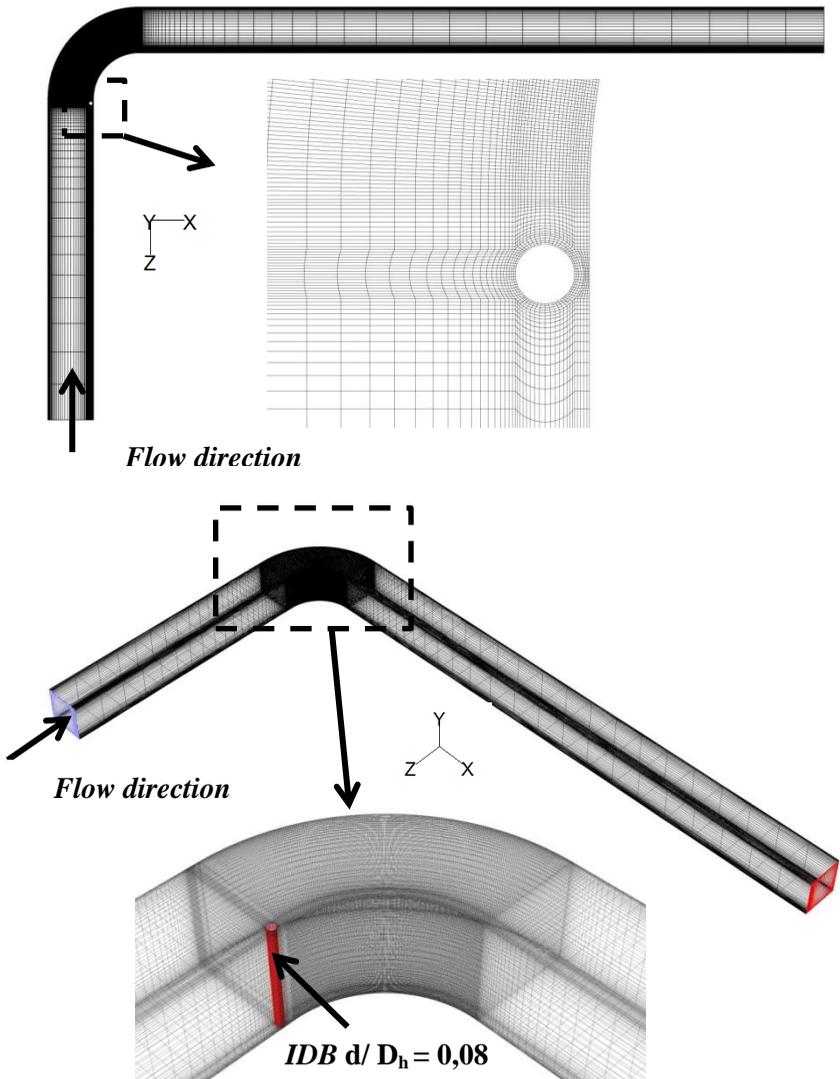
- 1) Memperpanjang saluran hingga mencapai 25 sampai dengan 40 D_h , agar dapat terlihat sejauh mana aliran mencapai *fully developed*.
- 2) Menempatkan *IDB* pada *elbow*, sehingga dengan adanya *IDB* tersebut dapat menunda terjadinya separasi serta jangkauan *reattachment* aliran yang cukup panjang untuk mengikuti kontur *elbow*.
- 3) Memperbanyak variasi *Reynolds Number* rendah, dikarenakan dengan *Re* tinggi masih belum terlihat jelas *reattachment* aliran serta mengurangi *pressure drop* akibat gesekan dengan *body disturbance*.
- 4) Melakukan *grid independency test* berdasarkan acuan *pressure drop* serta menggunakan *root mean square* untuk menentukan *error* yang terjadi.
- 5) Memperbanyak variasi pemodelan turbulensi, agar dapat terlihat perbedaan antar pemodelan turbulensi sehingga hasil yang didapatkan bisa sesuai dengan hasil eksperimen.

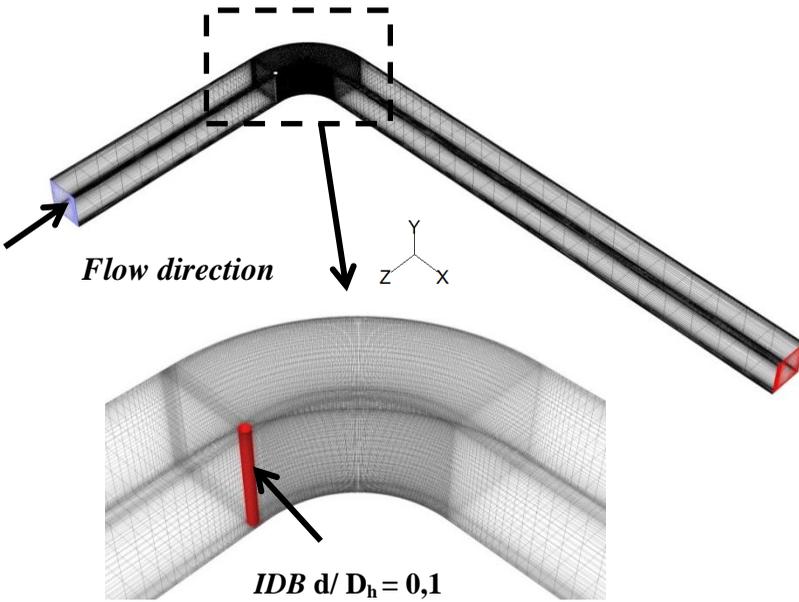
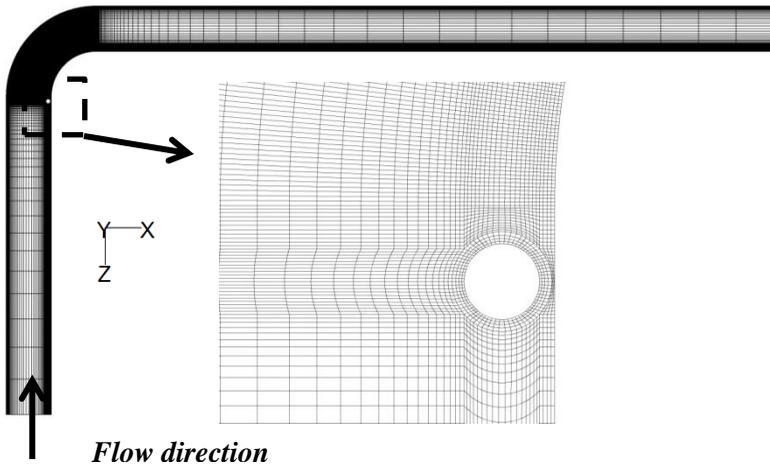
DAFTAR PUSTAKA

- Bearman, P.W. dan Zdravkovich, M.M. 1978. "Flow around a circular cylinder near a plane boundary". **J. Fluid Mech**, vol. 89, part 1.
- Cengel, Y. A. dan Cimbala, J. M. 2005. **Fundamentals and Applications-Fluid Mechanics**. New York: McGraw-Hill series.
- Cheng, D.Y. 1994. "Laminar Flow Elbow System and Method", **U.S. Patent Documents**, No. 5,323,661.
- Choi, H. dan Lee, J. 2000. "Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer". **Journal of Fluids and Structures** 14, 697-709.
- Dutta, P. dan Nandi, N. 2015. "Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends", **Mechanics and Mechanical Engineering**, Vol.19, No. 1 (2015) 5-16.
- Fox, R.W., McDonald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics**, 8th Edition. New York: John Wiley & Sons Inc.
- FLUENT 6.3.26 User's Guide**. 2006. Fluent Inc.
- Hardhian, Aqfha. 2017. "Studi eksperimen pengaruh variasi jarak inlet disturbance body terhadap aliran melalui square duct dengan elbow 90°". **Tugas akhir. Jurusan Teknik Mesin**. FTI-ITS. Surabaya.
- Li et. Al. 2016. "Flow development in curved rectangular ducts with continuously varying curvature", **Experimental Thermal and Fluid Science**, 75 1-15.

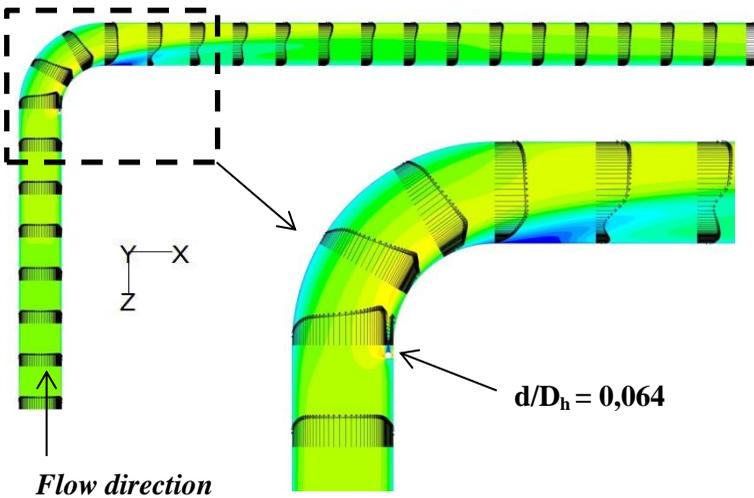
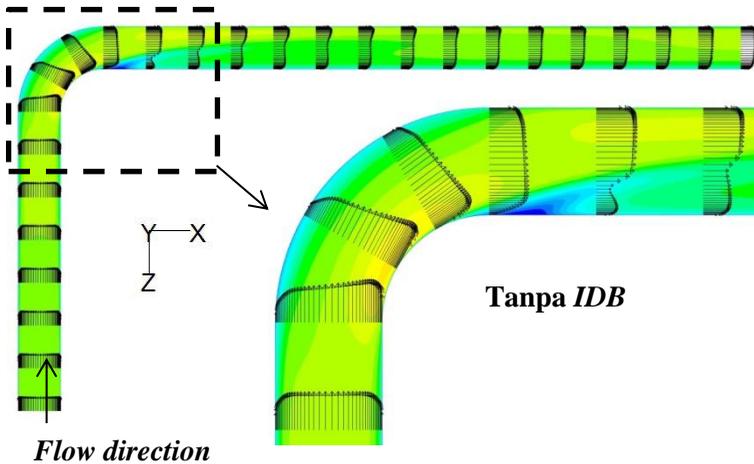
- Miller, D.S. 1990. "International Flow System", **Bedford: BHRA**. 2nd Edition.
- Pratama, Rizkia Putra. 2017. "Studi eksperimen pengaruh variasi gap inlet disturbance body terhadap aliran melalui square duct dengan elbow 90°". **Tugas akhir. Jurusan Teknik Mesin**. FTI-ITS. Surabaya.
- Ramadan, Angga Eka W. 2017. "Studi eksperimen aliran melalui square duct dan square elbow 90° dengan variasi diameter inlet circular disturbance body". **Tugas akhir. Jurusan Teknik Mesin**. FTI-ITS. Surabaya.
- Rup, K., Sarna, P. 2011. "Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow", **Flow Measurement and Instrumentation**.22: 383-391.

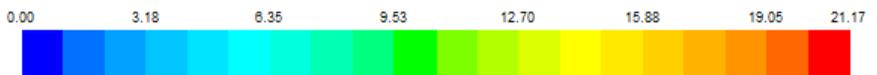
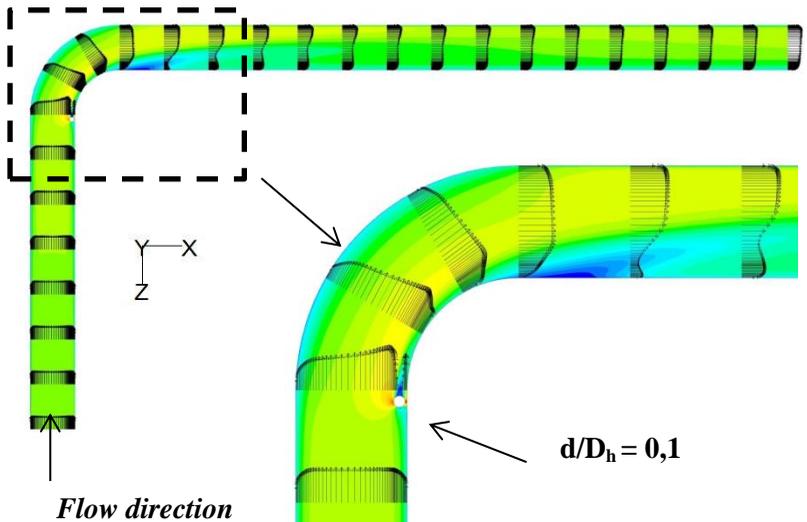
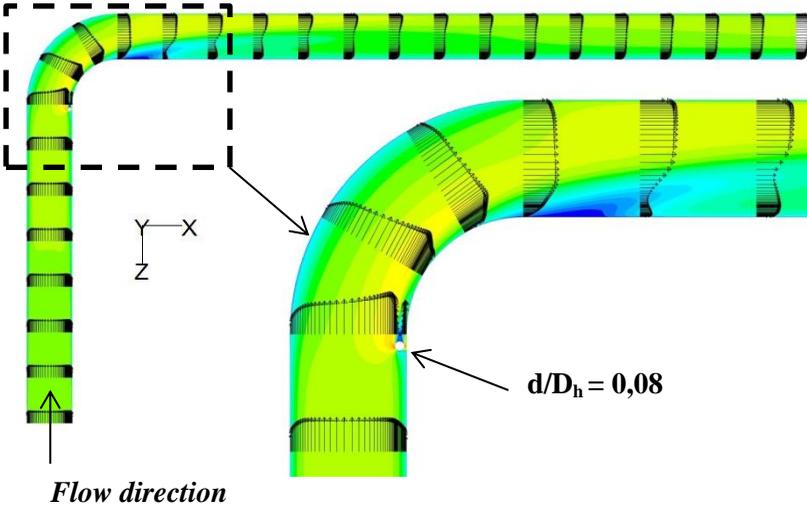
Lampiran 1. Mesh dengan $IDB d/ D_h = 0,08$ dan $0,1$.





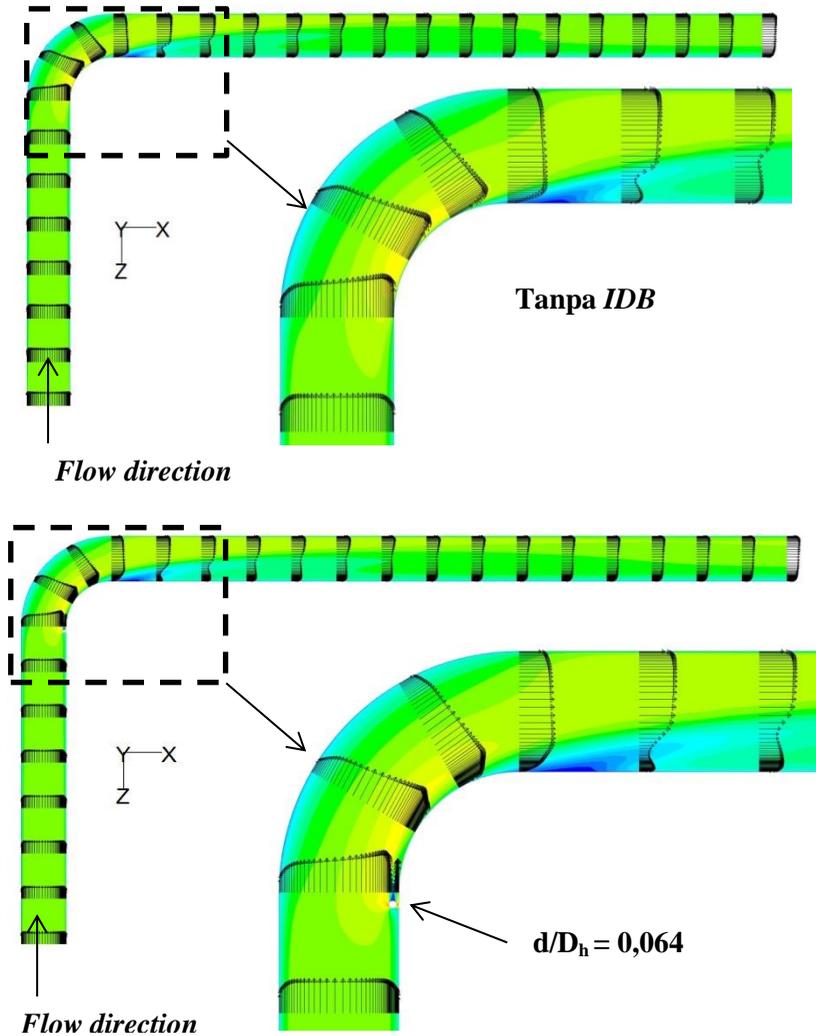
Lampiran 2. Hasil visualisasi aliran berupa profil kecepatan dan kontur kecepatan bidang *horizontal* pada $Re = 8,74 \times 10^4$

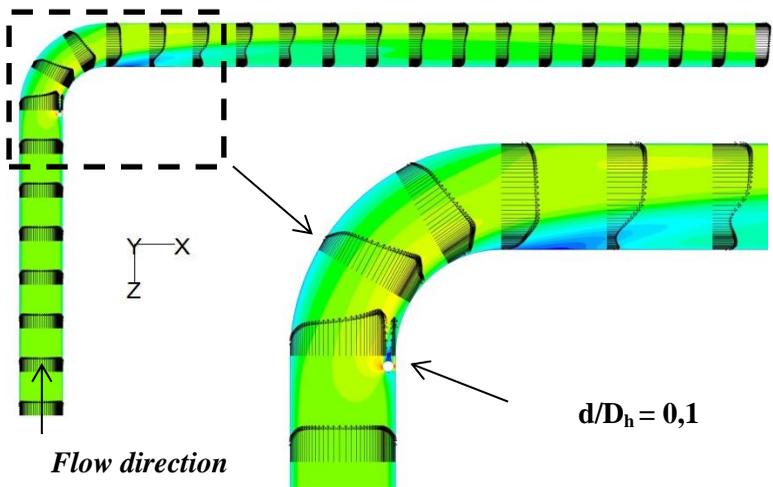
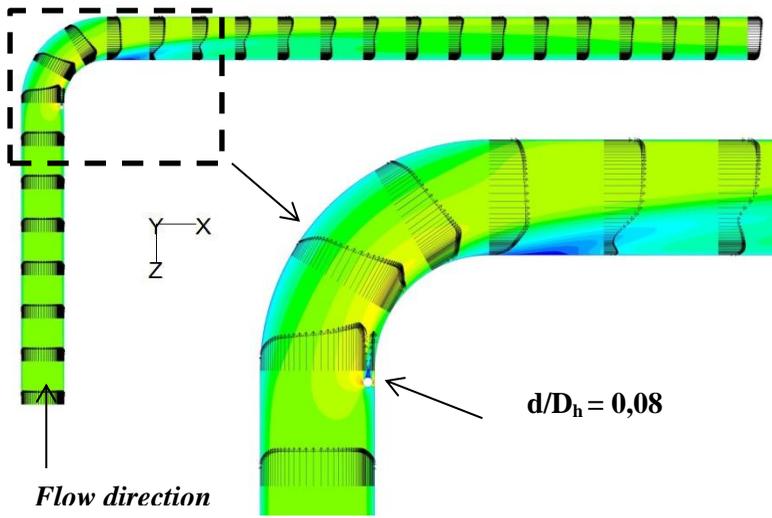




(m/s)

Lampiran 3. Hasil visualisasi aliran berupa profil kecepatan dan kontur kecepatan bidang *horizontal* pada $Re = 13,5 \times 10^4$

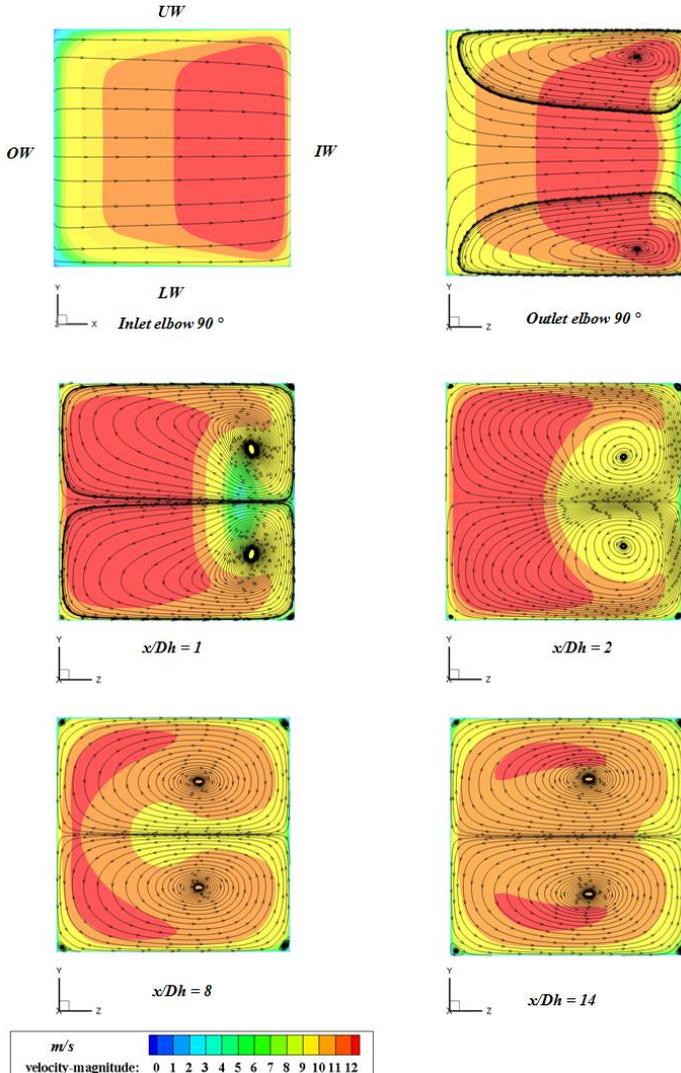




(m/s)

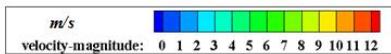
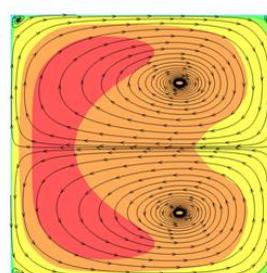
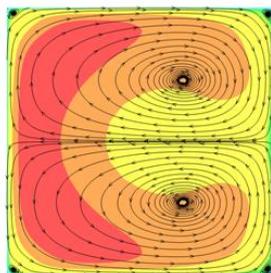
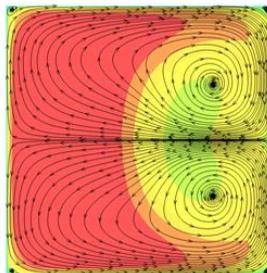
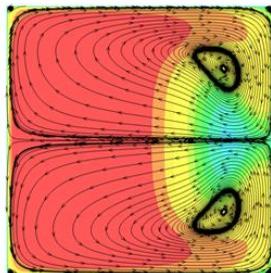
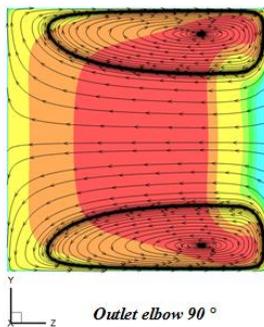
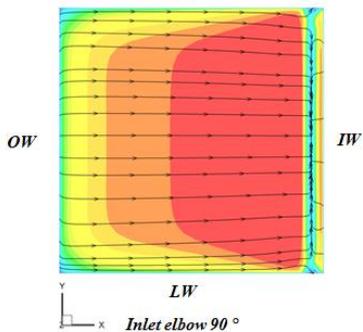
Lampiran 4. Kontur *pathline* untuk menampilkan *secondary flow* tiap *section* ($Re = 8,74 \times 10^4$)

- Tanpa IDB

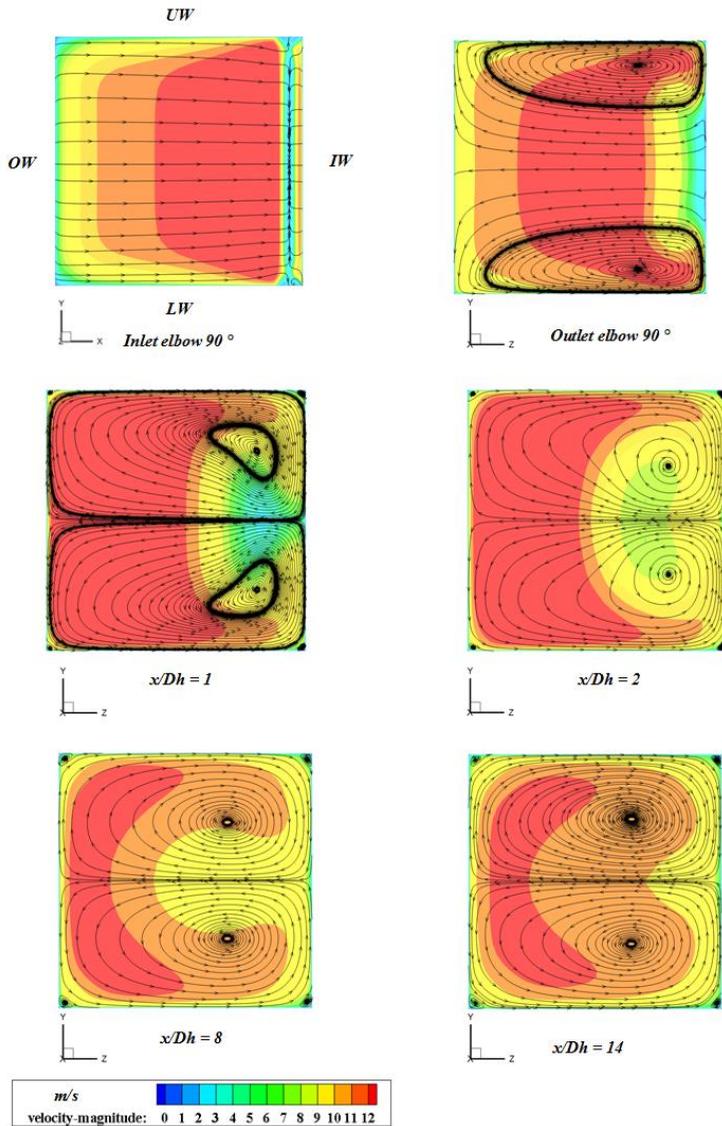


- $d/D_h = 0,064$

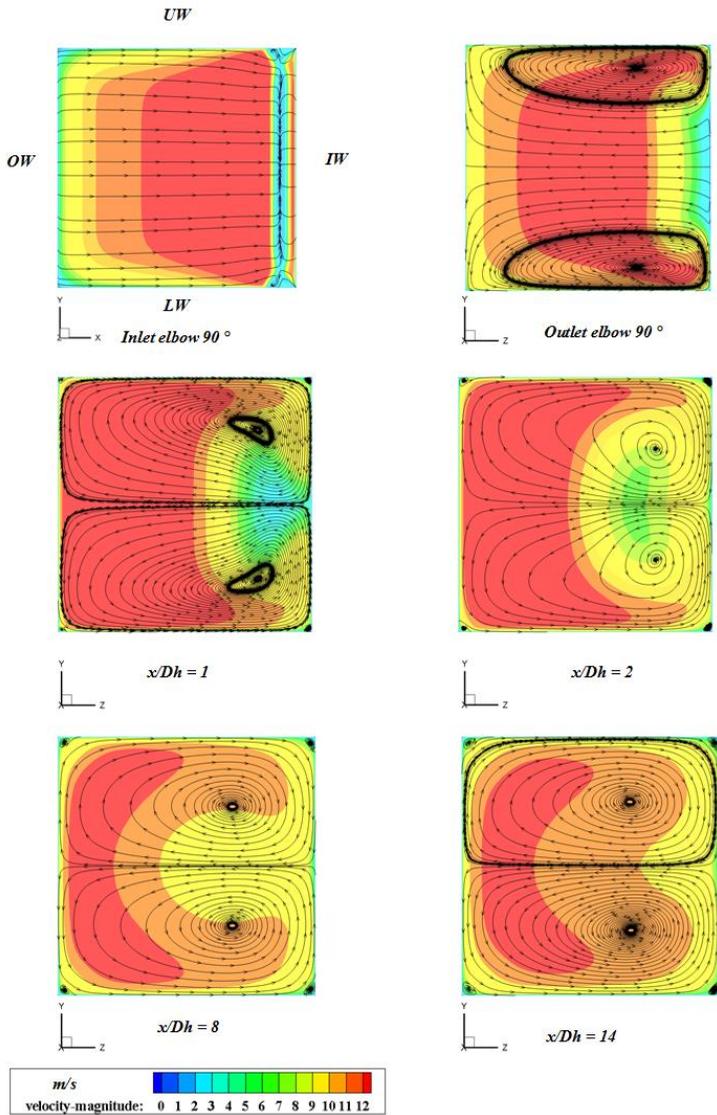
UW



- $d/D_h = 0,08$

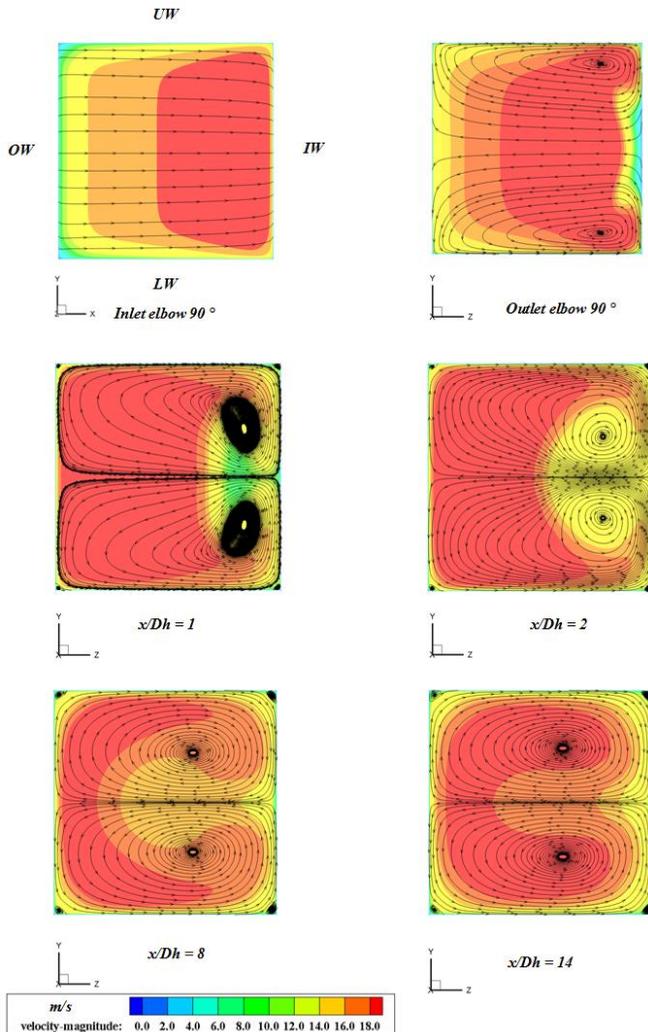


- $d/D_h = 0,1$



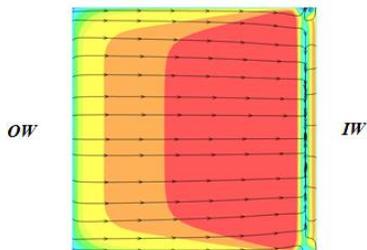
Lampiran 5. Kontur *pathline* untuk menampilkan *secondary flow* tiap *section* ($Re = 13,5 \times 10^4$)

- Tanpa IDB



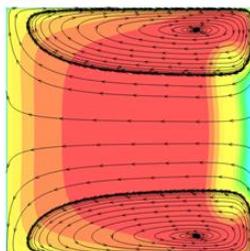
- $d/D_h = 0,064$

UW

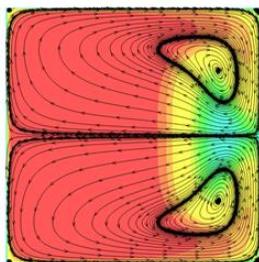


LW

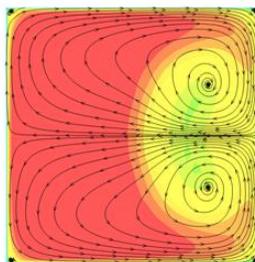
Inlet elbow 90°



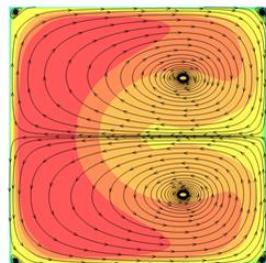
Outlet elbow 90°



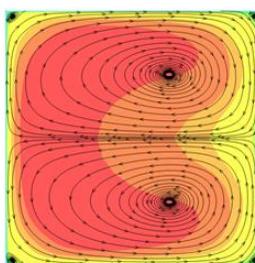
$x/D_h = 1$



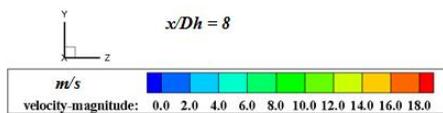
$x/D_h = 2$



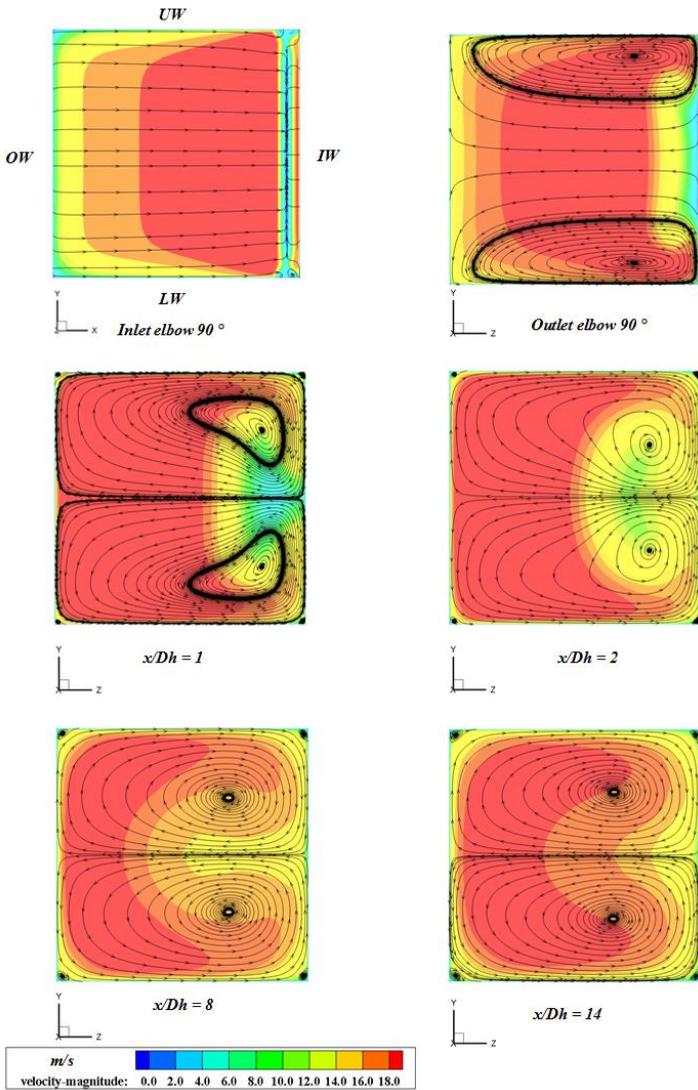
$x/D_h = 8$



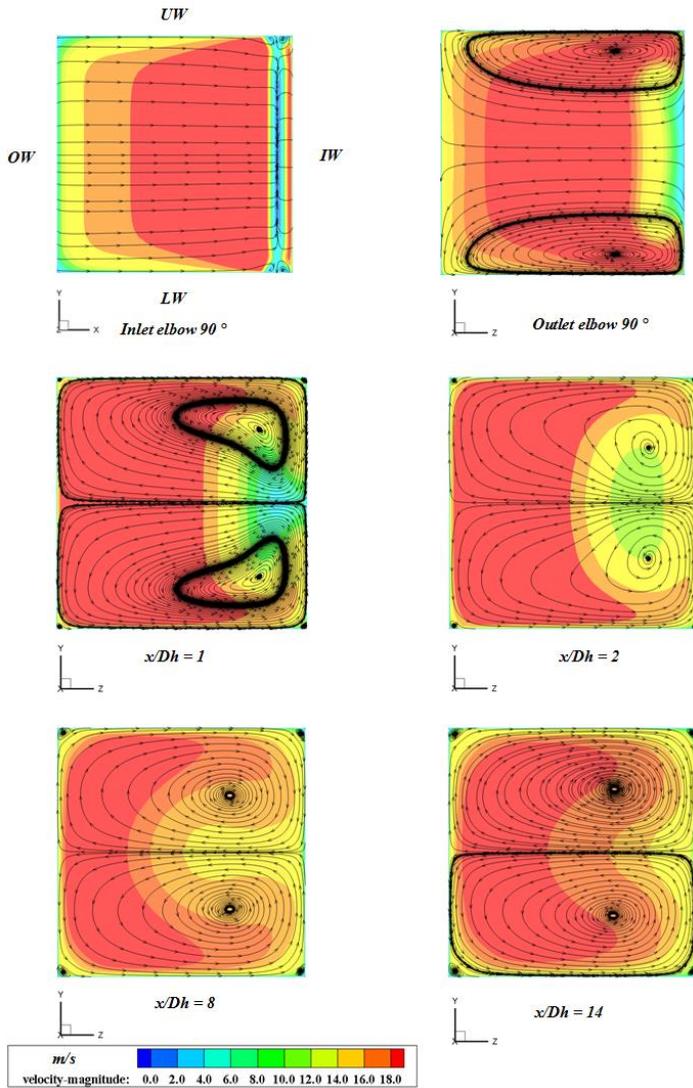
$x/D_h = 14$



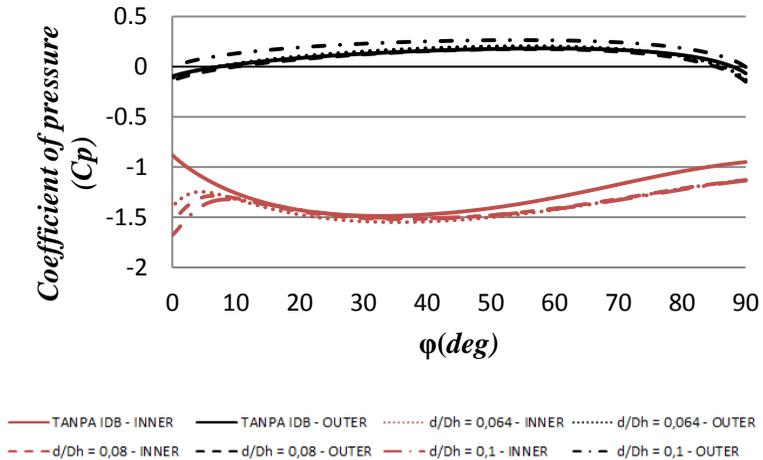
- $d/D_h = 0,08$



- $d/D_h = 0,1$



Lampiran 6. Grafik *coefficient of pressure inner dan outer wall elbow 90°*. Reynolds Number $3,97 \times 10^4$ dan variasi diameter IDB $d/D_h = 0,064$; $0,08$ dan $0,1$



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Elfandy Putra Nugraha dilahirkan di Denpasar, 8 April 1995 anak yang terlahir dari orang tua bernama Edih Setiadi dan Liliek Sutrisnawati. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Semolowaru I/261, Surabaya pada tahun 2000-2006. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Negeri 39, Surabaya pada tahun 2006-2009, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMA Muhammadiyah 2, Surabaya pada tahun 2009-2012. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Kabiro Usaha Internal KWU HMM FTI ITS Surabaya dan Kepala Departemen Hublu UKM Fotografi ITS Surabaya pada tahun 2014-2015. Penulis pernah menjadi Asisten Praktikum Mekanika Fluida 1 selama 2 periode.

Motto hidup penulis adalah “Mencoba mencoba dan terus mencoba.” menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras untuk senantiasa memberikan manfaat dan berguna bagi agama, nusa dan bangsa. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email elfandyputran@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)