



THESIS - TM 185400

**STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI SALURAN UDARA  
BERPENAMPANG BUJUR SANGKAR DENGAN  
PENEMPATAN OBSTACLE DI DALAM ELBOW 90°**

**IKKI ADJI DHARMA**  
02111850080008

*Supervisor*  
**Dr. WAWAN ARIES W., ST., MT.**

**Mechanical Engineering Department  
Faculty of Industrial and Systems  
Engineering Institut Teknologi  
Sepuluh Nopember  
2020**



THESIS - TM 185400

# **NUMERICAL STUDY OF FLOW-THROUGH RECTANGULAR DUCT WITH AN OBSTACLE PLACEMENT IN 90 ° ELBOW**

**IKKI ADJI DHARMA  
02111850080008**

*Supervisor*  
**Dr. WAWAN ARIES W., ST., MT.**

**Mechanical Engineering Department  
Faculty of Industrial and Systems  
Engineering Institut Teknologi  
Sepuluh Nopember  
2020**



TESIS - TM 185400

# **STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI SALURAN UDARA BERPENAMPANG BUJUR SANGKAR DENGAN PENEMPATAN OBSTACLE DI DALAM ELBOW 90°**

IKKI ADJI DHARMA  
02111850080008

*Dosen Pembimbing*  
Dr. WAWAN ARIES W., ST., MT.

Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa  
Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020



## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI SALURAN UDARA BERPENAMPANG BUJUR SANGKAR DENGAN PENEMPATAN OBSTACLE DI DALAM ELBOW 90°

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar





**Magister Teknik (M.T)**

Program Studi S-2 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

  
Ikki Adji Dharma  
NRP. 02111850080008

Disetujui oleh:

1. Dr. WAWAN ARIES W., ST., MT. ..... (Pembimbing)  
NIP. 197104051997021001 
2. Prof. Dr. Ir. TRIYOGI YUWONO, DEA. ..... (Penguji I)  
NIP. 196001291987011001 
3. Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng, Ph.D. ..... (Penguji II)  
NIP. 196412281990031002 
4. VIVIEN SUPHANDANI, ST., ME., Ph.D. ..... (Penguji III)  
NIP. 198105292003122001 

Kepala Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri & Sistem Rekayasa

  
Dr.Ir.ATOK SETIYAWAN, M.Eng.Sc.

NIP. 196604021989031002

# Numerical Study of Flow-Through Rectangular Duct with An Obstacle Placement In 90 ° Elbow

Name : Ikki Adji Dharma  
NRP : 02111850080008  
Supervisor : Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

## ABSTRACT

The value of pressure drop on an elbow 90 ° is greater than the pressure drop on a straight duct which has the same equivalent length. Frictional losses and secondary losses contribute to the high-pressure drop in the 90 ° elbow area. The high value of pressure loss has an impact on increasing the electrical power required for fan/blower work.

The numerical research was carried out to reduce the pressure drop in the air duct installation consisting of a straight duct and a 90° elbow with a square cross-section, with a curvature ratio ( $R_m / D_h$ ) of three. Reynolds stress model was chosen as the turbulence model in numerical simulation. The passive boundary layer control method with media in the form of an obstacle with a cross-sectional oriented square cylinder (OSC) and a circular cylinder (CC) placed near the inner wall elbow 90 ° with a distance ( $g / d = 0.2$ ). To enrich the information, this study also analyzes the optimal angular position of the obstacle at ( $\alpha$ ) 4 °, 8 °, and 12 °. The Reynolds number used in this study is  $0.79 \times 10^4$  to  $4 \times 10^4$ , based on the hydraulic diameter of the air duct.

Based on the simulation results, it is known that the shape of the obstacle affects the increase in the intensity of the flow turbulence. OSC is able to provide a greater turbulent intensity increase than CC with the consequence of an increase in pressure drag. The numerical simulation results show that the optimal Reynolds number and angular position are at  $4 \times 10^4$  and 4 °, where in these conditions the smallest pressure drop value is obtained along the air channel.

keywords : **Angular position, obstacle, straight duct, elbow 90°, pressure drop**

# Studi Numerik Aliran Melalui Saluran Udara Berpenampang Bujur Sangkar Dengan Penempatan *Obstacle* Di Dalam *Elbow 90°*

Nama : Ikki Adji Dharma  
NRP : 02111850080008  
Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

## ABSTRAK

Nilai *pressure drop* pada *elbow 90°* lebih besar dibanding *pressure drop* pada *straight duct* yang memiliki panjang ekuivalen yang sama. *Frictional losses* dan *secondary losses* berkontribusi terhadap tingginya *pressure drop* di daerah *elbow 90°*. Tingginya nilai *pressure loss* berdampak pada meningkatnya daya lisrik yang dibutuhkan untuk kerja *fan/blower*.

Penelitian secara numerik dilakukan dengan tujuan mengurangi *pressure drop* pada instalasi saluran udara yang terdiri dari *straight duct* dan *elbow 90°* yang berpenampang bujur sangkar, dengan *curvature ratio* ( $R_m/D_h$ ) sebesar tiga. *Reynolds stress model* dipilih sebagai model turbulensi pada simulasi numerik. Metode *passive boundary layer control* dengan media berupa *obstacle* berpenampang *oriented square cylinder* (OSC) dan *circular cylinder* (CC) ditempatkan di dekat *inner wall elbow 90°* dengan jarak ( $g/d = 0.2$ ). Untuk memperkaya informasi, penelitian ini juga menganalisa keadaan optimal *angular position obstacle* pada sudut ( $\alpha$ )  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ , dan  $12^\circ$ . Adapun bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini  $0.79 \times 10^4$  hingga  $4 \times 10^4$ , berbasis pada diameter hidrolis saluran udara.

Berdasarkan hasil simulasi, diketahui bahwa bentuk *obstacle* mempengaruhi peningkatan intensitas turbulensi aliran. OSC mampu memberikan peningkatan *turbulent intensity* yang lebih besar daripada CC dengan konsekuensi terdapat peningkatan *pressure drag*. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa pada bilangan Reynolds dan *angular position* yang optimal berada pada  $4 \times 10^4$  dan  $4^\circ$ , dimana pada kondisi tersebut diperoleh nilai *pressure drop* aliran yang paling kecil di sepanjang saluran udara.

Kata kunci : *Angular position, obstacle, straight duct, elbow 90°, pressure drop*

## **KATA PENGANTAR**

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

1. Bapak Ibu tercinta dan Keluarga yang senantiasa memberi dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr Wawan Aries W, ST., MT, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono DEA, Prof. Ir. Sutardi, M.eng, Ph.D dan Vivien Suphandani ST, ME, Ph.D selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih telah meluangkan waktunya dan atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Sahabat laboratorium Rekayasa Thermal dan Mekanika fluida yang memberikan semangat penulis.
5. Seluruh civitas akademika Teknik Mesin ITS yang Baik dan Ramah.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

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



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
ABSTRACT.....	ii
ABSTRAK .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
BAB 2 DASAR TEORI .....	7
2.1 <i>Internal Flow</i> .....	7
2.2 Karakteristik Aliran di Dalam Elbow $90^0$ .....	8
2.3 Navier-Stokes <i>Equation</i> .....	11
2.4 <i>Passive Boundary Layer Control</i> .....	12
2.5 Dekomposisi Reynolds .....	12
2.6 Intensitas Turbulensi.....	13
2.7 <i>Pressure Coefficient</i> .....	14
2.8 <i>Head Loss</i> .....	15
2.8.1 <i>Head Loss Mayor</i> .....	15
2.8.3 <i>Head Loss Minor</i> .....	16
2.8.4 <i>Pressure loss</i> .....	16
2.9 <i>Shear Stress</i> .....	17
2.10 Penelitian Terdahulu .....	17
2.10.1 Karakteristik Aliran yang Melewati Sebuah <i>Obstacle</i> .....	19
2.10.2 Pengaruh <i>Curvature Ratio</i> ( $R_m/D_h$ ) Pada Karakteristik Aliran yang Melintasi <i>Elbow</i> $90^0$ .....	22

2.10.3 Karakteristik Aliran Sekunder yang Melintasi <i>Elbow 90<sup>0</sup></i> .....	24
2.10.4 Karakteristik Aliran Yang Melewati Sebuah Gap .....	27
2.10.5 Pengaruh Turbulent intensity pada karakteristik aliran .....	30
2.10.6 Karakteristik wake yang terbentuk pada cylinder yang didekatkan dengan permukaan dinding datar .....	33
2.10.7 Penggunaan <i>Obstacle</i> Sebagai Media Pasif Boundary Layer Control .....	34
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b> .....	<b>39</b>
3.1 Geometri <i>Ducting</i> dan <i>Obstacle</i> .....	39
3.2 Metode Numerik .....	41
3.2.1 Tahap Pre-Processing .....	41
3.2.2 Tahap Processing .....	42
3.2.3 Tahap <i>Post-processing</i> .....	45
3.2.4 Analisis Grid Independency dan Validasi Data .....	48
3.3 Langkah-Langkah Penelitian .....	50
<b>BAB 4 PEMBAHASAN</b> .....	<b>53</b>
4.1.1 Analisa data kuantitatif pengaruh bentuk <i>obstacle</i> .....	56
4.1.2 Analisa data kualitatif pengaruh bentuk <i>obstacle</i> .....	67
4.2 Pengaruh penempatan <i>obstacle</i> ( $\alpha$ ) .....	79
4.2.1 Analisa data kuantitatif pada pengaruh angular position ( $\alpha$ ) .....	79
4.2.1 Analisa data kualitatif pada pengaruh <i>angular position</i> ( $\alpha$ ) .....	83
4.3 Pengaruh bilangan Reynolds ( $Re_{Dh}$ ) .....	85
4.4 Diskusi .....	87
4.4.1 Pengaruh bentuk <i>obstacle</i> .....	87
4.4.2 Pengaruh <i>angular position</i> .....	88
4.4.3 Pengaruh bilangan Reynolds .....	89
<b>BAB 5 KESIMPULAN dan SARAN</b> .....	<b>97</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>97</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Boundary Layer Development</i> .....	7
Gambar 2. 2 Grafik <i>loss coefficient elbow 90<sup>0</sup></i> terhadap $R_m/D_h$ dan $e/D$ .....	9
Gambar 2. 3 Grafik <i>loss coefficient elbow 90<sup>0</sup></i> terhadap $R_m/D_h$ dan $\theta_b$ .....	10
Gambar 2. 4 Grafik <i>loss coefficient elbow 90<sup>0</sup></i> terhadap $R_m/D_h$ dan $Re_{Dh}$ .....	10
Gambar 2. 5 Struktur <i>secondary flow</i> pada elbow 90 <sup>0</sup> .....	11
Gambar 2. 6 <i>Fluctuating Velocity</i> .....	13
Gambar 2. 7 Perbandingan dua <i>fluctuating velocity</i> .....	14
Gambar 2. 8 Instalasi Pengambilan Data Dengan Menggunakan <i>CCD Camera</i> dan <i>Nd:Yag Laser</i> .....	19
Gambar 2. 9 <i>Instantaneous Streamwise Velocity Component u</i> (mm/S) Terhadap Waktu a) <i>Circular Obstacle</i> b) <i>Square Obstacle</i> c) <i>Oriented Square Obstacle</i> ....	20
Gambar 2. 10 Pola dari <i>Dimensionless Vorticity (<math>\omega^*</math>)</i> a) <i>Circular Obstacle</i> b) <i>Square Obstacle</i> dan c) <i>Oriented Square Obstacle</i> .....	21
Gambar 2. 11 Kontur dan <i>pathline</i> kecepatan yang melintasi <i>elbow 90<sup>0</sup></i> pada $Re_{Dh} = 10^6$ di berbagai ( $R_m/D_h$ ) : a) $R_m/D_h = 0,5$ , b) $R_m/D_h = 0.75$ , c) $R_m/D_h = 1,5$ .....	22
Gambar 2. 12 <i>Velocity Profile</i> di Sisi <i>Elbow 90<sup>0</sup></i> dengan Variasi <i>Curvature Ratio</i> dan Bilangan Reynolds : a) $R_m/D_h = 1$ , b) $R_m/D_h = 2$ , c) $R_m/D_h = 3$ .....	23
Gambar 2. 13 Skematik <i>Duct</i> .....	24
Gambar 2. 14 Konfigurasi <i>Mesh</i> .....	25
Gambar 2. 15 <i>Secondary Flow</i> Pada Posisi <i>Outlet Elbow 90<sup>0</sup></i> ; a) ( $R_m/D_h$ ) = 0.75, b) ( $R_m/D_h$ ) = 1 dan c) ( $R_m/D_h$ ) = 1.5 .....	26
Gambar 2. 16 <i>Secondary Flow</i> Pada Posisi <i>Outlet Elbow 90<sup>0</sup></i> ; a) $Re_{Dh} = 1 \times 10^5$ , b) $Re_{Dh} = 3 \times 10^5$ , c) $Re_{Dh} = 5 \times 10^5$ , d) $Re_{Dh} = 7 \times 10^5$ dan e) $Re_{Dh} = 10 \times 10^5$ .....	26
Gambar 2. 17 Klasifikasi <i>Secondary Flow</i> yang Terbentuk pada <i>Square Bend</i> ( $\theta = 120^\circ$ ) .....	27
Gambar 2. 18 <i>Velocity Profile</i> di Dekat Dinding .....	28
Gambar 2. 19 <i>Turbulent Intensity Profile</i> Di Dekat Dinding .....	28
Gambar 2. 20 Profil <i>pressure coefficient</i> pada dinding bawah .....	29
Gambar 2. 21 <i>Pathline</i> aliran pada $G/B = 0.2$ : a) <i>rectangular cylinder obstacle</i> , b) <i>circular cylinder obstacle</i> .....	30

Gambar 2. 22 profil turbulent intensity ; a) $Ti_{(u)}$ dan b) $Ti_{(v)}$ .....	31
Gambar 2. 23 Profil Reynolds stress .....	32
Gambar 2. 24 Skema Instalasi Percobaan Saluran Udara Berpenampang Bujur Sangkar .....	35
Gambar 2. 25 <i>Pressure Drop</i> Pada <i>Duct</i> dengan Bilangan Reynolds ( $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$ ).....	36
Gambar 2. 26 <i>Pressure Drop Overall</i> .....	37
Gambar 3. 1 Skema dan Detail <i>Square Duct</i> .....	40
Gambar 3. 2 Skema <i>Obstacle</i> .....	40
Gambar 3. 3 <i>Meshing square Duct</i> a) <i>Cross Sectional Mesh</i> , b) <i>Square Mesh</i> .....	41
Gambar 3. 4 a) <i>Square Elbow 90°</i> dengan <i>OSC Obstacle Mesh</i> , b) <i>Square Elbow 90°</i> dengan <i>CC Obstacle Mesh</i> .....	42
Gambar 3. 5 Grafik <i>velocity profile</i> pada <i>outlet elbow 90°</i> dengan Variasi Model Turbulensi untuk $Re_{Dh} = 1 \times 10^5$ .....	43
Gambar 3. 6 <i>Boundary Condition Square Duct</i> Pada Simulasi.....	44
Gambar 3. 7 Posisi Pengambilan Data ( <i>Overall Duct</i> ).....	46
Gambar 3. 8 Posisi pengambilan data pada saluran sisi <i>downstream</i> .....	47
Gambar 3. 9 Grafik <i>velocity profile</i> pada $x/D_h = 8$ tanpa <i>obstacle</i> ; a) $Re_{Dh} = 2.4 \times 10^4$ .....	48
Gambar 3. 10 Grafik <i>velocity profile</i> pada $Re_{Dh} = 2.0 \times 10^4$ ; a) $x/D_h = 8$ .....	49
Gambar 4. 1 <i>dimensionless pressure drop</i> dengan variasi bentuk <i>obstacle</i> , angular position dan bilangan Reynolds; a) <i>Overall duct</i> , b) <i>upstream duct</i> .....	53
Gambar 4. 2 grafik <i>pressure drop</i> dengan variasi bentuk <i>obstacle</i> , angular position dan bilangan Reynolds; a) <i>elbow 90°</i> , b) <i>downstream duct</i> .....	54
Gambar 4. 3 distribusi kecepatan disepanjang <i>elbow 90°</i> pada bilangan $Re_{Dh} 4 \times 10^4$ dan $\alpha = 4^\circ$ .....	57
Gambar 4. 4 distribusi kecepatan pada penampang <i>outlet elbow 90°</i> dengan bilangan $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$ dan $\alpha = 4^\circ$ .....	58
Gambar 4. 5 distribusi kecepatan pada penampang disepanjang <i>downstream duct</i> dengan bilangan $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$ dan $\alpha = 4^\circ$ .....	60

Gambar 4. 6 turbulent intensity disepanjang elbow 90° dengan bilangan $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$ dan $\alpha = 4^\circ$ .....	61
Gambar 4. 7 turbulent intensity pada <i>downstream duct</i> dengan bilangan $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$ dan $\alpha = 4^\circ$ .....	62
Gambar 4. 8 <i>skin friction coefficient</i> pada <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow 90°</i> ; IWE= <i>inner wall elbow</i> , OWE = <i>outer wall elbow</i> .....	64
Gambar 4. 9 <i>skin friction coefficient</i> a) <i>inner wall downstream</i> , b) <i>outer wall downstream</i> , c) <i>top wall downstream</i> .....	65
Gambar 4. 10 posisi <i>mid-plane outer wall elbow 90°</i> dan <i>inner wall elbow 90°</i> ...66	
Gambar 4. 11 <i>coefficient of pressure inner</i> dan <i>outer wall elbow 90°</i> .....	66
Gambar 4. 12 distribusi kecepatan pada <i>elbow</i> a) CC, b) OSC .....	68
Gambar 4. 13 vektor kecepatan pada di sepanjang penampang <i>elbow 90°</i> .....	70
Gambar 4. 14 vektor kecepatan di sepanjang <i>downstream</i> . .....	71
Gambar 4. 15 turbulent intensity pada penampang 0°, 15°, 30°, dan 45° .....	72
Gambar 4. 16 turbulent intensity pada penampang 60°, 75°, dan 90° .....	73
Gambar 4. 17 turbulent intensity pada penampang disepanjang <i>downstream duct</i> .....	75
Gambar 4. 18 kontur <i>skin friction coefficients</i> pada dinding dalam <i>elbow 90°</i> .....	76
Gambar 4. 19 kontur <i>skin friction coefficients</i> pada dinding luar <i>elbow 90°</i> .....	77
Gambar 4. 20 <i>skin friction coefficients</i> pada dinding atas <i>elbow</i> .....	77
Gambar 4. 21 <i>skin friction coefficients</i> pada dinding dalam <i>downstream</i> .....	78
Gambar 4. 22 <i>skin friction coefficients</i> pada dinding luar <i>downstream</i> .....	78
Gambar 4. 23 <i>skin friction coefficients</i> pada dinding atas <i>downstream</i> .....	79
Gambar 4. 24 grafik <i>velocity profile</i> pada : a) $z'/D_h = 2$ dan b) $z'/D_h = 4$ ;.....	80
Gambar 4. 25 grafik <i>velocity profile</i> disepanjang elbow 90° pada bilangan $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$ .....	81
Gambar 4. 26 <i>velocity profile</i> disepanjang <i>downstream</i> pada bilangan $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$ (OSC).....	82
Gambar 4. 27 Turbulent Intensity disepanjang <i>downstream</i> pada bilangan $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$ (OSC).....	83
Gambar 4. 28 <i>skin friction coefficients</i> pada dinding dalam <i>downstream</i> .....	84
Gambar 4. 29 <i>skin friction coefficients</i> pada dinding luar <i>downstream</i> .....	84

Gambar 4. 30 <i>skin friction coefficients</i> pada dinding atas <i>downstream</i> .....	85
Gambar 4. 31 distribusi kecepatan dan Turbulent Intensity disepanjang <i>downstream</i> pada variasi bilangan Reynolds (OSC) .....	86
Gambar 4. 33 koefisien tekanan dengan variasi Reynolds number (OSC) .....	89
Gambar 4. 34 kontur tekanan statis di <i>upstream duct</i> ; a) 4°, b) 8°, dan 12° .....	91
Gambar 4. 35 <i>wake</i> pada bagian depan <i>obstacle</i> .....	92
Gambar 4. 36 koefisien tekanan di sepanjang dinding dalam dan luar <i>elbow</i> 90° dengan variasi bilangan Reynolds. ....	93
Gambar 4. 37 <i>wake</i> yang terbentuk di dekat dinding dalam <i>elbow</i> 90° pada variasi bilangan Reynolds (OSC) .....	95

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Desain Kecepatan maximum untuk Komponen HVAC .....	8
Tabel 2. 2 <i>Criteria for acceptable HVAC Noise level</i> .....	8
Tabel 2. 3 Daftar Penelitian Terdahulu yang Terkait.....	18
Tabel 2. 4 Daftar Penelitian Terdahulu yang Terkait ( <i>Continued</i> ) .....	18
Tabel 2. 5 data eksperimen dan jenis <i>bed</i> .....	30
Tabel 2. 6 nilai <i>pressure drop</i> pada tiap variasi $\alpha$ dan $Re_{Dh}$ .....	37
Tabel 3. 1 Posisi dan Jenis Data .....	47
Tabel 3. 2 Data <i>Grid Independency Test (Pressure Drop Error)</i> dan $y^+$ .....	48
Tabel 3. 3 Data Variasi Penelitian.....	51





# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan gedung tinggi di dunia mengalami peningkatan secara signifikan, salah satunya pertumbuhan gedung tinggi yang pesat terjadi di Britania Raya. Terjadi peningkatan sebesar 7% pada perizinan pembuatan gedung tinggi [1]. Peningkatan pertumbuhan gedung tinggi tersebut berdampak pada peningkatan kebutuhan listrik. Kebutuhan listrik untuk satu hotel di Hong Kong berkisar  $1000 \text{ MJ/m}^2 - 3400 \text{ MJ/m}^2$  dalam satu tahun, pada literatur lain disebutkan kebutuhan hotel di Amerika sebesar  $401 \text{ kWh/m}^2$  dalam satu tahun [2][3]. Kebutuhan energi listrik pada hotel tersebut terdiri dari 32% *air conditioning*, 28% *non-electrical*, 23% *miscellaneous*, 12% *lighting*, dan 5% *lift & escalators* [3]. Berdasarkan data tersebut penggunaan HVAC (*heating ventilation and air conditioning*) berdampak paling signifikan pada konsumsi energi listrik. Perincian konsumsi energi HVAC pada hotel tersebut terdiri dari 34% *fan*, *cooling* (27%), 17% *heating*, 16% *pumps* dan 6% *cooling tower* [4]. Presentase konsumsi energi listrik untuk *fan* pada system HVAC sangat besar sehingga sangat menguntungkan apabila kebutuhan energi listrik untuk fan tersebut dapat diminimalisir.

Salah satu bagian dari HVAC adalah instalasi *duct* yang terdiri dari *square elbow 90°*. Aliran fluida yang melewati *square elbow 90°* akan mengalami *pressure drop ( $\Delta P$ )* yang signifikan sehingga menyebabkan meningkatnya kerja *fan/blower*. *Pressure drop* pada *square elbow 90°* lebih besar daripada *pressure drop* di *straight duct* dengan panjang ekuivalen pipa yang sama. Hal ini disebabkan oleh *frictional force loss* dan *secondary flow* pada *elbow 90° region*.

*Frictional force* timbul dikarenakan adanya fluida yang bergesekan dengan permukaan dinding dari *square elbow 90°*, Hal ini lebih dikenal dengan *head loss*. Nilai dari *head loss* bergantung pada diameter hidraulik ( $D_h$ ), kecepatan aliran fluida rata-rata ( $U$ ), panjang ekuivalen ( $L_{eq}$ ) dan *frictional force* ( $f$ ). Nilai koefisien gesek dapat berubah berdasarkan tingkat turbulen dari aliran. Fluida yang tingkat

turbulen intensitasnya ( $TI$ ) lebih tinggi maka memiliki nilai koefisien gesek yang lebih rendah dan berlaku sebaliknya [5].

*Aliran fluida* mengalami *centrifugal force* saat melewati *elbow 90°*. *Centrifugal force* menyebabkan timbulnya *radial pressure gradient* disepanjang dinding dalam hingga ke dinding luar *elbow 90°*. Fluida pada bagian dinding luar *elbow 90°* memiliki tekanan yang lebih tinggi dibanding fluida pada dinding dalam. Berdasarkan *radial pressure gradient* tersebut, fluida mengalir dari dinding luar menuju ke dinding dalam *elbow 90°* dengan melewati bagian atas dan bawah dinding *elbow 90°*. Pergerakan fluida dari dinding luar menuju dalam tersebut berkembang menjadi *secondary flow*. Penelitian terkait karakteristik *secondary flow* disepanjang *elbow 90°* telah dilakukan [6]. Berdasarkan penelitian tersebut diketahui struktur *secondary flow* pada bagian *elbow 90°* bervariasi terhadap berubahnya bilangan  $Re_{Dh}$ . Berbagai penelitian mengenai pembentukan *secondary flow* juga telah diteliti sebelumnya [7][8][9]. Salah satu hasil dari penelitian tersebut adalah mengecilnya struktur *secondary flow* jika *curvature ratio* ( $R_m/D_h$ ) ditingkatkan. Struktur dari *secondary flow* bergantung pada diameter *hydraulic* ( $D_h$ ), kecepatan aliran fluida rata-rata ( $U$ ) dan *bend curvature ratio* ( $R_m/D_h$ ).

Salah satu upaya untuk mengurangi *pressure loss* adalah menerapkan metode *pasif boundary layer control*. *Pasif boundary layer control* merupakan cara untuk mengontrol lapis batas dengan cara merubah bentuk dari objek atau menambahkan *pasive device* seperti *riblet*, *spoiler* atau *obstacle* [10]. *Obstacle* berfungsi untuk mengganggu aliran agar memiliki pergerakan yang semakin acak atau memiliki tingkat turbulensi yang lebih tinggi. Pergerakan aliran yang semakin acak diharapkan memiliki *frictional force* yang semakin rendah. Penggunaan *obstacle* juga telah terbukti mengurangi *drag force* pada *circular cylinder*. Hal ini dikarenakan tertundanya *separation point* sehingga *pressure drag* dapat dikurangi [11]. *Obstacle* yang digunakan memiliki model luas penampang berupa *circular cylinder* (CC) dan *oriented square cylinder* (OSC), karakteristik aliran disekeliling *circular cylinder* dan *oriented square cylinder* telah diselediki [12]. Berdasarkan penelitian, terdapat perbedaan *turbulence intensity* dan struktur *vortex shedding* pada CC dan OSC.

Objek pada penelitian ini berupa *square duct* yang terdiri dari tiga bagian yaitu *upstream*, *elbow 90°* dan *downstream*. *Duct* yang digunakan memiliki bentuk penampang berupa *square* dengan diameter *hydraulic* ( $D_h$ ) sebesar 125 mm. Investigasi secara numerik dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari peletakan *obstacle* terhadap karakteristik aliran di dalam *duct*. *Obstacle* yang diaplikasikan memiliki diameter/diagonal sebesar 12,5 mm dengan model bentuk penampang berupa CC dan OSC. *Obstacle* diletakan di dekat dinding dalam *square elbow 90°* dengan variasi *angular position*  $4^\circ$ ,  $8^\circ$  dan  $12^\circ$ . Karakteristik aliran fluida berupa *turbulent intensity*, *skin friction coefficient*, *coefficient of pressure* dan *pressure drop* menjadi parameter yang dianalisis untuk mengetahui pengaruh dari variasi peletakan dan bentuk *obstacle*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Aliran fluida yang mengalir melintasi *elbow 90°* mengalami *pressure drop* yang signifikan bahkan lebih besar jika dibandingkan dengan *pressure drop* pada saluran lurus dengan panjang ekuivalen yang sama. *Pressure drop* pada *elbow 90°* dikontribusi oleh *friction loss* dan *secondary loss*. *Friction losses* merupakan *losses* yang timbul akibat dari gesekan antara fluida dengan dinding dari *duct*. *Secondary loss* merupakan *losses* yang timbul akibat perbedaan tekanan pada sisi luar dan dalam dari dinding *elbow 90°*. Perbedaan tekanan tersebut akan menyebabkan adanya aliran sekunder yang bergerak ke arah radial sehingga membentuk *secondary losses*. *Secondary losses* dapat ditanggulangi dengan memperbesar *curvature ratio* pada *elbow 90°* sehingga perbedaan tekanan di sisi *inner elbow 90°* dan *outer elbow 90°* menurun. Penanggulangan terhadap *friction losses* dan *secondary flow* yang terbentuk di dalam *elbow 90°* merupakan hal yang menarik untuk diteliti. Penggunaan *obstacle* yang diletakkan di dekat *inner wall elbow 90°* diharapkan memiliki pengaruh terhadap *pressure drop* pada sisi *elbow 90°* dan *downstream*. Pengaruh dari *obstacle* tersebut berupa interaksi antara *shear layer* yang terbentuk dari *obstacle* dengan *boundary layer* pada dinding. Interaksi tersebut berupa pencampuran antara *shear layer* dengan *boundary layer*. Pencampuran tersebut membentuk *shear layer* yang memiliki intensitas turbulensi

yang tinggi yang mampu meningkatkan Reynolds *stress* yang dapat menurunkan nilai *shear stress*.

Penelitian secara numerik dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *obstacle* dengan bentuk penampang CC dan OSC terhadap karakteristik aliran pada *elbow 90°* dan *downstream*. Penyelidikan terhadap variasi kecepatan (1 m/s hingga 5 m/s) dan *angular position* ( $\square$ ) = 4°, 8°, dan 12°, ditambahkan untuk mengetahui kecepatan operasi dan posisi optimal dari penggunaan *obstacle*. Karakteristik aliran yang dianalisis tiap variasi berupa data kuantitatif dan kualitatif.

### 1.3 Batasan masalah

Berikut merupakan batasan masalah pada penelitian ini:

1. Fluida kerja adalah udara dengan *freestream flow* pada sisi *inlet* yang *incompressible*, dan *uniform*.
2. Analisis dan simulasi dilakukan pada keadaan *steady flow*.
3. Kekasaran permukaan pada dinding *duct* dan *obstacle* belum ditinjau.
4. Temperatur udara 28°C.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian studi numerik terkait aliran melalui saluran udara berpenampang bujur sangkar yang terdiri dari saluran lurus pada sisi upstream, *elbow 90°*, dan saluran lurus pada sisi *downstream* ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. Tujuan umum :
  - Mengetahui pengaruh pemasangan *obstacle* berbentuk CC dan OSC terhadap *pressure drop* aliran fluida yang melewati instalasi *duct* pada lokasi *square elbow 90°* ( $R_m/D_h = 3$ ) dan *downstream*.
2. Tujuan khusus :
  - Mengetahui pengaruh pemasangan *obstacle pressure drop* aliran ketika melewati *square elbow 90°* dan *downstream* dengan variasi Reynolds *number* yang berbeda.

- Mengetahui pengaruh pemasangan *obstacle* karakteristik aliran fluida ketika melewati *square elbow*  $90^\circ$  dengan variasi posisi peletakan *obstacle* ( $\alpha$ ).

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian dari tugas akhir ini yaitu:

1. Menunjukkan hasil penelitian secara kualitatif dan kuantitatif mengenai karakteristik aliran fluida sepanjang *duct* dengan penambahan *obstacle* yang diletakkan pada bagian *elbow*  $90^\circ$ .
2. Memberikan pengetahuan dalam penggunaan *software* Ansys Fluent 18.2 untuk mengetahui karakteristik aliran pada *obstacle* yang berbentuk CC dan OSC.
3. Memberikan wawasan tentang bagaimana menurunkan *pressure drop* di sepanjang *downstream* dan *elbow*  $90^\circ$  dengan menggunakan *obstacle*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

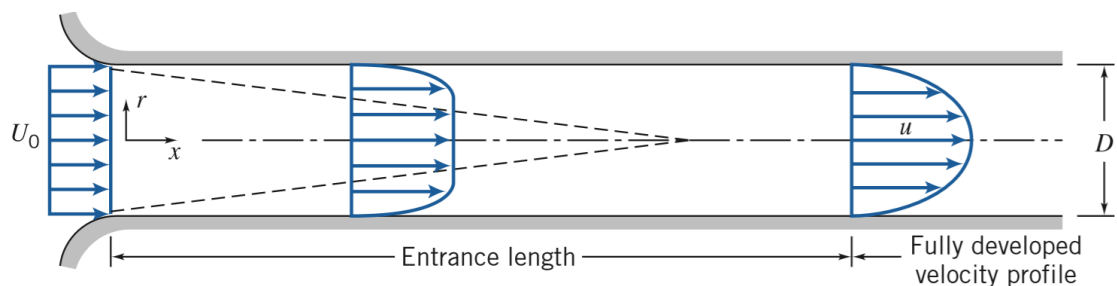
## BAB 2

### DASAR TEORI

Beberapa referensi yang akurat bersumber dari buku, jurnal, dan artikel digunakan sebagai tinjauan pustaka pada penelitian ini. Penelitian ini terfokus pada fenomena aliran yang melintasi obstacle dengan bentuk *circular cylinder* dan *oriented square cylinder* yang diletakan pada bagian *elbow 90°*, sebagai upaya untuk meningkatkan intensitas turbulensi dan mengurangi *pressure drop*.

#### 2.1 Internal Flow

Aliran yang melintasi sebuah saluran seperti *duct* atau *pipe* digolongkan menjadi aliran dalam (*internal flow*). Profil kecepatan dari suatu *internal flow* berubah seiring pergerakan aliran di dalam pipa. Pada keadaan mula-mula aliran memiliki profil kecepatan yang seragam (*uniform velocity profile*). Profil kecepatan tersebut berubah dikarenakan terdapat tegangan geser pada dinding yang menyebabkan fenomena *no slip condition* ( $u = 0$  m/s). Daerah yang dipengaruhi oleh tegangan geser disebut *boundary layer*. *Boundary layer* akan terus berkembang hingga pada titik tertentu, pada titik tersebut *velocity profile* akan terbentuk secara sempurna/penuh atau lebih dikenal dengan *fully developed flow*. *Inlet* dari suatu saluran hingga titik *velocity profile* dapat terbentuk sempurna disebut *entrance length*. *Entrance length* untuk aliran turbulen bernilai 25 hingga 40 kali diameter *hydraulic* dari pipa [5].



Gambar 2. 1 *Boundary Layer Development* [5]

Aliran fluida yang melewati sistem *ducting* dalam perancangannya diatur berdasarkan *standart ASHRAE* [13], diantaranya rekomendasi kecepatan aliran

udara yang diperbolehkan agar dalam operasinya tidak menimbulkan *noise* dan vibrasi. Nilai rekomendasi kecepatan pada *main duct* dapat dilihat pada table 2.1. *Room Criteria* (RC) untuk bangunan hotel dapat dilihat pada tabel 2.2. Berdasarkan table 2.1 dan 2.2 dapat diketahui bahwa kecepatan maksimum untuk hotel sebesar 1750 fpm atau 8.89 m/s dengan asumsi *duct* berada di atas akustic *ceilings*. Adapun kecepatan pada bagian branch (percabangan) juga memiliki rekomendasi kecepatan maksimum. Kecepatan pada bagian branch tidak boleh melebihi dari 1200 fpm atau 6 m/s.[14]

Tabel 2. 1 Desain Kecepatan maximum untuk Komponen HVAC [13]

Main Duct Location	Design RC(N)	Maximum Airflow Velocity, fpm	
		Rectangular Duct	Circular Duct
In shaft or above drywall ceiling	45	3500	5000
	35	2500	3500
	25	1700	2500
Above suspended acoustic ceiling	45	2500	4500
	35	1750	3000
	25	1200	2000
Duct located within occupied space	45	2000	3900
	35	1450	2600
	25	950	1700

Tabel 2. 2 *Criteria for acceptable HVAC Noise level* [13]

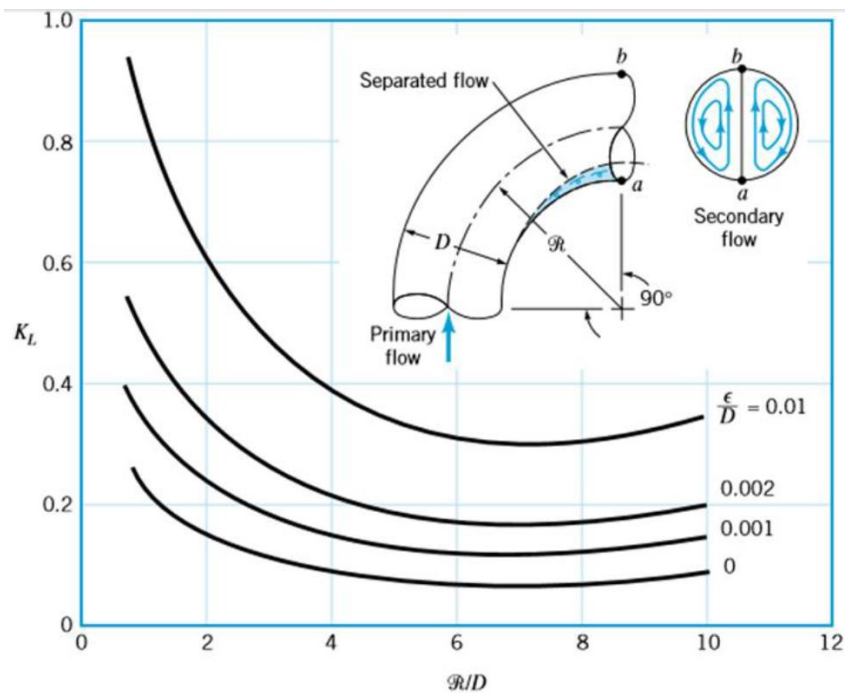
Occupancy	Preferred	Alternate
Private residences	RC 25-30 (N)	NC 25-30
Apartments	RC 30-35 (N)	NC 30-35
Hotels/Motels		
Individual rooms or suites	RC 30-35 (N)	NC 30-35
Meeting/banquet rooms	RC 30-35 (N)	NC 30-35
Halls, corridors, lobbies	RC 35-40 (N)	NC 35-40
Service/support areas	RC 40-45 (N)	NC 40-45

## 2.2 Karakteristik Aliran di Dalam Elbow 90°

*Elbow 90°* menghasilkan kerugian (*head loss*) yang lebih besar daripada pipa yang lurus dengan panjang ekuivalen yang sama. Kerugian ini diakibatkan adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah



melewati aksesoris tersebut. Separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure* dan rendahnya momentum yang dimiliki oleh suatu fluida. Besarnya *coefficient loss* tersebut bergantung pada bilangan Reynolds,  $R_m/D_h$ , dan *relative roughness* ( $e/D$ ) elbow  $90^\circ$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, 2.3 dan 2.4.

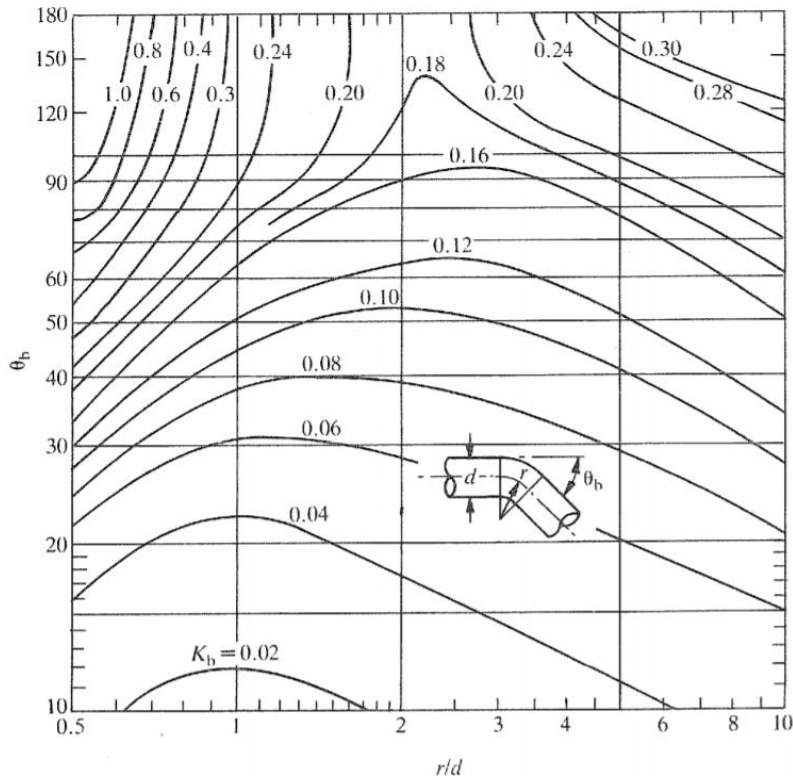


Gambar 2. 2 Grafik loss coefficient elbow  $90^\circ$  terhadap  $R_m/D_h$  dan  $e/D$  [15]

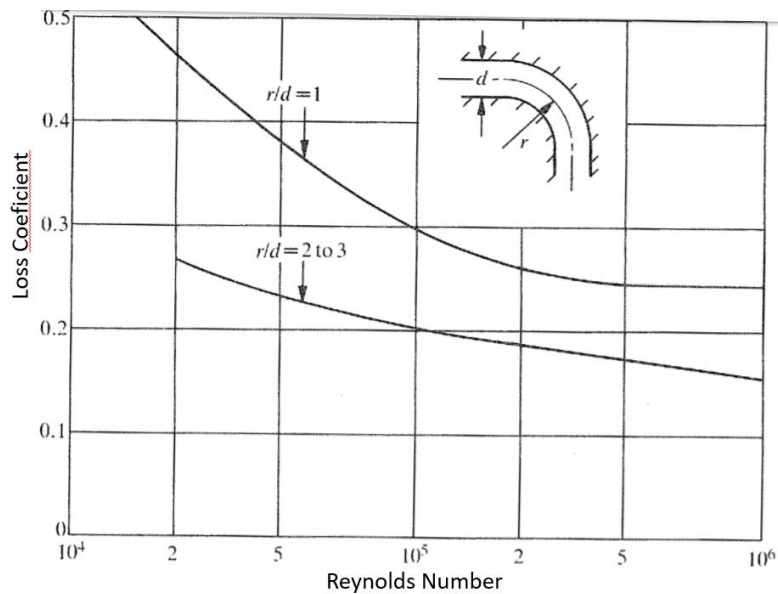
Gambar 2.2 menunjukkan grafik *coefficient losses* untuk elbow  $90^\circ$  dengan variasi ( $e/D$ ) dan  $R_m/D_h$ . Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa nilai *coefficient losses* memiliki kurva yang bersifat parabolic namun secara keseluruhan peningkatan  $R_m/D_h$  akan menurunkan nilai *coefficient losses*. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh grafik *coefficient losses* pada Gambar 2.3.

Gambar 2.4 menunjukkan pengaruh *Reynolds number* terhadap *coefficient losses*. Secara keseluruhan nilai *coefficient losses* akan menurun apabila *Reynolds number* ditingkatkan. Penurunan nilai *coefficient losses* akan efektif pada peningkatan *Reynolds number* hingga  $2 \times 10^5$ . Pada  $R_m/D_h = 1$ , peningkatan nilai *Reynolds number* di atas  $2 \times 10^5$  hingga  $5 \times 10^5$  tidak menurunkan nilai *coefficient losses* yang signifikan sedangkan peningkatan *Reynolds number* di atas  $5 \times 10^5$  tidak memberikan pengaruh terhadap nilai *coefficient losses*. Pada  $R_m/D_h = 2$  dan 3, terjadi

penurunan nilai *coeffisien loses* yang tidak signifikan pada peningkatan nilai *Reynolds number* di atas  $2 \times 10^5$ . Terjadi penurunan *coeffisien loses* yang signifikan pada peningkatan *Reynolds number* pada kisaran  $2 \times 10^4$  hingga  $1 \times 10^5$ .

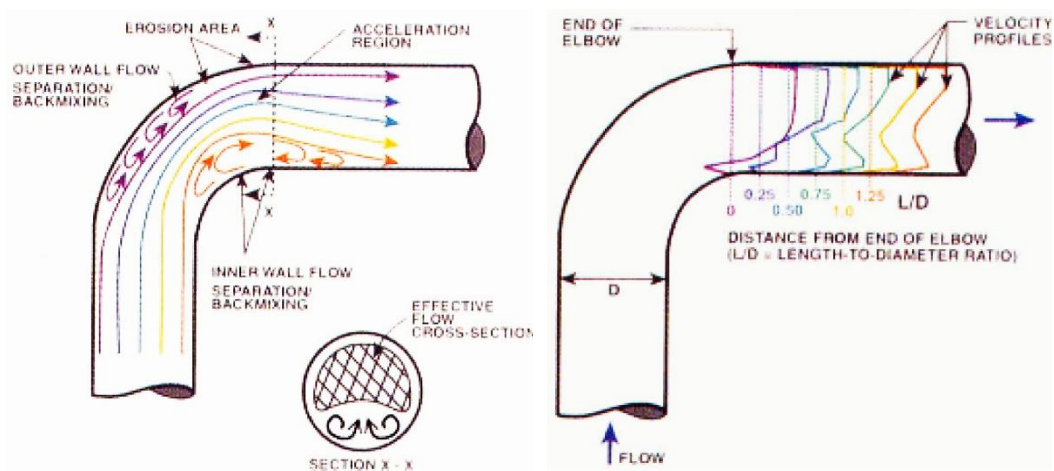


Gambar 2. 3 Grafik *loss coefficient elbow 90°* terhadap  $R_m/D_h$  dan  $\theta_b$  [16]



Gambar 2. 4 Grafik *loss coefficient elbow 90°* terhadap  $R_m/D_h$  dan  $Re_{Dh}$  [16]

*Secondary flow* terjadi karena adanya pergerakan fluida dari dinding luar ke arah dinding dalam yang disebabkan perbedaan distribusi tekanan yang terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*. Tekanan statis semakin besar pada sisi *outer wall*. Oleh karena itu, aliran yang melewati *elbow 90°* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama, sehingga terjadilah aliran sekunder (*secondary flow*), sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Struktur *secondary flow* pada elbow  $90^\circ$  [17]

### 2.3 Navier-Stokes Equation

Tegangan *viscous* pada *fluida Newtonian* proporsional terhadap laju deformasi ke arah angular. Pada aliran tiga dimensi, tegangan dapat di tunjukan dengan ketentuan *velocity gradients* dan *properties fluida* pada *rectangular coordinates*. Persamaan yang dapat digunakan untuk menganalisis aliran tiga dimensi adalah persamaan Navier-Stokes. Persamaan ini telah disederhanakan dengan menganggap tidak ada perubahan kecepatan terhadap waktu. Ditambahkan penyederhanaan lain yakni menganggap pengaruh nilai gravitasi terhadap aliran tidak signifikan [5].

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

(2.1)

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

(2.2)

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

(2.3)

#### 2.4 *Passive Boundary Layer Control*

*Passive boundary layer control* merupakan salah satu cara untuk mengatur karakteristik dari lapis batas (*boundary layer*) dengan cara merubah bentuk dari geometri objek atau menambahkan objek lain di dekat objek utama. Penambahan objek lain berupa *turbulators*, *riblets*, *spoiler* atau *large break-up devices* (LEBO). Keuntungan dari penggunaan metode ini adalah: 1) metode ini mudah untuk diaplikasikan untuk semua jenis kasus, 2) tidak membutuhkan eksternal energi, 3) tidak membutuhkan *mechanical* atau *electronic part* [10].

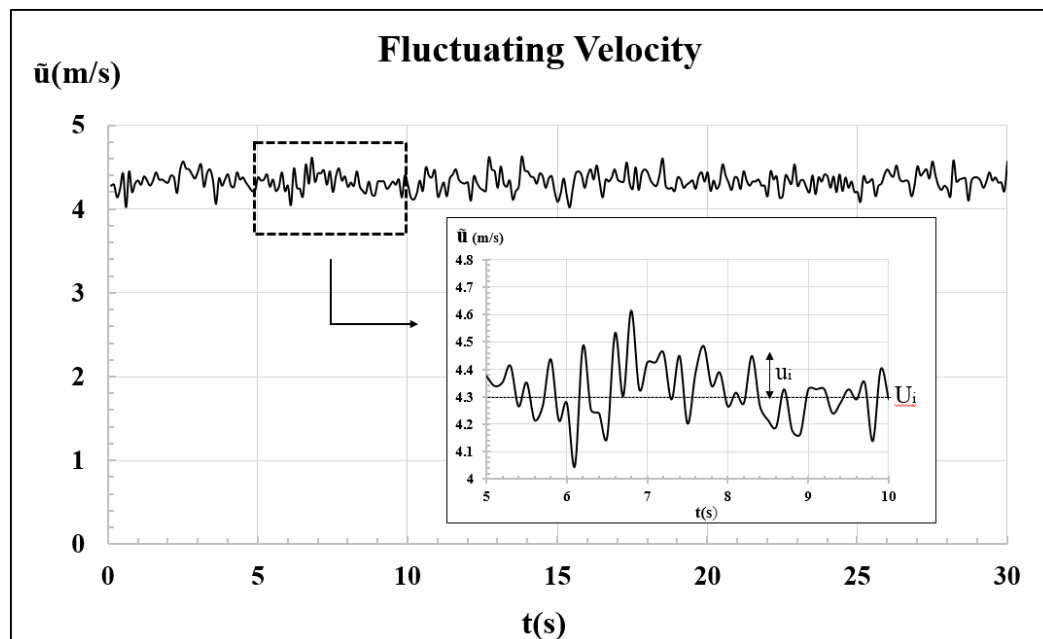
#### 2.5 Dekomposisi Reynolds

Kecepatan sesaat ( $\tilde{u}_i(x,t)$ ) terdiri dari dua komponen penyusun, komponen tersebut adalah kecepatan rata-rata ( $U_i(x)$ ) dan komponen fluktuasi ( $u_i(x,t)$ ). Berdasarkan uraian tersebut persamaan kecepatan sesaat dapat dituliskan sebagai berikut [18]:

$$\tilde{u}_i = U_i + u_i$$

(2.4)

Gambar 2.6 merupakan salah satu contoh dari *streamwise velocity time series* yang diukur di dalam lapis batas turbulenta. Gambar tersebut akan mempermudah pemahaman mengenai persamaan 2.4



Gambar 2. 6 *Fluctuating Velocity*

## 2.6 Intensitas Turbulensi

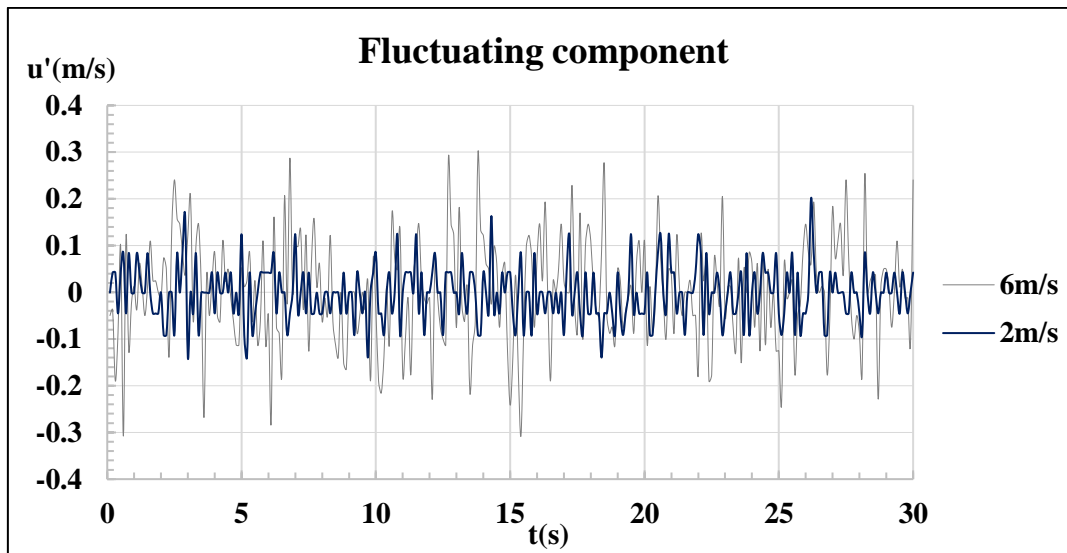
Intensitas turbulensi aliran dipengaruhi oleh kecepatan rata-rata suatu aliran dan komponen fluktuasi pada satu dimensi. Persamaan intensitas turbulensi ke arah "x" dapat dituliskan sebagai berikut [19]:

$$IT_u = \frac{\sqrt{\frac{\sum(\bar{u}_i - U)^2}{i}}}{U_{free\ stream}} = \frac{\sqrt{(\bar{u} - U)^2}}{U_{free\ stream}} = \frac{\sqrt{(u^2)}}{U_{free\ stream}} \quad (2.5)$$

Terdapat dua jenis *streamwise velocity* aliran pada Gambar 2.7 yang memiliki perbedaan karakteristik walaupun nilai rata-rata kecepatan dari kedua *streamwise velocity* bernilai sama. *fluctuating velocity* yang berwarna abu-abu memiliki *fluctuating* komponen yang lebih tinggi jika dibanding *fluctuating* komponen berwarna biru. Sehingga dapat disimpulkan *velocity* berwarna abu-abu memiliki intensitas turbulensi yang lebih tinggi dibanding *velocity* yang berwarna biru. Penentuan nilai *turbulent intensity* juga dibutuhkan untuk memberi informasi dari keadaan *boundary condition*. Nilai dari *turbulent intensity* dapat ditentukan dengan persamaan berikut [6][20]:

$$TI = 0,16(Re_{Dh})^{-\frac{1}{8}}$$

(2.6)



Gambar 2. 7 Perbandingan dua *fluctuating velocity*

### 2.7 Pressure Coefficient

Nilai perbedaan tekanan ( $\Delta P$ ) sistem perpipaan maupun saluran udara (*ducting system*) merupakan salah satu parameter yang perlu untuk diteliti. Pada bagian *ducting* nilai  $\Delta P$  dapat diwakili dengan nilai  $C_p$  yang merupakan perbandingan tekanan statis terhadap tekanan dinamis. Penggunaan  $C_p$  sebagai parameter untuk menginvestigasi aliran bersifat lebih komparatif. Nilai  $C_p$  dapat dihitung dengan persamaan berikut [20] :

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = \frac{P_s - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (2.7)$$

$P_s$  : tekanan statis lokal pada dinding (Pa)

$P_{ref}$  : tekanan statis acuan (referensi) (Pa)

$\rho$  : massa jenis fluida pada kondisi kerja ( $m^3/kg$ )

$U_{ref}$  : kecepatan freestream (m/s)

## 2.8 Head Loss

*Head loss* merupakan suatu fenomena hilangnya energi aliran di dalam sistem perpipaan. Hilangnya energi aliran selalu terjadi pada sistem perpipaan dengan menggunakan berbagai macam fluida, seperti fluida cair dan gas. *Head loss* sangat merugikan dalam aliran fluida di dalam sistem perpipaan, karena *head loss* dapat menaikkan kerja dari *turbomechinery*.

Salah satu penyebab *head loss* adalah desain dari sistem perpipaan tersebut. Desain yang memiliki instrumentasi/aksesoris yang lebih banyak maka memiliki kerugian energi yang lebih besar. Persamaan Bernoulli menggambarkan keseimbangan energi dari suatu fluida yang mengalir dari satu titik ke titik yang lain. Persamaan tersebut disempurnakan dengan menambahkan pengaruh dari *head loss*. Persamaan tersebut disebut persamaan energi yang dapat dilihat pada persamaan (2.8) [5]:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\bar{v}_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\bar{v}_2^2}{2g} + Z_2 + H_{lt}$$

(2.8)

dimana :

$P$  = statis pressure (pa)

$V$  = velocity dari fluida (m/s)

$Z$  = elevasi dari fluida

$H_{lt}$  = head loss total (m)

### 2.8.1 Head Loss Mayor

*Head loss mayor* adalah nilai kehilangan energi yang diakibatkan oleh gesekan antara fluida dengan dinding pipa lurus yang mempunyai luas penampang yang tetap. *Head loss* yang terjadi pada aliran dibagi menjadi dua bagian berdasarkan keadaan dari aliran:

#### a. Laminar

Untuk aliran laminar berkembang penuh pada pipa circular dengan aliran laminar, *head loss mayor* didapatkan dengan persamaan berikut [5]:

$$H_l = \frac{64 L \bar{V}^2}{Re D 2g}$$

(2.9)

b. Turbulen

*Head loss mayor* untuk aliran turbulen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.10). Nilai koefisien gesek untuk aliran turbulent didapatkan dari moody diagram [5]:

$$H_l = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g}$$

(2.10)

Untuk pipa sirkular, aliran turbulen (bilangan  $Re_{dh} > 4000$ )

### 2.8.3 Head Loss Minor

*Head loss minor* adalah kehilangan energi aliran fluida di dalam pipa yang disebabkan oleh perubahan luas penampang aliran, *entrance*, *fitting*, dll. Nilai *head loss minor* didapatkan dengan persamaan berikut [5] :

$$H_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2g}$$

(2.11)

### 2.8.4 Pressure loss

Terdapat persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung tekanan yang hilang atau *pressure loss* pada pipa. Persamaan ini dapat digunakan untuk semua jenis aliran baik turbulent maupun laminar. Persamaan ini juga dapat digunakan untuk pipa berpenampang *circular* maupun *non-circular*. Pada persamaan tersebut dapat dilihat bahwa *friction coefficient* berbanding lurus terhadap nilai *pressure loss*. Nilai *pressure loss* didapatkan dari persamaan berikut [18] :

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{avg}^2}{2}$$

(2.12)



## 2.9 Shear Stress

Salah satu karakteristik aliran yang menarik untuk diamati adalah nilai *shear stress*. *Shear stress* merupakan suatu karakteristik aliran yang menunjukkan seberapa besar tegangan geser yang ditimbulkan akibat gesekan antara fluida dengan dinding. Adapun parameter yang mempengaruhi besarnya nilai tegangan geser tersebut yaitu gradient kecepatan, viscosity dan Reynolds *stress*. Formula yang digunakan untuk menghitung *shear stress* adalah [5][18] :

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} - \rho \overline{u'v'} \quad (2.13)$$

Nilai *shear stress* tersebut dapat dibuat *dimensionless* dengan cara membagi persamaan 2.12 dengan tekanan dinamis sehingga timbul parameter baru yang disebut *skin friction coefficient*. Penggunaan *skin friction coefficient* lebih mudah dan objektif untuk membandingkan nilai suatu *shear stress* pada variasi yang berbeda. Formula dari *skin friction coefficient* dapat dilihat pada persamaan 2.14 :

$$C_f = \frac{\tau_{wall}}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (2.14)$$

## 2.10 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu memberikan informasi terkait penelitian ini. Informasi tersebut dapat berupa latar belakang, metode simulasi dan hasil penelitian. Penelitian yang terkait ditabelkan untuk memudahkan pembaca mengetahui sejarah perkembangan penelitian mengenai penggunaan *obstacle*. Daftar tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Table 2.3.

Tabel 2. 3 Daftar Penelitian Terdahulu yang Terkait.

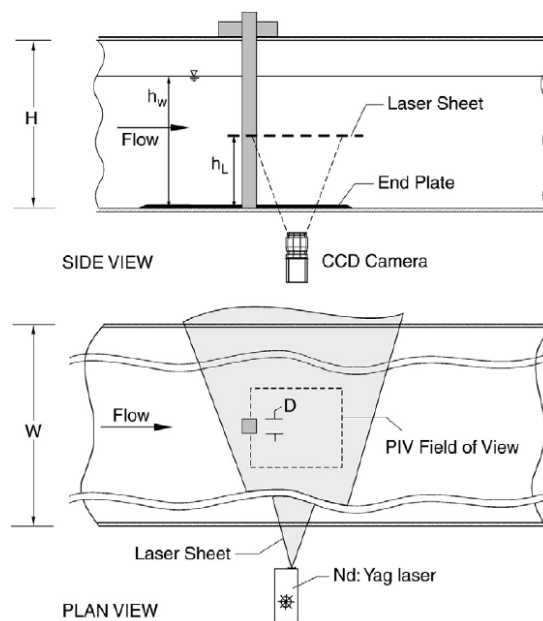
No	Judul	Penulis	Tahun
1	<i>Experimental Investigation on Turbulent Flow in a Circular-Sectioned 90-Degree Bend</i>	K. Sudo, M. Sumida, H. Hibara	1998
2	<i>Flow Structure in The Downstream of Square and Circular Cylinders</i>	Muammer Ozgoren	2005
3	<i>Experimental Study on the Effect of Guide Vane Insertion and Reynolds Numbers on the Flow Pressure Drop in a 90° Rectangular Elbow</i>	Sutardi dkk	2010
4	<i>Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct With Installed 90° Elbow</i>	K.Rup P. Sarna	2011
5	<i>Experimental Study of Drag Reduction on Circular Cylinder and Reduction of Pressure Drop in Narrow Channels by Using a Cylinder Disturbance Body</i>	Wawan A. W Nuzul Hidayat	2014
6	<i>Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends</i>	Prasun Dutta Nityananda Nandi	2015
7	<i>Numerical Study on Flow Separation in 90° Pipe Bend under High Reynolds number by <math>k-\epsilon</math> Modelling [21]</i>	Prasun Dutta dkk	2015
8	<i>Numerical Study on Turbulent Separation Reattachment Flow in Pipe Bends with Different Small Curvature Ratio</i>	Prasun Dutta Nityananda Nandi	2018

Tabel 2. 4 Daftar Penelitian Terdahulu yang Terkait (*Continued*)

No	Judul (penulis)	Posisi Obstacle	$R_m/D_h$	$Re_{dh}$
1	Studi numerik Aliran Melalui <i>Square Duct</i> Dan <i>Elbow 90°</i> Dengan Variasi Diameter <i>Inlet Disturbance Body</i>	$d/D_h = 0.064, 0.08$ & $0,1(\text{upstream})$	1.5	$3.94 \times 10^4$ $7.88 \times 10^4$ $1.34 \times 10^5$
2	Studi Eksperimen Karakteristik Aliran Melalui <i>Square Duct</i> Dengan <i>Oriented Square Cylinder</i> Sebagai <i>Inlet Disturbance Body</i> Di Dalam <i>Elbow 90°</i>	$\alpha = 5^\circ - 20^\circ$	3	$4.77 \times 10^4$ $6.36 \times 10^4$ $9.54 \times 10^4$
3	<i>The study on the effect of inlet disturbance body insertion on the flow pressure drop in a 90° square elbow [22]</i>	$l/D_h = 0.1 - 0.5,$	1.5	$3.97 \times 10^4$ $13.5 \times 10^4$

### 2.10.1 Karakteristik Aliran yang Melewati Sebuah *Obstacle*

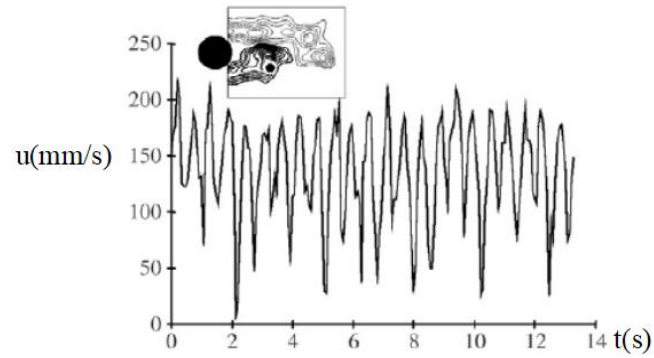
Penelitian mengenai karakteristik aliran di sekitar *obstacle* telah banyak dilakukan. Salah satu diantaranya telah meneliti aliran disekitar *obstacle* yang berbentuk *circular cylinder* (CC) , *oriented square cylinder* (OSC) dan *square cylinder* (SC) [12]. Hasil penelitian tersebut berupa karakteristik *vorticity*, *velocity* dan rms *velocity* aliran di sekitar *obstacle* dengan variasi bilangan  $Re_H$  dan bentuk penampang *obstacle*. Proses pengambilan data dilakukan dengan cara melakukan eksperimen pada saluran dengan lebar  $W = 1000$  mm, panjang  $L = 8000$  mm dan  $H = 750$  mm. Aliran udara akan dialirkan dengan rentang  $Re_{Dh} = 550$  hingga  $3.4 \times 10^3$  dengan *turbulent intensity* kurang dari 0.2 %. Nd:Yag laser digunakan untuk menghasilkan laser *sheet* dan CCD *camera* ( $1024 \times 1024$ ) untuk merekam fenomena aliran sebanyak 4096 data.



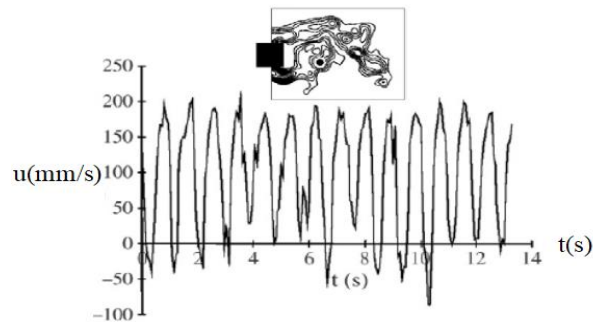
Gambar 2. 8 Instalasi Pengambilan Data Dengan Menggunakan CCD *Camera* dan Nd:Yag Laser [12]

Salah satu hasil penelitian berupa grafik *instantaneous streamwise velocity* terhadap waktu. Data tersebut diukur pada bagian di dekat *wake* dari *cylinder*. Proses pengambilan data *instantaneous streamwise velocity* dilakukan pada  $Re_{Dh} = 3.4 \times 10^3$ . Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9 a, b dan c. Sumbu "X" adalah waktu sedangkan sumbu "Y" berupa *instatanous velocity*. Dapat dilihat

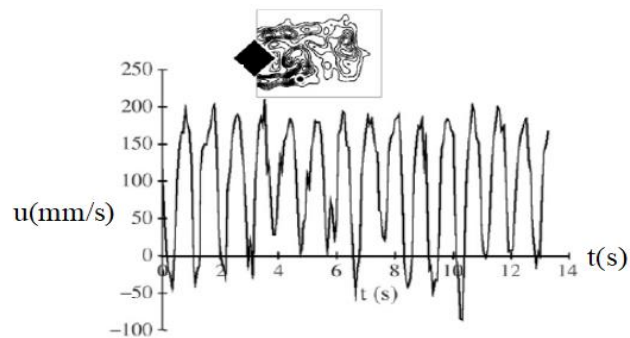
bahwa rentang fluktuasi *instantaneous streamwise velocity square obstacle* dan *oriented square obstacle* lebih tinggi daripada *circular obstacle*. *Oriented square* dan *square* memiliki rentang fluktuasi *velocity* sekitar -50 hingga 200 sedangkan *circular cylinder* hanya memiliki rentang fluktuasi *velocity* berkisar 0 hingga 200.



(a)



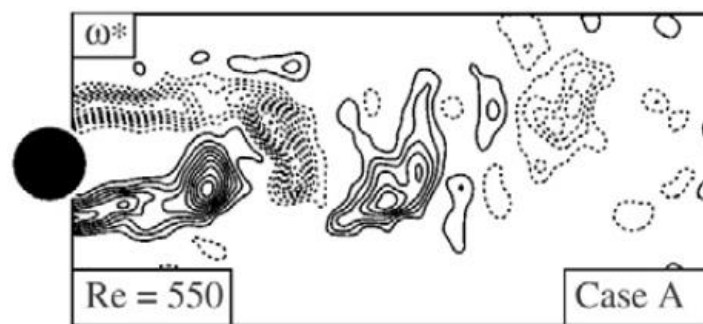
(b)



(c)

Gambar 2. 9 *Instantaneous Streamwise Velocity Component  $u$  (mm/S) Terhadap Waktu* a) *Circular Obstacle* b) *Square Obstacle* c) *Oriented Square Obstacle* [12]

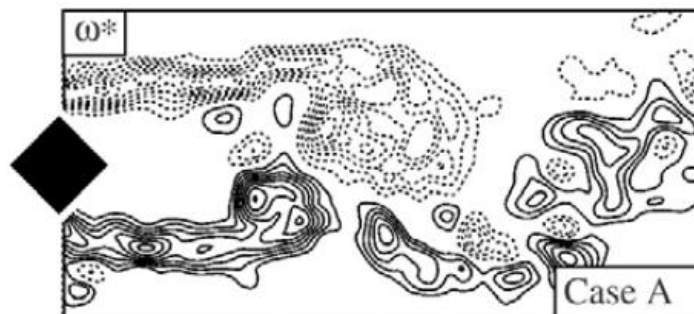
Kontur *Instantaneous vorticity wake* aliran yang melintasi *circular cylinder* (CC) , *square cylinder* (SC) dan *oriented square cylinder* (OSC) juga ditampilkan pada gambar 2.10. Proses pengambilan data dilakukan pada  $Re_{Dh} = 550$ . Satuan *Instantaneous vorticity* telah dinormalkan dengan cara mengganti  $\omega$  menjadi  $\omega^*$ , dimana  $\omega^* = \omega(U_\infty/D)$ . Struktur *vortex shedding* pada *square* dan *oriented square* lebih besar daripada *vortex shedding* pada *circular cylinder*. Struktur *vortex shedding* yang besar menandakan semakin besarnya *wake* pada bagian *downstream* *Obstacle*.



(a)



(b)



(c)

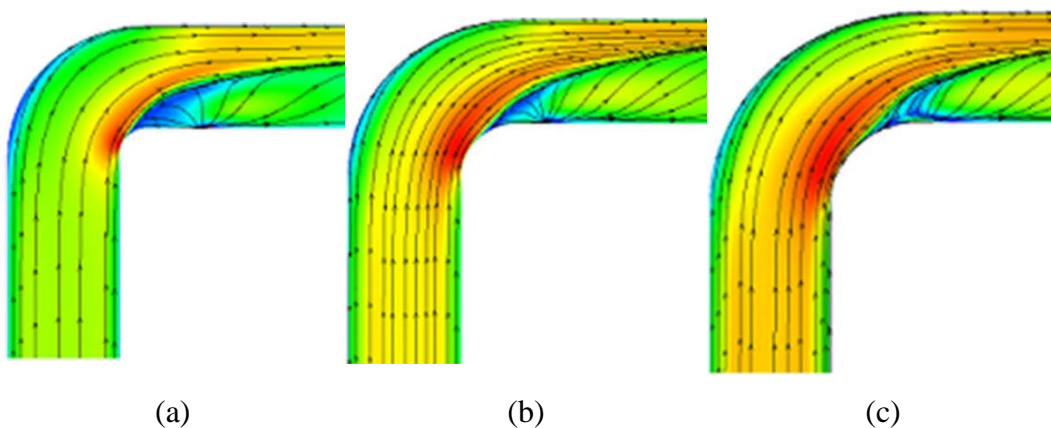
Gambar 2. 10 Pola dari *Dimensionless Vorticity* ( $\omega^*$ ) a) *Circular Obstacle* b) *Square Obstacle* dan c) *Oriented Square Obstacle* [12]

Dapat disimpulkan bahwa *square* dan *oriented square* memiliki nilai intensitas turbulensi yang lebih tinggi daripada *circular cylinder*. Hal ini dibuktikan dengan kontur pola *dimensionless vorticity* ( $\omega^*$ ) dan grafik *turbulent intensity* pada masing-masing *obstacle*. Disisi lain *oriented square* dan *square* memiliki *wake region* yang lebih besar dibanding *wake* pada *circular cylinder* sehingga menimbulkan *pressure drag* aliran yang lebih besar.

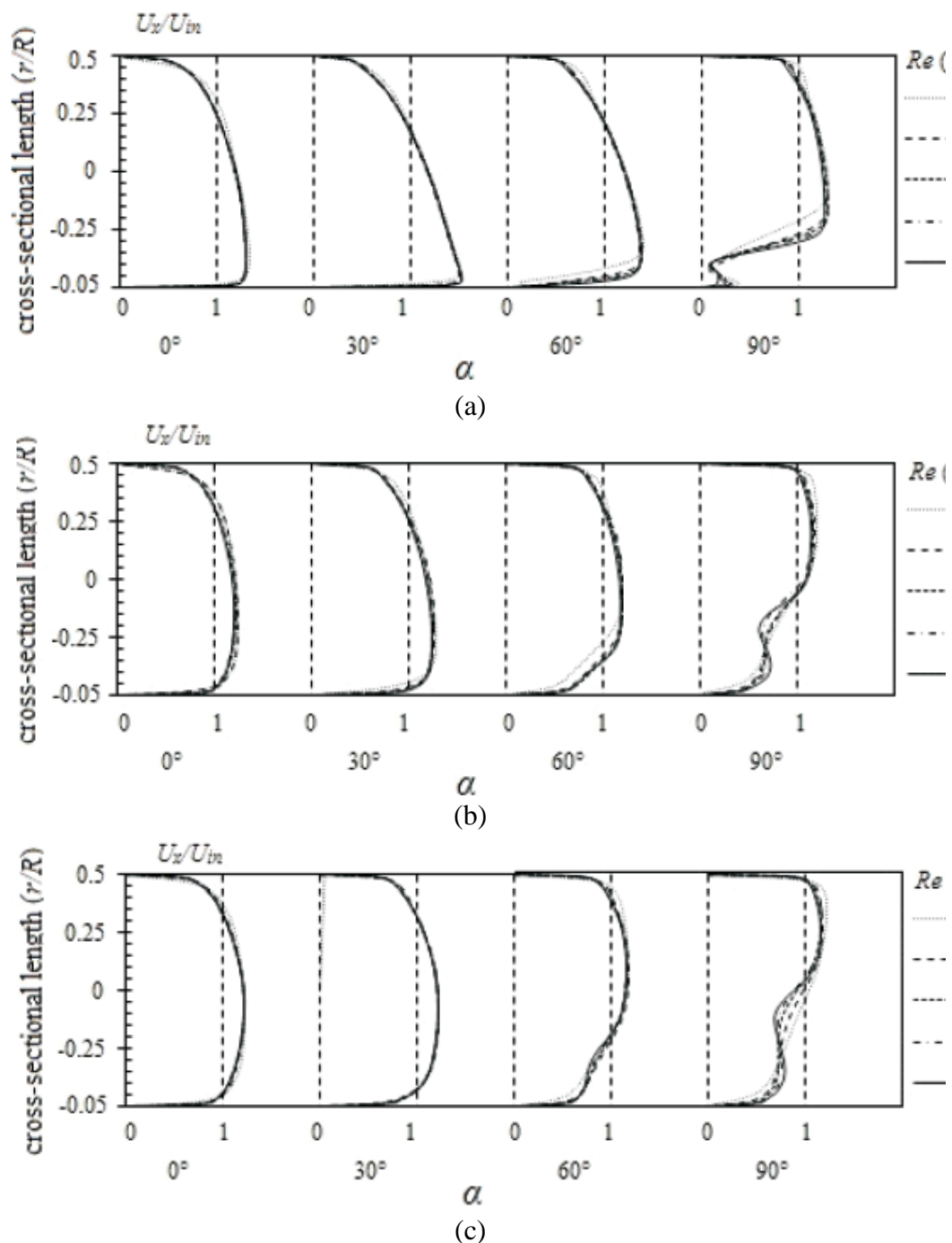
### 2.10.2 Pengaruh *Curvature Ratio* ( $R_m/D_h$ ) Pada Karakteristik Aliran yang Melintasi *Elbow 90°*

*Curvature ratio* ( $R_m/D_h$ ) suatu *elbow 90°* berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida yang melintas di dalamnya. Pengaruh yang diberikan oleh *curvature ratio* terhadap karakteristik aliran berupa timbulnya separasi aliran dan perbedaan *velocity profile* pada *downstream duct*.

Terdapat penelitian secara numerik yang mengamati karakteristik *wake* pada bagian *inner elbow 90°* akibat perubahan dari  $R_m/D_h$  [6]. Salah satu hasil dari penelitian tersebut berupa kontur kecepatan dan *pathline* dari suatu aliran yang melintasi *elbow 90°* dengan bilangan  $Re_{D_h} = 10^6$ . Pada gambar 2.11 dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $R_m/D_h$  maka semakin kecil *wake* yang terbentuk pada daerah *outer wall* dan *inner wall*.



Gambar 2. 11 Kontur dan *pathline* kecepatan yang melintasi *elbow 90°* pada  $Re_{D_h} = 10^6$  di berbagai ( $R_m/D_h$ ) : a)  $R_m/D_h = 0,5$ , b)  $R_m/D_h = 0,75$ , c)  $R_m/D_h = 1,5$  [6]



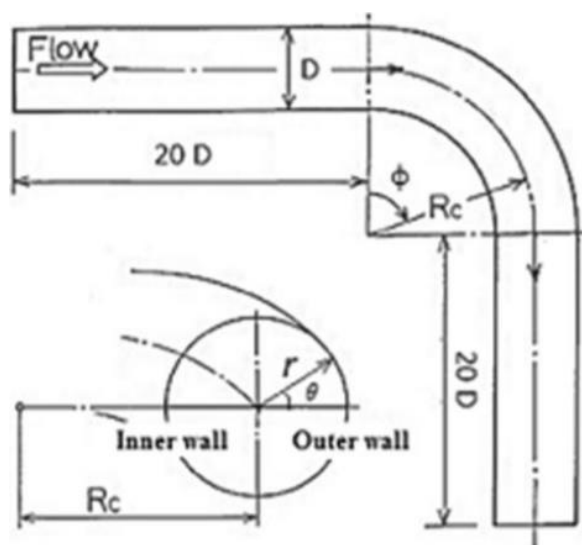
Gambar 2. 12 *Velocity Profile* di Sisi *Elbow*  $90^\circ$  dengan Variasi *Curvature Ratio* dan Bilangan Reynolds : a)  $R_m/D_h = 1$ , b)  $R_m/D_h = 2$ , c)  $R_m/D_h = 3$  [7]

Penelitian secara numerik juga telah dilakukan untuk menginvestigasi pengaruh *Curvature ratio elbow*  $90^\circ$  ( $R_m/D_h$ ) terhadap *velocity profile* yang terbentuk di sepanjang elbow  $90^\circ$  [7]. Nilai  $R_m/D_h$  yang divariasikan adalah 1,2 dan 3. Bilangan  $Re_{D_h}$  yang digunakan berkisar  $1-10 \times 10^5$ .

*Velocity profile* suatu aliran memiliki profil yang cenderung lebih penuh (*full*) apabila melintasi *elbow*  $90^\circ$  dengan  $R_m/D_h$  yang bernilai lebih besar jika dibandingkan dengan *Velocity profile* yang melintasi  $R_m/D_h$  yang lebih kecil. Hal ini dibuktikan dengan penelitian mengenai pengaruh  $R_m/D_h$  dari suatu *elbow*  $90^\circ$  terhadap profil kecepatan yang melintas di dalamnya [7]. Pada gambar 2.12 dapat dilihat dengan bilangan Reynolds yang sama *velocity profile* yang melintas pada *elbow*  $90^\circ$  dengan  $R_m/D_h$  yang lebih besar memiliki bentuk yang lebih penuh.

### 2.10.3 Karakteristik Aliran Sekunder yang Melintasi *Elbow* $90^\circ$

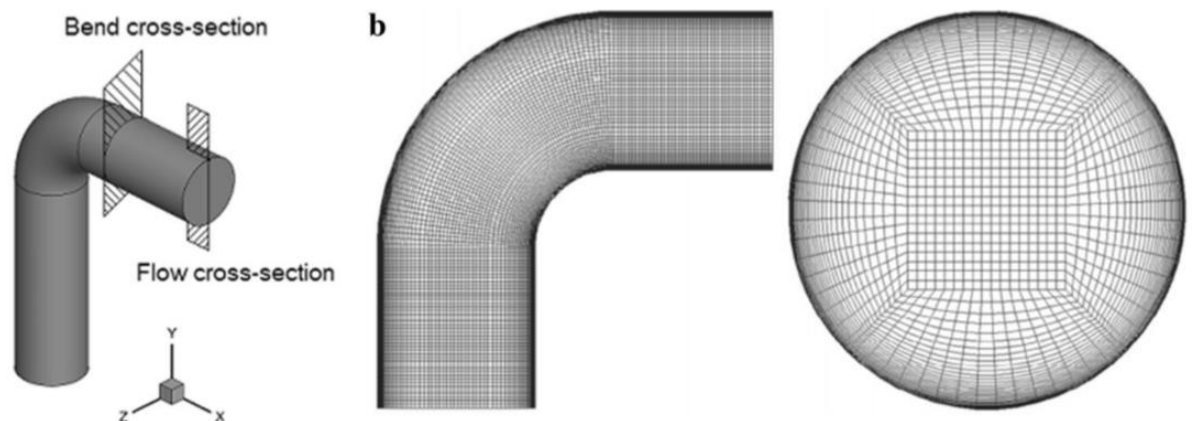
Adapun penelitian yang telah dilakukan secara numerik untuk mengidentifikasi *secondary flow* yang terbentuk akibat pengaruh *curvature ratio*. Salah satu penelitian yang memberikan informasi mengenai *secondary flow* yang terbentuk pada sisi *elbow*  $90^\circ$  menjelaskan pusat dari *secondary flow* yang terbentuk pada *circular duct*. Pada penelitian ini parameter yang divariasikan adalah  $R_m/D_h$  dan bilangan  $Re_{Dh}$  dengan objek penelitian berupa *circular pipe* yang terdiri dari *circular elbow*  $90^\circ$ , *upstream* dan *downstream*. Detail dari *duct* dapat dilihat pada Gambar 2.13. Terdapat tiga jenis  $R_m/D_h$  yang digunakan pada penelitian ini, *curvature ratio* tersebut bernilai 0.5, 0.75, dan 1.5. Bilangan Reynolds yang divariasikan pada penelitian ini bernilai  $1 \times 10^5$  hingga  $10 \times 10^5$ .



Gambar 2. 13 Skematik *Duct* [6]



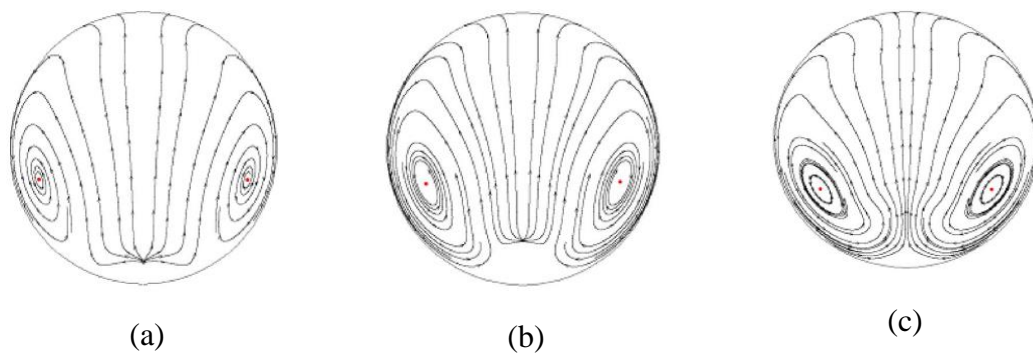
Mesh yang digunakan pada penelitian ini adalah *structured mesh* dengan bentuk segi empat, detail dari mesh dapat dilihat pada Gambar 2.14. Bentuk dari *structured mesh* dapat dilihat dari segi potongan pada bidang z dan pada bidang 'x'. DNS dan LES dipilih sebagai model turbulensi aliran. Hal ini dikarenakan DNS dan LES lebih akurat daripada Navier-Stokes (RANS) namun tipe ini membutuhkan waktu simulasi yang lebih lama. *Pressure-implicit with the splitting of operators* (PISO) digunakan untuk mendapatkan *pressure-velocity coupling*. *Second-order* digunakan untuk formulasi *transient* sedangkan *momentum spatial discretization* menggunakan *second order upwind*. Konvergensi kriteria untuk semua parameter bernilai  $10^{-5}$ . *Boundary condition* untuk *inlet* pipa berupa *velocity inlet* dengan nilai *turbulent intensity* ( $I = 0.16 \times Re_{Dh}^{-0.125}$ ). *Boundary Condition* untuk *outlet* pipa adalah *outflow*.



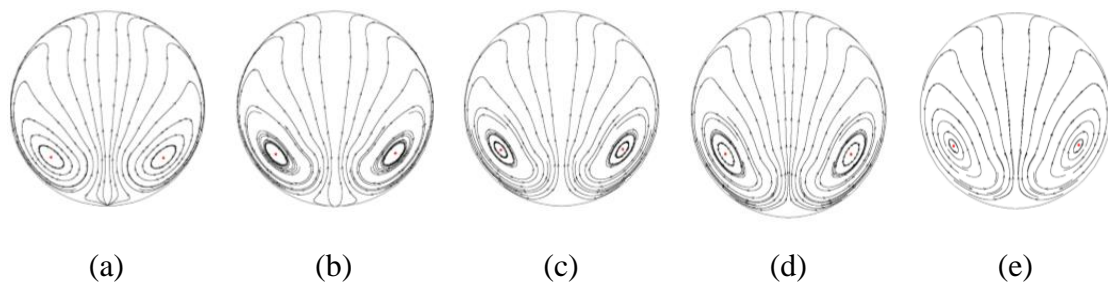
Gambar 2. 14 Konfigurasi *Mesh* [6]

Salah satu hasil dari penelitian adalah kontur aliran dari *secondary flow*. Perubahan struktur *secondary flow* terhadap perubahan  $R_m/D_h$  dapat dilihat pada Gambar 2.15. Proses pengamatan dan *vortices* dilakukan dengan cara menganalisis perubahan posisi dari pusat *secondary flow*. Posisi pusat *secondary flow* akan semakin menuju ke tengah pipa seiring berkurangnya *curvature ratio* dan berlaku sebaliknya. Hal ini dapat dikaitkan dengan titik separasi. Titik separasi akan terjadi lebih awal pada *curvature ratio* yang bernilai rendah sehingga *wake* yang terbentuk

pada outlet elbow  $90^\circ$  juga semakin membesar. *Wake* yang besar akan menyebabkan titik pusat *secondary flow* berada di dekat pusat *duct*. Hasil lain dari penelitian ini berupa perubahan struktur *secondary flow* akibat perubahan bilangan  $Re_{Dh}$ . Dapat dilihat pada Gambar 2.16, titik pusat dari *secondary flow* akan bergerak ke tengah *duct* seiring meningkatnya bilangan *Reynolds*. *Curvature ratio* ( $R_m/D_h$ ) dan bilangan *Reynolds* ( $Re_{Dh}$ ) memiliki pengaruh terhadap perubahan struktur *secondary flow*, namun  $R_m/D_h$  memiliki pengaruh yang lebih signifikan daripada bilangan  $Re_{Dh}$ .



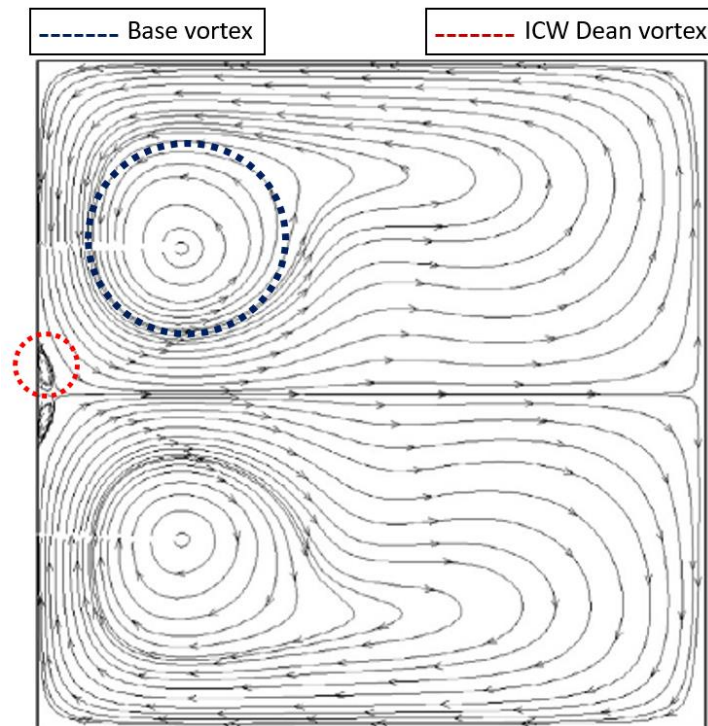
Gambar 2. 15 *Secondary Flow* Pada Posisi *Outlet Elbow*  $90^\circ$  ; a) ( $R_m/D_h$ ) = 0.75, b) ( $R_m/D_h$ ) = 1 dan c) ( $R_m/D_h$ ) = 1.5 [6]



Gambar 2. 16 *Secondary Flow* Pada Posisi *Outlet Elbow*  $90^\circ$  ; a)  $Re_{Dh} = 1 \times 10^5$ , b)  $Re_{Dh} = 3 \times 10^5$ , c)  $Re_{Dh} = 5 \times 10^5$ , d)  $Re_{Dh} = 7 \times 10^5$  dan e)  $Re_{Dh} = 10 \times 10^5$  [6]

Penelitian lain meneliti mengenai terbentuknya *secondary flow* pada *square duct* [23]. Pada penelitian tersebut lebih didetailkan mengenai klasifikasi *secondary flow*. Penelitian ini menggunakan  $R_m/D_h$  sebesar 1 dan bilangan

Reynolds sebesar  $1.4 \times 10^5$ . Gambar 2.17 menjelaskan tentang *base vortex* dan *split dean vortex*.



Gambar 2. 17 Klasifikasi *Secondary Flow* yang Terbentuk pada *Square Bend* ( $\theta = 120^\circ$ ) [23]

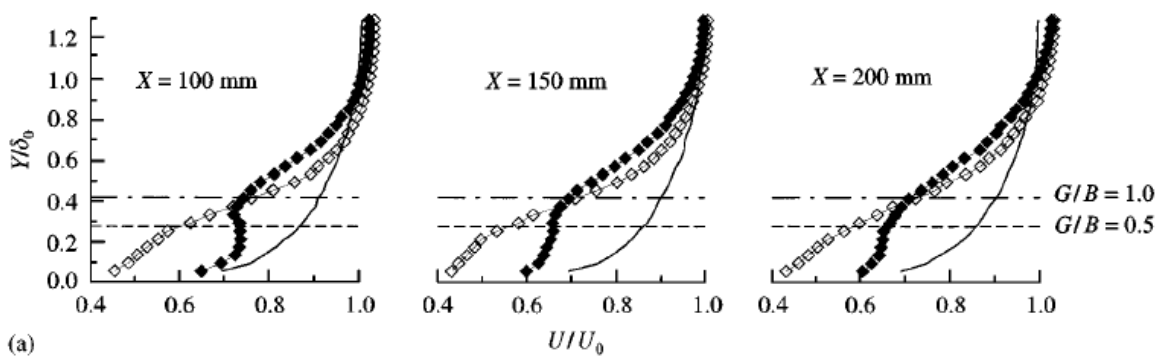
#### 2.10.4 Karakteristik Aliran Yang Melewati Sebuah Gap

Karakteristik aliran yang melewati suatu *gap* merupakan fenomena yang penting dan berkaitan dengan penelitian ini. Aliran yang melewati suatu *gap* akan mengalami perubahan nilai *velocity magnitude* dan *turbulent intensity*. Adapun perubahan tersebut dapat dimanfaatkan untuk mengurangi *pressure drop* pada suatu saluran. Kajian mengenai karakteristik tersebut telah diteliti. Salah satu hasil dari penelitian tersebut adalah *velocity profile* dan *turbulent intensity profile*[24][25].

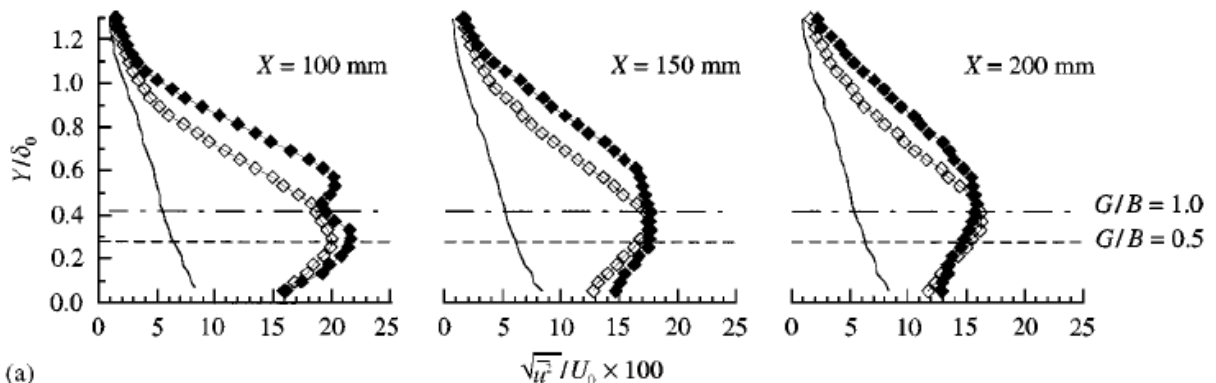
Gambar 2.18 menunjukkan *velocity profile* pada suatu saluran dengan variasi *gap ratio*. Profil tersebut berada pada posisi 150, 200 dan 250 dari *upstream*. Pada gambar tersebut juga menunjukkan posisi dari peletakan *circular cylinder*.

Berdasarkan gambar 2.18 dapat dilihat bahwa profil kecepatan dengan  $G/B = 1$  memiliki dua titik puncak. Dua titik puncak tersebut akan menghilang seiring aliran berjalan sepanjang saluran. Pembentukan dua puncak tersebut

dikarenakan adanya *wake* yang terbentuk pada bagian belakang *obstacle*. *Wake* tersebut memiliki karakteristik berupa kecepatan yang rendah. Pada variasi  $G/B = 0,5$  profil kecepatan di dekat dinding lebih rendah jika dibandingkan dengan variasi  $G/B = 1$  dan tanpa *circular cylinder*. Rendahnya kecepatan tersebut disebabkan oleh pemasangan *obstacle* yang semakin dekat dengan dinding sehingga menyebabkan semakin sedikit fluida yang mampu melewati celah tersebut.



Gambar 2. 18 *Velocity Profile* di Dekat Dinding [24]



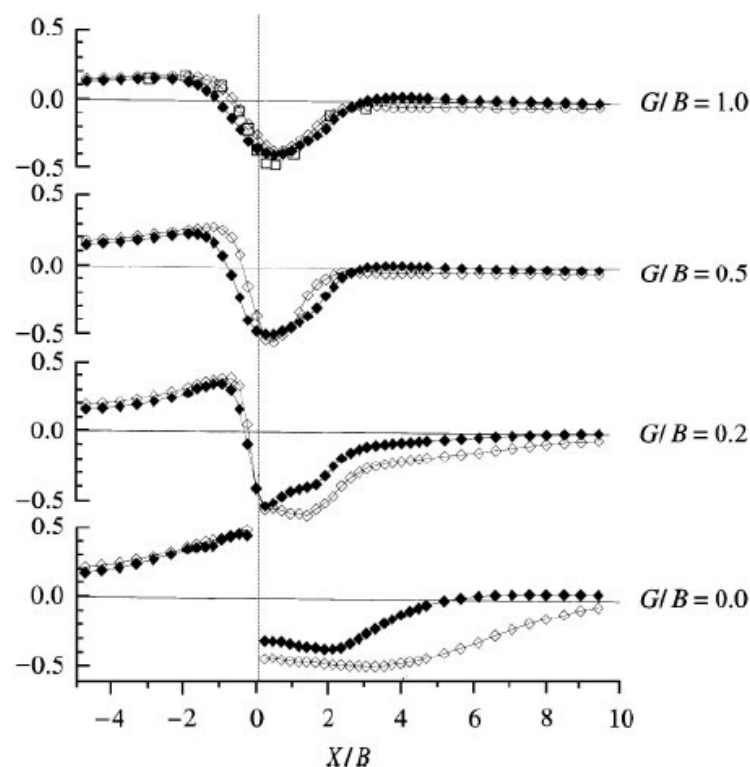
Gambar 2. 19 *Turbulent Intensity Profile* Di Dekat Dinding [24]

Profil turbulent intensity sepanjang aliran ditunjukkan pada Gambar 2.19. Penempatan *obstacle* yang berada di dekat dinding mampu memberikan peningkatan intensitas turbulensi pada aliran. Hal ini diindikasikan dengan meningkatnya profil intensitas turbulensi aliran pada variasi  $G/B=1$  dan  $G/B=0.5$ .

Pada variasi  $G/B = 1$  *positif shear layer* masih mampu bergerak secara mengguling ke arah atas sehingga profil turbulent intensity tersebut jauh lebih *fuller*. Pada variasi  $G/B = 0.5$  potensi *positif shear layer* untuk mengguling ke-arah atas sudah berkurang. Semakin kecil nilai  $G/B$  akan menyebabkan semakin besar peningkatan *turbulent intensity* di sisi *inner wall*.

Karakteristik tekanan di sepanjang dinding saluran juga menjadi fenomena yang perlu diketahui. Distribusi tekanan di sepanjang dinding saluran disajikan pada Gambar 2.20. Pada variasi  $G/B = 0$  dapat dilihat bahwa adanya kenaikan tekanan pada daerah *upstream*. Kenaikan tekanan tersebut disebabkan oleh aliran yang bertumbukan langsung pada *cylinder circular*, tumbukan tersebut menyebabkan tingginya tekanan di daerah *upstream*. Seiring meningkatnya nilai  $G/B$  maka kenaikan tekanan di sisi *upstream* semakin menurun dan semakin bergerak ke arah depan.

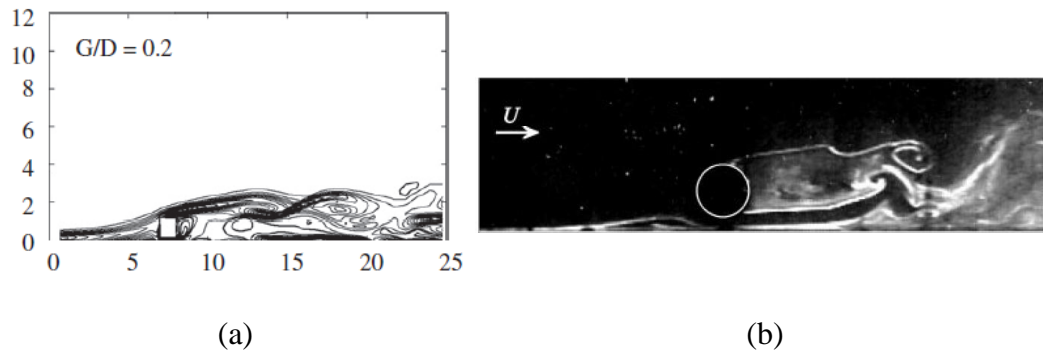
Aliran yang melewati celah akan mengalami peningkatan kecepatan secara signifikan. Peningkatan kecepatan tersebut juga menyebabkan terjadinya penurunan tekanan yang signifikan. Penurunan tekanan tersebut terjadi pada  $G/B = 0$ . Tekanan akan kembali naik seiring fluida bergerak ke arah *downstream*. Fenomena ini akan semakin hilang jika  $G/B$  ditingkatkan.



Gambar 2. 20 Profil *pressure coefficient* pada dinding bawah [24]

Fenomena terbentuknya vortex akan semakin jelas dengan data kualitatif berupa *pathline* kecepatan aliran. Fenomena tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.21. Berdasarkan *pathline* aliran tersebut dapat dilihat bahwa adanya fenomena

terbentuknya *vortex* pada dinding upstream saat *obstacle* diletakkan pada  $G/B=0.2$ . pada Gambar 2.21 (a) dan (b) menunjukkan adanya *vortex* yang terbentuk pada bagian *upstream*.



Gambar 2. 21 Pathline aliran pada  $G/B = 0.2$  : a) *rectangular cylinder obstacle* , b) *circular cylinder obstacle* [25] [26]

### 2.10.5 Pengaruh Turbulent intensity pada karakteristik aliran

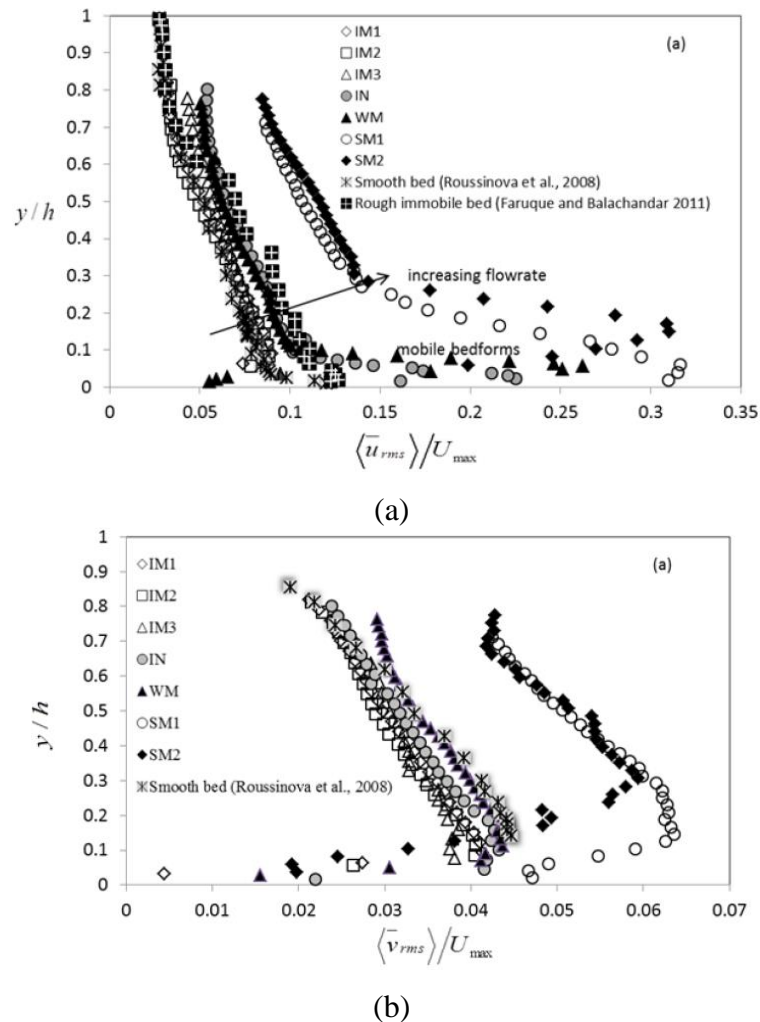
Penggunaan *obstacle* tentunya memberikan pengaruh terhadap turbulent intensity aliran. Turbulent intensity merupakan suatu parameter *dimensionless* yang menyatakan ratio dari *fluctuating component* dengan kecepatan rata-rata. Salah satu penelitian menjelaskan mengenai pengaruh turbulent intensity dengan melakukan eksperimen mengenai variasi kekasaran permukaan. Variasi kekasaran permukaan dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. 5 data eksperimen dan jenis *bed* [27]

Runs	Bed condition	$U_{max}$ (m/s)	Reynolds number $Re$	Froude number $F_r$	Friction velocity $(u_{*1})^*$ (m/s)	Friction velocity $(u_{*2})^{**}$ (m/s)	$\kappa$	$R_x$	$\delta$ (m)
IM1	Immobile	0.240	16696	0.24	0.0137	0.0100	0.41	30435	0.0586
IM2	Immobile	0.262	18226	0.27	0.0153	0.0105	0.40	31957	0.0580
IM3	Immobile	0.276	19200	0.28	0.0157	0.0110	0.42	33478	0.0600
IN	Incipient motion	0.31	21565	0.30	0.0169	0.0140	0.35	43041	0.0543
WM	Weak bed movement (minor bedforms)	0.345	24000	0.34	0.0172	0.0163	0.33	52715	0.0560
SM1	Mobile bedforms	0.384	26713	0.37	0.0246	0.0245	0.26	74550	0.0632
SM2	Mobile bedforms	0.398	27687	0.38	0.0270	0.0247	0.27	76087	0.0703

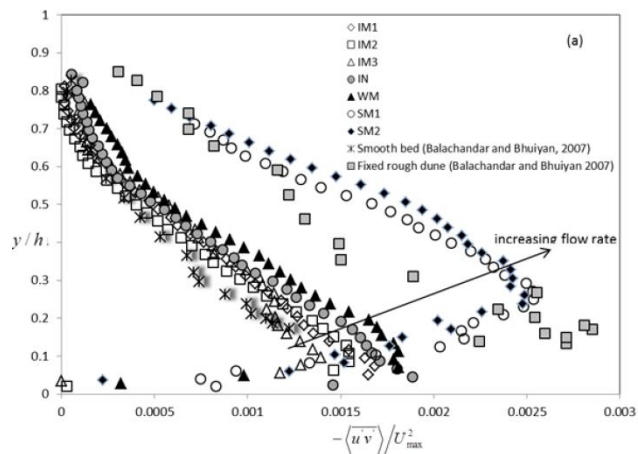
*Turbulent intensity profile* ditampilkan dengan variasi jenis *bed*, profil tersebut dapat dilihat pada gambar. Dapat dilihat bahwa SM2 dan SM1 memberikan pengaruh paling signifikan berupa peningkatan turbulent intensity paling besar.

Peningkatan turbulent intensity tersebut memiliki pengaruh terhadap peningkatan Reynolds *stress* yang dapat dilihat pada Gambar 2.22.



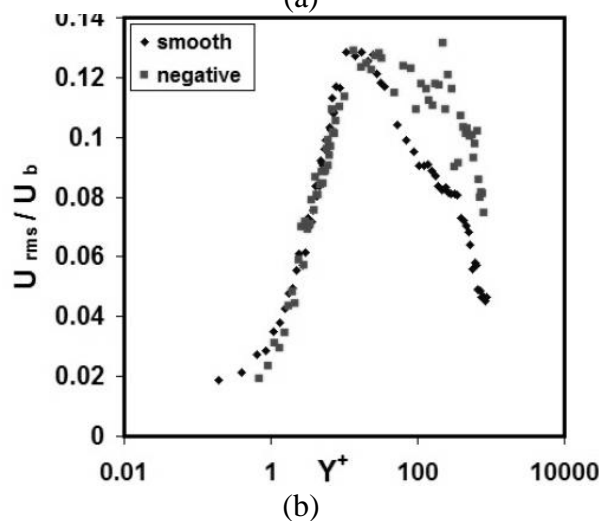
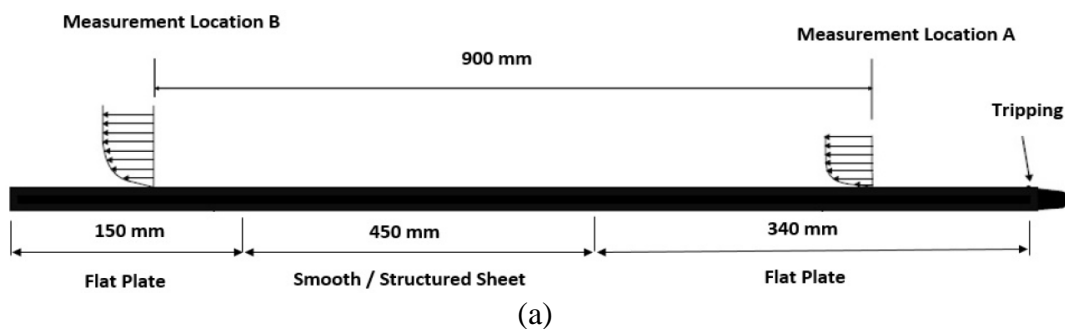
Gambar 2. 22 turbulent intensity ; a)  $Ti_{(u)}$  dan b)  $Ti_{(v)}$  [27]

Peningkatan turbulent intensity tersebut dihubungkan dengan profil Reynolds *Stress*. Berdasarkan Gambar 2.23, Dapat dilihat bahwa profil Reynolds *stress* memiliki bentuk yang hamper sama dengan profil turbulent intensity, sehingga dapat disimpulkan bahwa peningkatan trubulent intensity dapat meningkatkan Reynolds *stress*.



Gambar 2. 23 Profil Reynolds stress [27]

Adapun penelitian yang menunjukkan grafik intensitas turbulensi semi logarithmic pada suatu rectangular duct dengan  $Re_{Dh} = 18000$  dengan penambahan tripping rods di sisi depan aliran. Detail skema eksperimen dapat dilihat pada gambar. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa peningkatan intensitas turbulensi aliran maksimal berada pada kisaran  $Y^+ = 30-100$ .

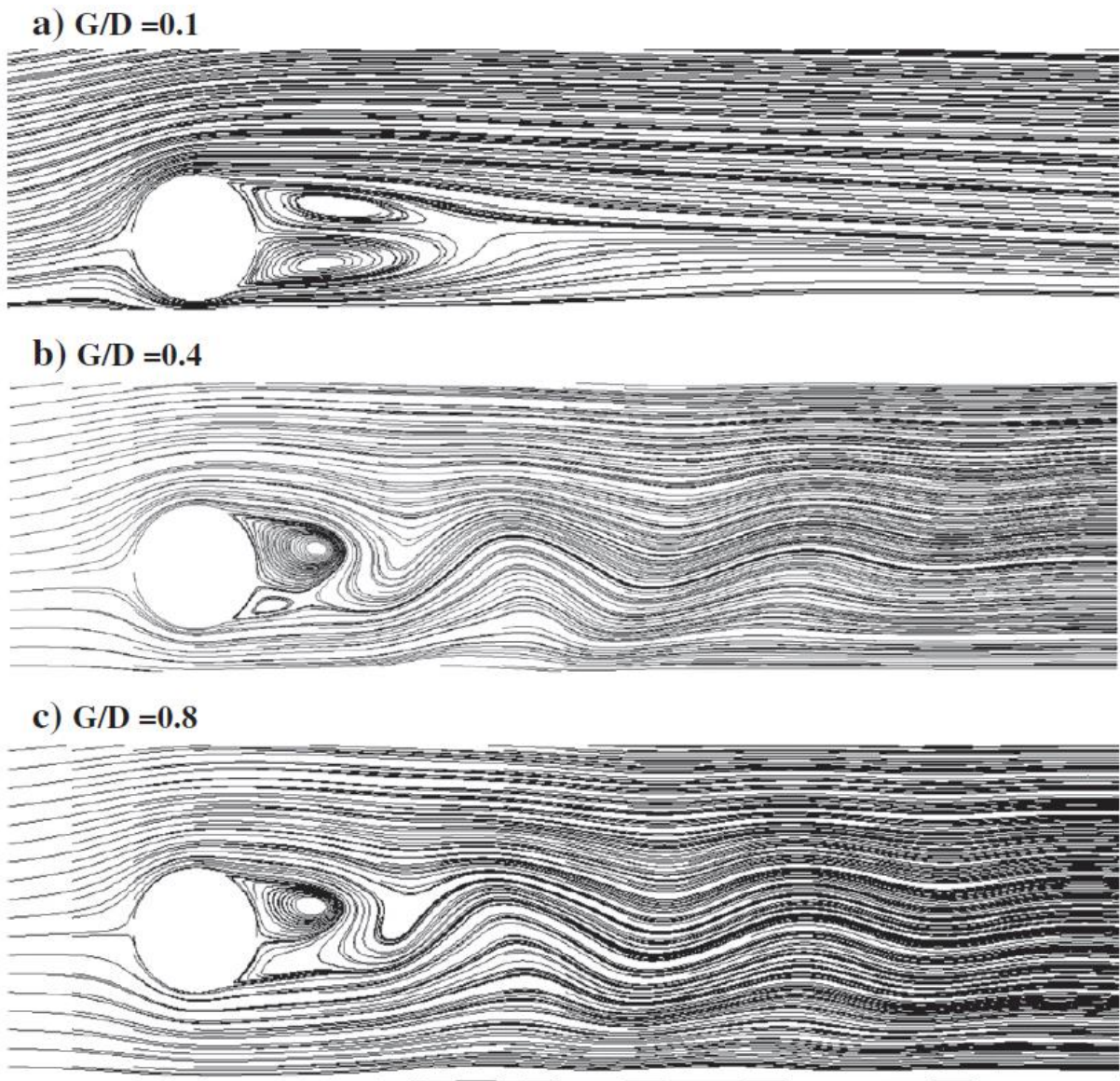


Gambar 2. 24 a) skema pengukuran b) intensitas turbulensi aliran pada posisi B [28]



### **2.10.6 Karakteristi wake yang terbentuk pada cylinder yang didekatkan dengan permukaan dinding datar**

*Wake* yang terbentuk dibelakang obstacle yang didekatkan dengan permukaan dinding memiliki karakteristik yang berbeda dengan wake yang terbentuk dibelakang cylinder yang diletakkan pada tengah penampang. Untuk memahami hal tersebut dapat dilihat gambar 2.25 yang menunjukkan wake yang terbentuk dibelakang *cylinder*. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa *vortex shedding* yang saling memotong atau disebut karman vortex pada  $g/d$  yang bernilai besar tidak terlihat pada variasi  $G/D = 0.1$ . Interaksi antara *negative shear layer* dengan *boundary layer* menyebabkan tidak ada pemotongan antara *negative shear layer* dengan *positif shear layer*. Tidak adanya perpotongan tersebut menyebabkan vortex dibelakang wake semakin memanjang.

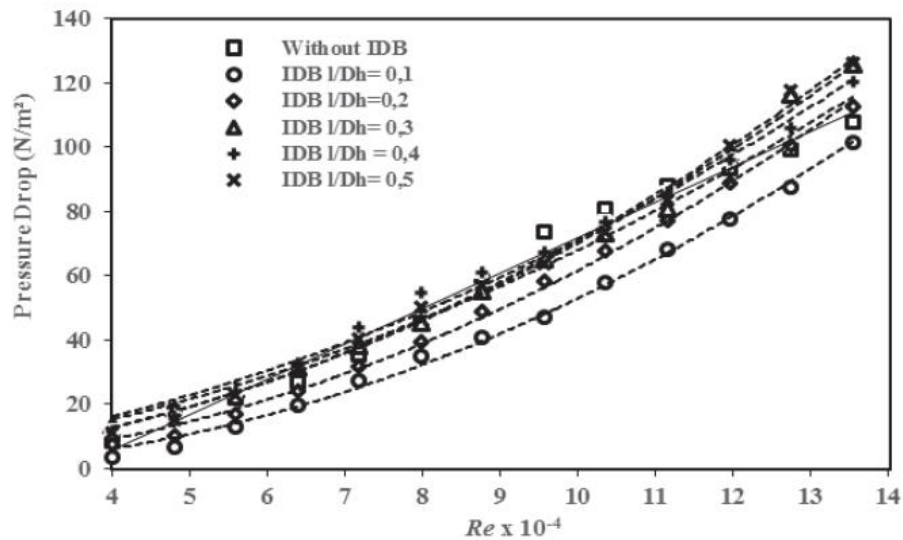


Gambar 2. 25 *streamlines* disekitar *circular cylinder* dengan variasi *gap ratio* [29]

### 2.10.7 Penggunaan *Obstacle* Sebagai Media Pasif *Boundary Layer Control*

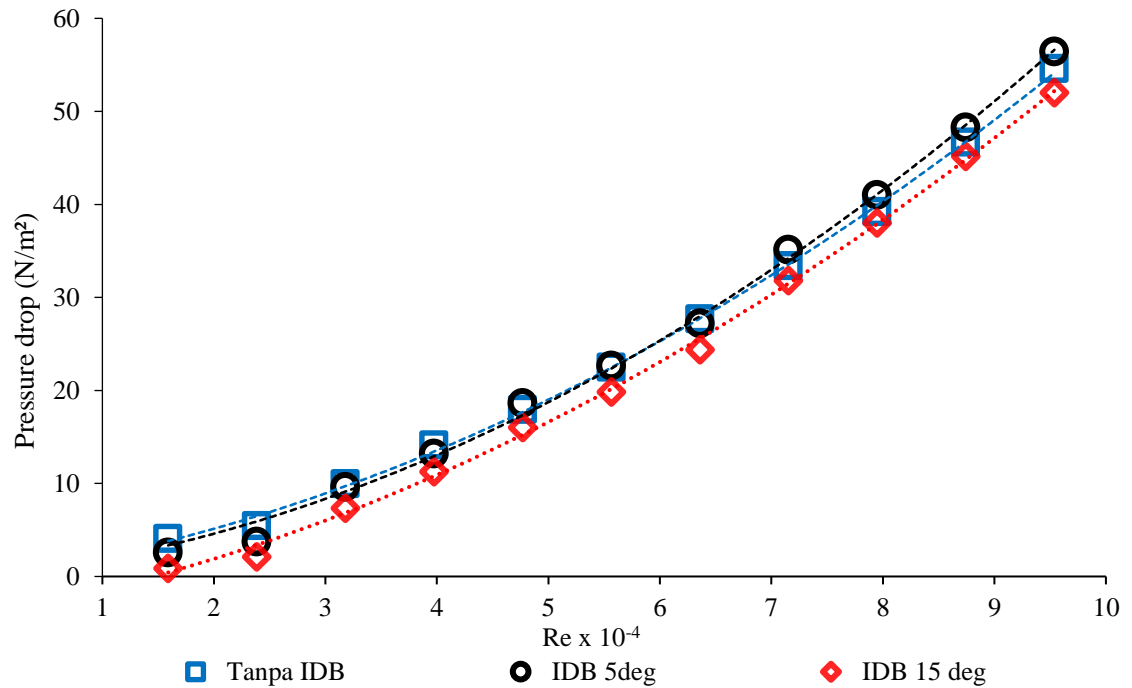
Penggunaan *obstacle* sebagai media untuk mengurangi *pressure drop* pada instalasi *duct* telah diteliti [22]. Pada penelitian tersebut *curvature ratio* dari *elbow*  $90^\circ$  yang digunakan adalah 1.5 dengan variasi bilangan Reynolds  $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.4 \times 10^4$ . *Obstacle* akan diletakan pada bagian *upstream duct* dengan variasi posisi  $l/D_h = 0.1-0.5$  dan *gap ratio* ( $g/d = 0.2$ ). Detail dari objek penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.24.





Gambar 2. 27 *Pressure Drop* Pada *Duct* dengan Bilangan Reynolds ( $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$ ) [22]

Salah satu penelitian yang telah dilakukan juga menganalisa pengaruh penggunaan *obstacle* yang diletakkan di dekat *inner wall elbow 90°*. Adapun hasil dari penelitian tersebut berupa grafik *pressure drop* yang dapat dilihat pada gambar. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa adanya penurunan *pressure drop* pada Reynolds number sebesar  $1.5 \times 10^4$  hingga  $5 \times 10^4$  untuk variasi  $\alpha = 5^\circ$  hingga  $\alpha = 15^\circ$ . Pada Reynolds number sebesar  $6 \times 10^4$  hingga  $10 \times 10^4$  terdapat perbedaan hasil untuk  $\alpha = 5^\circ$  dan  $\alpha = 15^\circ$ . Penempatan *obstacle* pada  $\alpha = 15^\circ$  masih mampu menurunkan nilai *pressure drop* namun *obstacle* yang diletakkan  $\alpha = 5^\circ$  memberikan efek berupa kenaikan *pressure drop* jika dibanding dengan *pressure drop* tanpa *obstacle*. Hal ini menunjukkan bahwa keefektifitas dari *obstacle* berada pada kisaran Reynolds number  $1.5 \times 10^4$  hingga  $5 \times 10^4$  (2 m/s hingga 6 m/s)



Gambar 2. 28 *Pressure Drop Overall* [28]

Penggunaan *obstacle* berupa *circular cylinder* yang diletakan di dalam *elbow 90°* dengan  $g/d$  sebesar 0.2 juga telah dilakukan. Penelitian tersebut dilakukan secara numerik dan eksperimen dengan variasi berupa  $\alpha$ . Terdapat tiga bilangan  $Re_{Dh}$  yang digunakan pada penelitian tersebut, nilai bilangan  $Re_{Dh}$  adalah  $1.6 \times 10^4$ ,  $4.8 \times 10^4$  dan  $9.5 \times 10^4$ . Salah satu hasil dari penelitian tersebut adalah nilai *pressure drop* pada tiap variasi  $\alpha$  dan  $Re_{Dh}$  yang ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 nilai *pressure drop* pada tiap variasi  $\alpha$  dan  $Re_{Dh}$  [29]

$Re_{Dh}$	Model	Pressure Drop			
		Overall	Upstream Duct	90° elbow	Downstream Duct
$1.6 \times 10^4$	$\alpha = 5^\circ$	11.76 (↓)	32.35 (↓)	116.00 (↑)	40.00 (↓)
	$\alpha = 10^\circ$	4.90 (↓)	12.75 (↓)	80.00 (↑)	27.74 (↓)
	$\alpha = 15^\circ$	12.09 (↓)	24.51 (↓)	94.00 (↑)	38.71 (↓)
	$\alpha = 20^\circ$	8.50 (↓)	14.71 (↓)	76.00 (↑)	32.90 (↓)
$4.8 \times 10^4$	$\alpha = 5^\circ$	39.57 (↑)	14.64 (↓)	158.76 (↑)	37.07 (↑)
	$\alpha = 10^\circ$	19.74 (↓)	16.85 (↓)	82.49 (↑)	52.30 (↓)
	$\alpha = 15^\circ$	22.14 (↓)	29.42 (↓)	103.67 (↑)	55.61 (↓)
	$\alpha = 20^\circ$	16.77 (↓)	16.71 (↓)	62.15 (↑)	40.56 (↓)
$9.5 \times 10^4$	$\alpha = 5^\circ$	91.72 (↑)	14.33 (↑)	342.16 (↑)	73.99 (↑)
	$\alpha = 10^\circ$	12.50 (↑)	11.19 (↑)	201.29 (↑)	39.23 (↓)
	$\alpha = 15^\circ$	11.15 (↑)	5.75 (↓)	223.65 (↑)	36.58 (↓)
	$\alpha = 20^\circ$	23.12 (↑)	12.63 (↑)	159.90 (↑)	7.95 (↓)

Note: (↑) upward arrow vertically indicate increasing pressure drop, otherwise (↓) downward arrow indicate pressure drop reduction

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

Pada bab ini dibahas metode penelitian yang digunakan untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Studi numerik dengan menggunakan Ansys Fluent 18.2 dipilih untuk menganalisis karakteristik aliran fluida tiga dimensi di dalam *square duct* dengan  $R_m/D_h = 3$ .

Berikut metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### **Studi literatur :**

Proses mempelajari beberapa literatur yang terkait dengan objek penelitian. Literatur yang digunakan berupa artikel ilmiah, jurnal, *text book*, serta hasil penelitian yang terkait.

#### **Simulasi :**

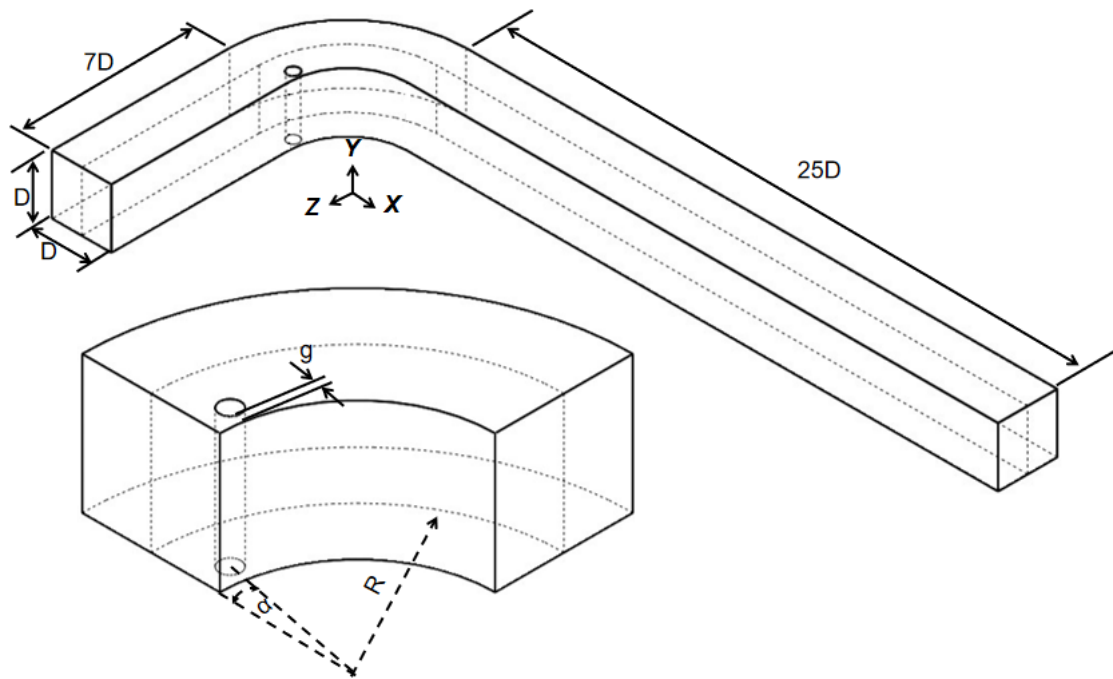
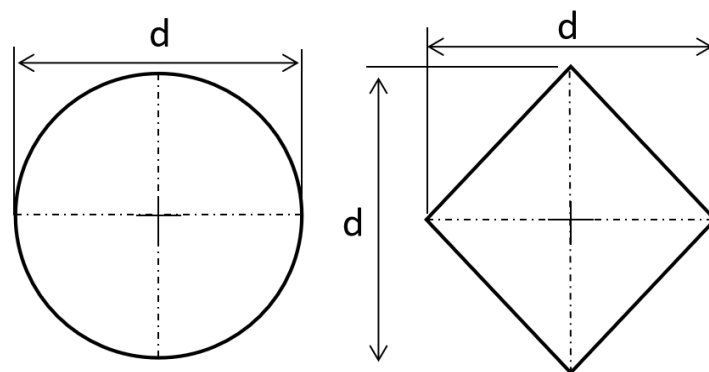
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui adanya fenomena aliran tiga dimensi (*3D*) sesudah melewati *square elbow*  $90^\circ$  dengan penambahan *obstacle* pada  $g/d$  sebesar 0.2 dengan ( $\alpha = 4^\circ, 8^\circ, \text{ dan } 12^\circ$ ) dan bilangan Reynolds pada rentang  $0.7 \times 10^4$  hingga  $4 \times 10^4$ . Pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Simulasi akan divalidasi dengan data eksperimen yang didapatkan dari praktikum pada lab mekanika fluida.

#### **Penyusunan laporan :**

Laporan ini tersusun atas pendahuluan, tinjauan pustaka, dan metodologi penelitian.

### **3.1 Geometri *Ducting* dan *Obstacle*.**

*Ducting* yang dijadikan objek penelitian memiliki betuk penampang berupa *square*. *Ducting* tersebut terdiri dari tiga bagian yaitu *upstream*, *elbow*  $90^\circ$  dan *downstream*. *Obstacle* diletakkan pada bagian *elbow*  $90^\circ$  tepatnya di dekat dinding dalam dengan *angular position* tertentu ( $4^\circ, 8^\circ$  dan  $12^\circ$ ). Detail dari *ducting* dapat dilihat pada gambar 3.1 dan 3.2:

Gambar 3. 1 Skema dan Detail *Square Duct*Gambar 3. 2 Skema *Obstacle*

Spesifikasi *ducting* sebagai berikut :

- Diameter *hydraulic duct* ( $D$ ) : 125 mm
- Curvature ratio ( $R_m/D_h$ ) : 3
- Sudut angular ( $\alpha$ ) :  $4^\circ, 8^\circ$ , dan  $12^\circ$
- Gap ratio ( $g/d$ ) : 0.2
- Diameter *obstacle* ( $d$ ) : 12.5 mm

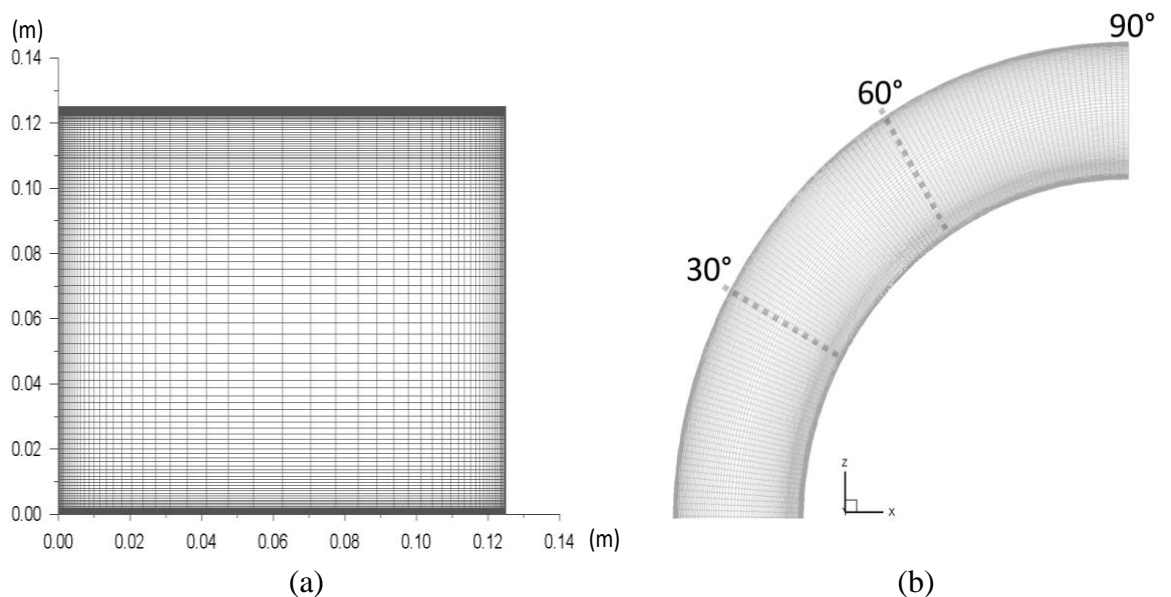


### 3.2 Metode Numerik

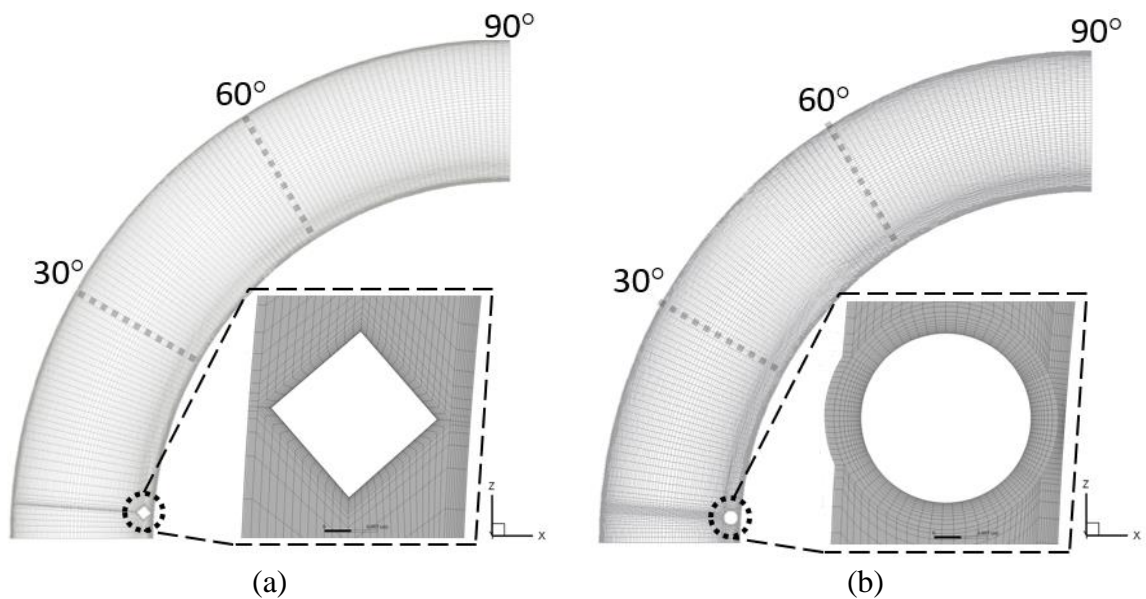
Pendekatan Numerik, model numerik dan diskritisasi (*meshing*) digunakan piranti lunak komputasi fluida. Urutan kerja pada penelitian numerik ini dibagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap *pre-processing*, *processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

#### 3.2.1 Tahap Pre-Processing

- a) Pembuatan model *3D* yang mengacu pada geometri Gambar 3.1. Model *ducting* dibuat dengan variasi *angular position* ( $\alpha$ ) dari *obstacle* dan bentuk *obstacle*. Pembuatan geometri dan *mesh* serta penentuan *boundary condition* dilakukan pada program *gambit*.
- b) Pembuatan *meshing* dilakukan untuk tiap variasi. *Meshing* volume yang digunakan adalah tipe *hexahedral-map*. Metode *meshing* yang digunakan adalah sistem *grading* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada sisi dekat dinding serta rapat pada sisi pengganggu. Contoh hasil dari *meshing* pada *square duct* tanpa *obstacle*, *square duct* dengan OSC ( $\alpha = 4^\circ$ ) dan CC ( $\alpha = 4^\circ$ ) diilustrasikan pada Gambar 3.3 dan 3.4.



Gambar 3. 3 Meshing square Duct a) Cross Sectional Mesh, b) Square Mesh



Gambar 3. 4 a) *Square Elbow 90<sup>o</sup>* dengan OSC *Obstacle Mesh*, b) *Square Elbow 90<sup>o</sup>* dengan CC *Obstacle Mesh*

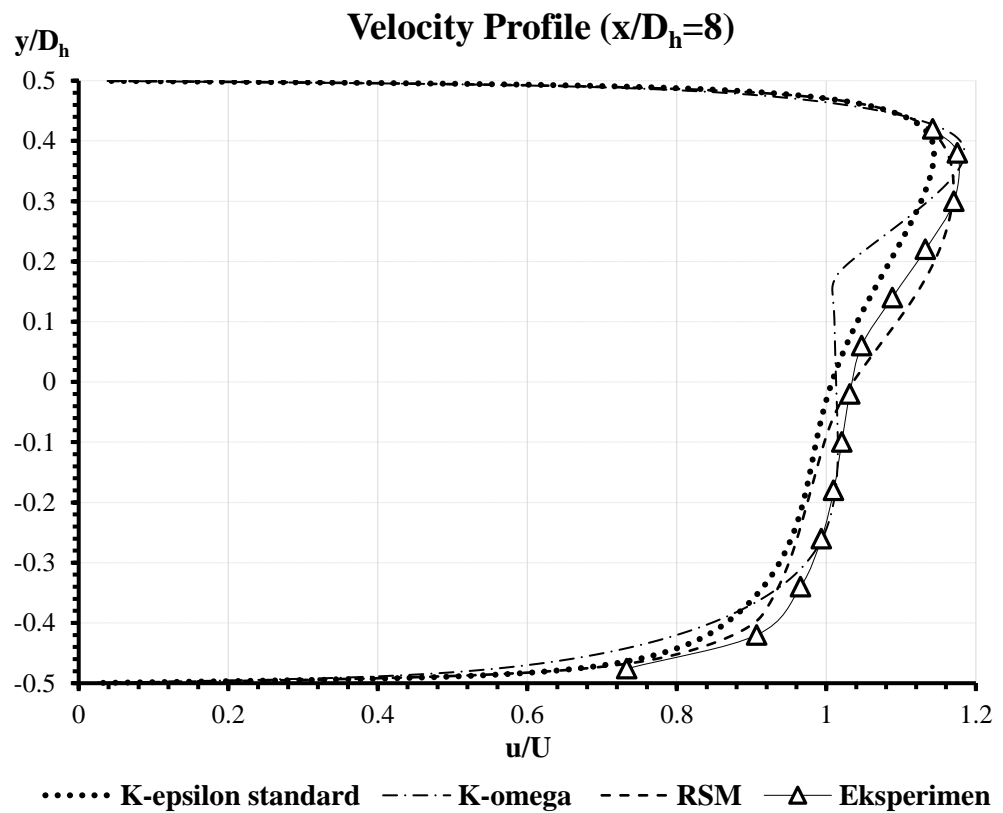
### 3.2.2 Tahap Processing

#### a) *Scale* dan pengecekan kondisi batas

Penentuan dan pengecekan dimensi pada program Fluent merupakan langkah pertama yang harus dilakukan. Hal ini berfungsi untuk memastikan pembuatan dimensi pada program Gambit sudah sesuai dengan program Fluent. Pengecekan kondisi batas juga diperlukan untuk menghindari terjadinya kesalahan pemilihan bidang sebagai kondisi batas tertentu.

#### b) *Models*

Pemilihan model turbulensi didasarkan oleh penelitian terdahulu. Selain berdasarkan penelitian terdahulu, telah dilakukan perbandingan hasil simulasi dengan menggunakan beberapa model turbulensi. Model turbulensi aliran yang dipergunakan adalah K-epsilon standard [6][21][30], K-omega [23][31] dan RSM [32]. *Velocity profile* pada  $x/D_h = 8$  untuk setiap variasi turbulensi dibandingkan dengan data eksperimen. Data tersebut ditampilkan pada Gambar 3.5. Berdasarkan gambar tersebut diketahui bahwa RSM memiliki *velocity profile* yang paling mendekati dengan hasil eksperimen.



Gambar 3. 5 Grafik *velocity profile* pada *outlet elbow*  $90^\circ$  dengan Variasi Model Turbulensi untuk  $Re_{Dh} = 1 \times 10^5$

c) *Materials*

Data *properties* material fluida yaitu udara pada temperatur ruangan  $T = 28^\circ\text{C}$  dengan *density* ( $\rho$ )  $1,178\text{ kg/m}^3$  dan viskositas absolut ( $\mu$ )  $1.84 \times 10^{-5}\text{ N.s/m}^2$ .

d) *Operating conditions*

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

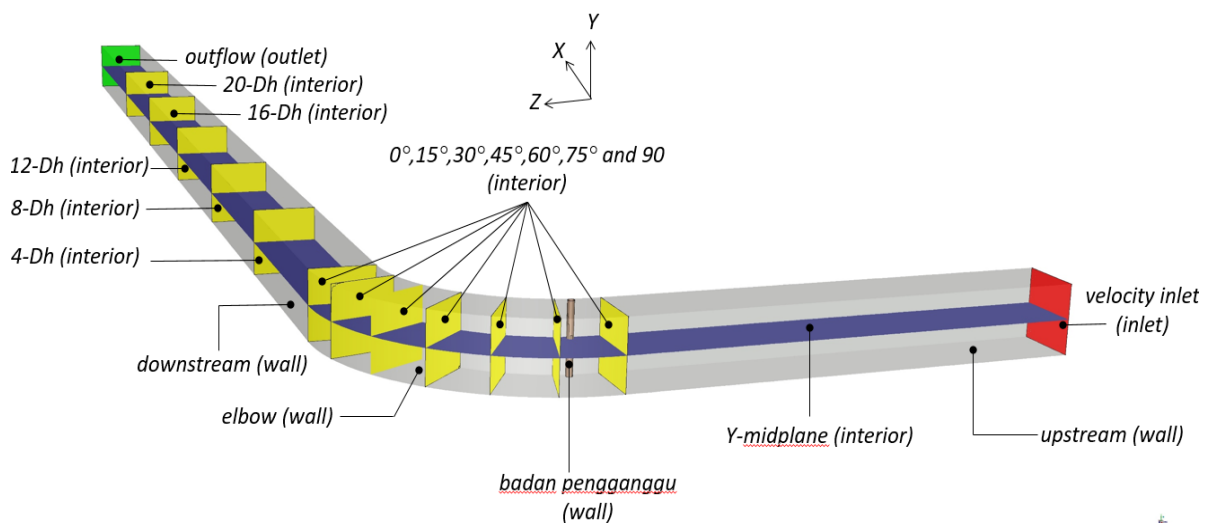
e) *Boundary conditions*

Menentukan nilai parameter dari suatu kondisi batas pada aliran yang melewati benda uji. Sisi *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dalam (m/s) dengan variasi *velocity* sebesar 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s, 3 m/s, dan 5

m/s. Ditambahkan spesifikasi *turbulent intensity* dan diameter *hydraulic* untuk meningkatkan keakuratan simulasi. *Turbulence intensity* untuk masing-masing kecepatan pada sisi *inlet* yaitu 5.2 %, 4.94 %, 4.77 %, 4.5 %, dan 4.2 % sedangkan nilai *hydraulic diameter* sebesar 125 mm. Sisi *outlet* didefinisikan sebagai *outflow* sedangkan dinding *duct* dan *Obstacle* didefinisikan *Wall*. Domain simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.6.

#### f) *Solution*

*Solution* pada penelitian ini akan menggunakan metode *SIMPLE* (*Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) [30][33] serta *discretization* berupa *second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate* [6].



Gambar 3. 6 *Boundary Condition Square Duct* Pada Simulasi

#### g) *Initialize*

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

#### h) *Monitor residual*

Harga kriteria konvergensi ditentukan sebagai tolak ukur tingkat keakuratan. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar  $1 \times 10^{-5}$  untuk *continuity*, *x-velocity*, *y-velocity*, *z-velocity*, *k*,  $\epsilon$ , *uu-stress*, *vv-stress*, *ww-stress*, *uv-stress*, *vw-stress* dan *uw-stress*. Proses iterasi dinyatakan telah *convergen* setelah residualnya mencapai nilai yang telah ditentukan.

i) *Iterate*

Langkah selanjutnya setelah penetapan harga *monitor residual* adalah *iteration*. *Iteration* merupakan langkah perhitungan pada program Fluent 18.2. *Iteration* akan secara otomatis berhenti apabila semua nilai residualnya mencapai nilai telah ditentukan dapat dikatakan iterasi sudah *convergen*. Apabila tidak tercapai kriteria *convergen* maka dilakukan tahapan untuk memperbaiki *meshing*.

### 3.2.3 Tahap *Post-processing*

*Post-processing* merupakan tahapan penampilan hasil simulasi. Hasil simulasi berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa distribusi nilai *TI*, *velocity profile*,  $C_p$ , *skin friction* dan *pressure drop* sedangkan data kualitatif berupa penampilan kontur kecepatan dan turbulent intensity pada setiap *cross section*. Pada tiap posisi pengambilan data terdapat keterangan mengenai jenis data yang akan diintresprestasikan untuk mengamati karakteristik aliran. Keterangan mengenai jenis data yang akan didapatkan dapat dilihat pada Tabel 3.1. Posisi pengambilan data ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan 3.8.

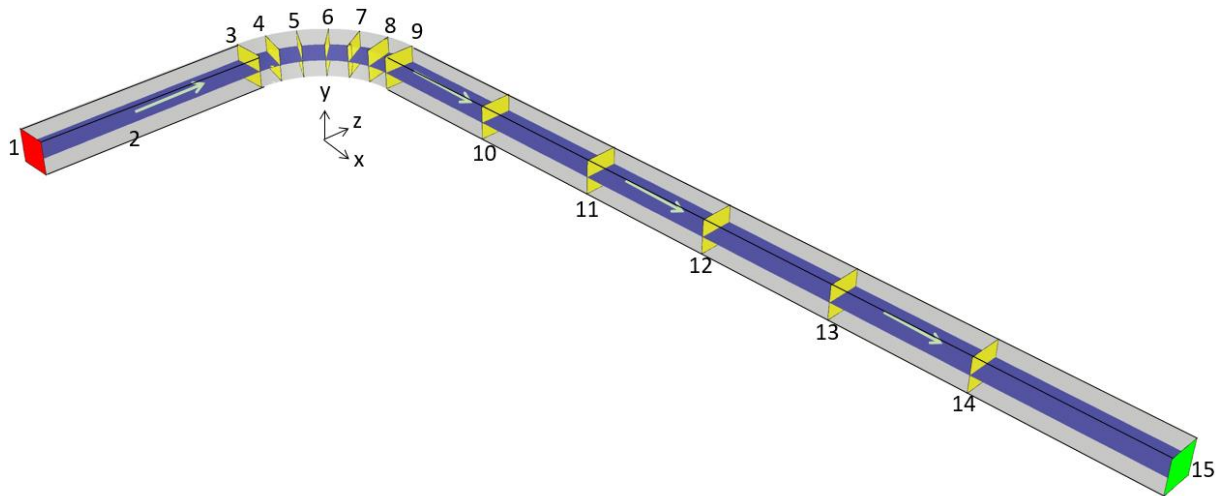
Nilai *pressure drop* pada daerah *upstream*, *elbow 90<sup>0</sup>*, *downstream* dan *overall* ditampilkan dalam bentuk grafik dengan variasi  $\alpha$  dan bilangan  $Re_{Dh}$ . Data *pressure drop* akan ditampilkan dalam bentuk dimensionless ( $\Delta P/\Delta P_0$ ).  $\Delta P$  menunjukkan *pressure drop* dengan obstacle sedangkan  $\Delta P_0$  menunjukkan *pressure drop pada duct* tanpa obstacle. Grafik tersebut dapat menunjukkan kenaikan atau penurunan nilai *pressure drop* pada saluran tanpa *obstacle* sehingga dapat diketahui variasi  $\alpha$  dan  $Re_{Dh}$  yang optimal [30].

Pengaruh *obstacle* terhadap *TI* dapat ditunjukkan oleh kontur *turbulent intensity*. Kontur *turbulent intensity* yang di ambil pada *elbow 90<sup>0</sup>* dan *downstream*

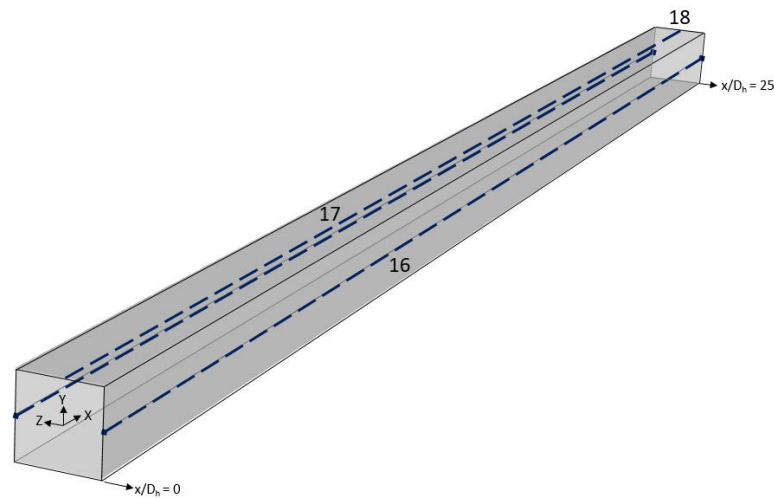
berfungsi untuk mengetahui seberapa besar peningkatan  $TI$  pada bagian  $elbow\ 90^0$  dan  $downstream$  terhadap pemasangan  $obstacle$  [30].

Profil kecepatan aliran pada daerah  $downstream$  ditunjukkan dengan tujuan untuk mengetahui kecenderungan aliran. Profil kecepatan aliran pada daerah  $downstream$  ditunjukkan dalam bentuk grafik sehingga perbedaan profil kecepatan aliran saat menggunakan  $obstacle$  dan tidak menggunakan dapat terlihat jelas.  $Pathline$  kecepatan dapat menunjukkan karakteristik  $secondary\ flow$  yang terbentuk.  $Coefficient\ of\ pressure\ (C_p)$  pada sisi  $inner$  dan  $outer\ wall\ elbow\ 90^0$  ditampilkan dalam bentuk grafik untuk mengetahui pengaruh  $obstacle$  terhadap  $radial\ pressure\ gradient$  [8].

$Skin\ friction\ coefficient\ (C_f)$  pada dinding  $inner$ ,  $outer$ , dan  $upper$  sepanjang  $downstream$  akan ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut berfungsi untuk menunjukkan pengaruh  $obstacle$  dalam mereduksi  $friction$  antara dinding dengan fluida [35].



Gambar 3. 7 Posisi Pengambilan Data (*Overall Duct*)



Gambar 3. 8 Posisi pengambilan data pada saluran sisi *downstream*

Tabel 3. 1 Posisi dan Jenis Data

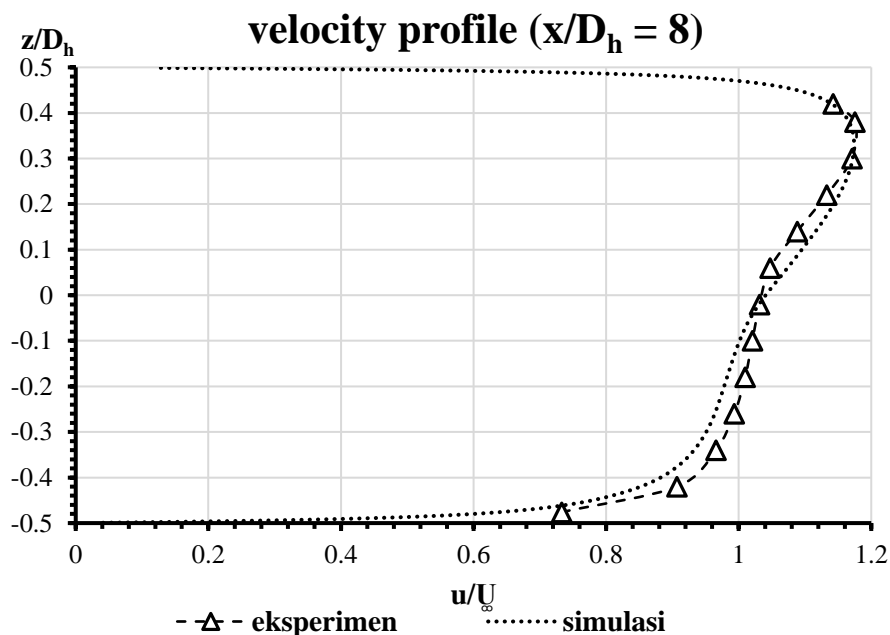
No	Posisi	Jenis data	
1	<i>Inlet duct</i> ( $z/D_h = 10$ )	Static pressure	
2	<i>Mid plane duct</i> ( $y/D_h = 0.5$ )	kontur <i>turbulent intensity</i>	
3	<i>Inlet elbow 90°</i> ( $\alpha = 0^\circ$ )	<i>Static pressure</i> dan <i>turbulent intensity</i>	
4	$\theta = 15^\circ$	kontur <i>turbulent intensity</i>	
5	$\theta = 30^\circ$		
6	$\theta = 45^\circ$		
7	$\theta = 60^\circ$		
8	$\theta = 75^\circ$	profil & kontur kecepatan dan kontur <i>turbulent intensity</i>	
9	<i>Outlet elbow 90°</i> ( $\theta = 90^\circ$ )		<i>Static pressure</i> dan <i>turbulent intensity</i>
10	$x/D_h = 4$		
11	$x/D_h = 8$		
12	$x/D_h = 12$	Statis pressure dan <i>turbulent intensity</i>	
13	$x/D_h = 16$		
14	$x/D_h = 20$		
15	<i>Outlet duct</i> ( $x/D_h = 25$ )		
16	<i>Inner wall downstream</i>	<i>Skin friction coefficient</i>	
17	<i>Outer wall downstream</i>		
18	<i>Upper wall downstream</i>		
19	<i>Inner wall elbow 90°</i> ( <i>midplane</i> )	Tekanan statis	
20	<i>Outer wall elbow 90°</i> ( <i>midplane</i> )		

### 3.2.4 Analisis Grid Independency dan Validasi Data

Proses *grid independency test* dan validasi untuk model simulasi bertujuan untuk mendapatkan mesh dan permodelan simulasi yang paling akurat. Pada proses ini akan dibandingkan hasil simulasi dari beberapa variasi mesh. Terdapat empat *mesh* yang akan di bandingkan, jumlah mesh yang akan divariasikan bernilai  $1.6 \times 10^6$ ,  $1.7 \times 10^6$ ,  $1.8 \times 10^6$ , dan  $1.9 \times 10^6$  element. Keempat variasi tersebut akan disimulasikan dengan nilai  $Re_{Dh}$  sebesar  $2.4 \times 10^4$  berbasis diameter *hydraulic* pada *Square duct* tanpa *obstacle*.

Tabel 3. 2 Data *Grid Independency Test (Pressure Drop Error)* dan  $y^+$

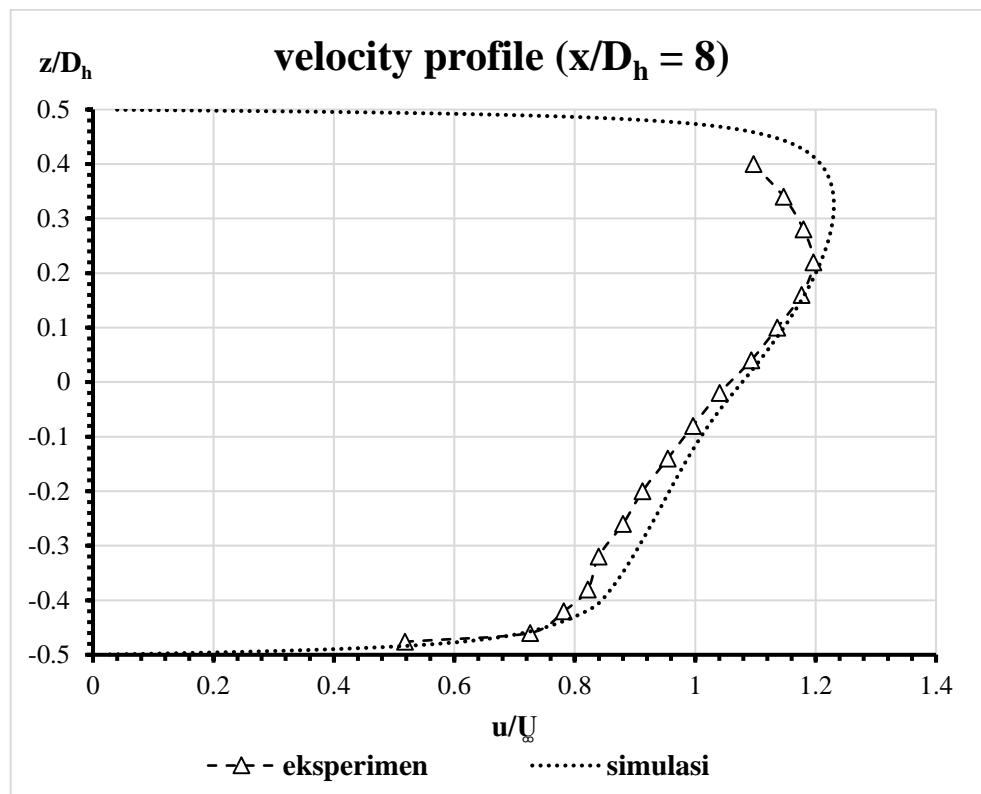
No	Mesh	Downstream Pressure drop (pa)	Error (%)	$y^+$		
				Average	Maximal	Minimal
1	$1.6 \times 10^6$	3.79	-	2.5	5.5	0
2	$1.7 \times 10^6$	3.74	1.39	1.6	4.1	0
3	$1.8 \times 10^6$	3.77	0.80	0.98	3.2	0
4	$1.9 \times 10^6$	3.75	0.43	0.9	2.8	0



(a)

Gambar 3. 9 Grafik *velocity profile* pada  $x/D_h = 8$  tanpa *obstacle* ; a)  $Re_{Dh} = 2.4 \times 10^4$





(a)

Gambar 3. 10 Grafik *velocity profile* pada  $Re_{Dh} = 2.0 \times 10^4$ ; a)  $x/D_h = 8$

Parameter yang dibandingkan untuk *grid independency test* adalah *pressure drop* pada sisi *downstream* dan  $y^+$ . Tabel hasil perbandingan *pressure drop* dapat dilihat pada Tabel 3.2. Berdasarkan tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa mesh dengan jumlah  $1.8 \times 10^6$  sudah cukup akurat dan optimal.

Nilai  $y^+$  pada mesh  $1.8 \times 10^6$  sudah cukup bagus. Karakteristik pada laminar *sublayer* bisa didapatkan dengan membuat *mesh* yang mana memiliki nilai  $y^+ < 1$ . Karakteristik pada laminar *sublayer* mempengaruhi kontur atau profil fluida terutama pada daerah di dekat dinding *duct* ataupun *obstacle*.

Validasi simulasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan eksperimen pada variasi *duct* tanpa *obstacle* dan dengan CC. Data yang akan dibandingkan berupa *velocity profile* pada posisi  $x/D_h = 8$  pada  $Re_{Dh}$  sebesar  $2.4 \times 10^4$  dan  $2.0 \times 10^4$ . Grafik perbandingan profil kecepatan tersebut ditampilkan pada Gambar 3.9 untuk variasi *duct* tanpa *obstacle* dan Gambar 3.10 untuk *duct* dengan CC ( $\alpha = 8^\circ$ ). Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa *velocity profile* antara simulasi dengan eksperimen memiliki perbedaan yang tidak signifikan,

sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi memiliki nilai yang cukup dekat dengan keadaan yang sebenarnya.

### 3.3 Langkah-Langkah Penelitian

Langkah-langkah penelitian numerik pada *square duct* ini adalah sebagai berikut:

- 1) Pembuatan geometri dan mesh dari *ducting*.
- 2) Penentuan *boundary condition* pada model uji, serta batasan yang digunakan dalam penyelesaian simulasi seperti *inlet*, *outlet*, dan *wall* serta beberapa interior tambahan.
- 3) Penentuan keadaan operasi pada *fluent*, meliputi: *models*, *materials*, *boundary condition*, *solution*, *initialize*, *monitor residual*, dan *iterate (post-processing)*.
- 4) Iterasi hingga mencapai keadaan konvergen.
- 5) Analisis *grid independency*. Analisis *grid independency* divariasikan sebanyak 4 variasi jumlah *mesh* dengan model turbulensi *Reynolds Stress Model (RSM)*.
- 6) Melakukan simulasi pada model uji dengan variasi yang ditentukan yaitu: variasi *obstacle*, kecepatan (1, 1.5, 2, 3, dan 5 m/s) dan angular position (4°, 8° dan 12°). Tabel 3.3 menunjukkan semua variasi yang akan di simulasikan.
- 7) Melakukan *post-processing* tiap variasi.
- 8) Analisis hasil dan penarikan kesimpulan

Tabel 3. 3 Data Variasi Penelitian

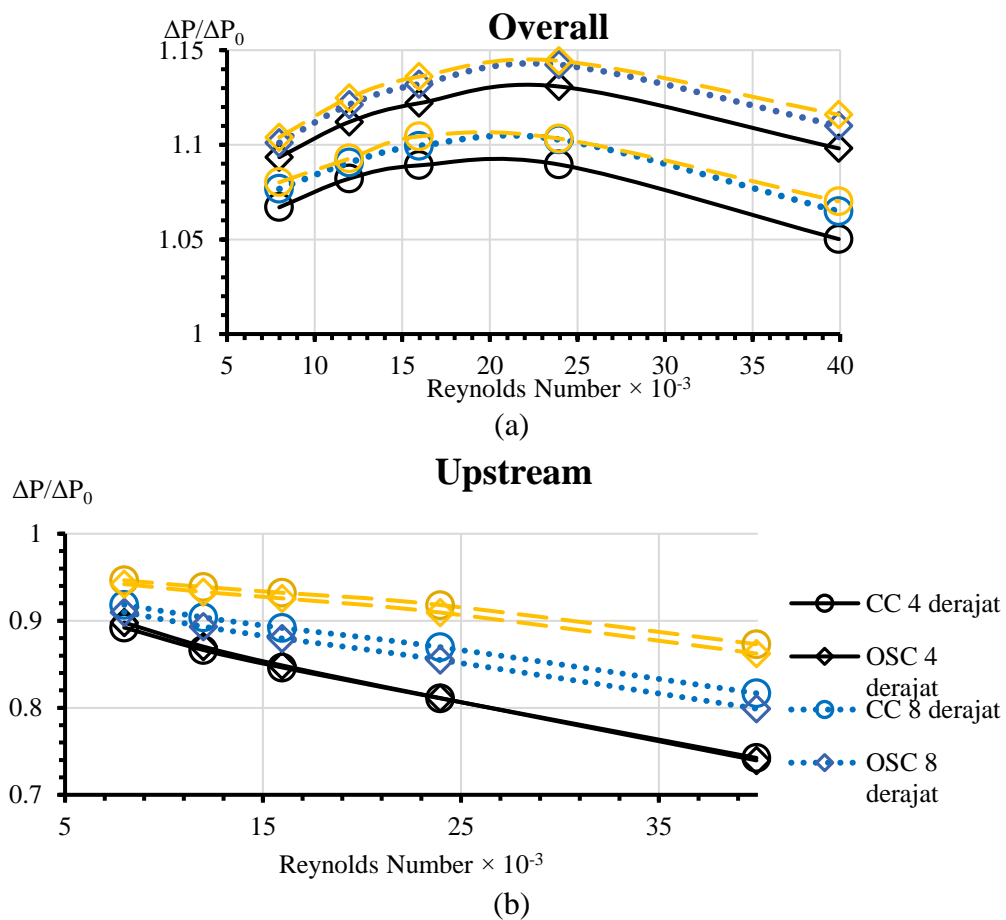
Variasi	Kecepatan (m/s)	angular position ( $\alpha$ )°	Obstacle
1	1	4	- circular cylinder - oriented square cylinder
2		8	
3			
4			
5			
6			
7	1.5		4
8		8	
9			
10			
11			
12			
13	2		4
14		8	
15			
16			
17			
18			
19	3		4
20		8	
21			
22			
23			
24			
25	5		4
26		8	
27			
28			
29			
30			

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

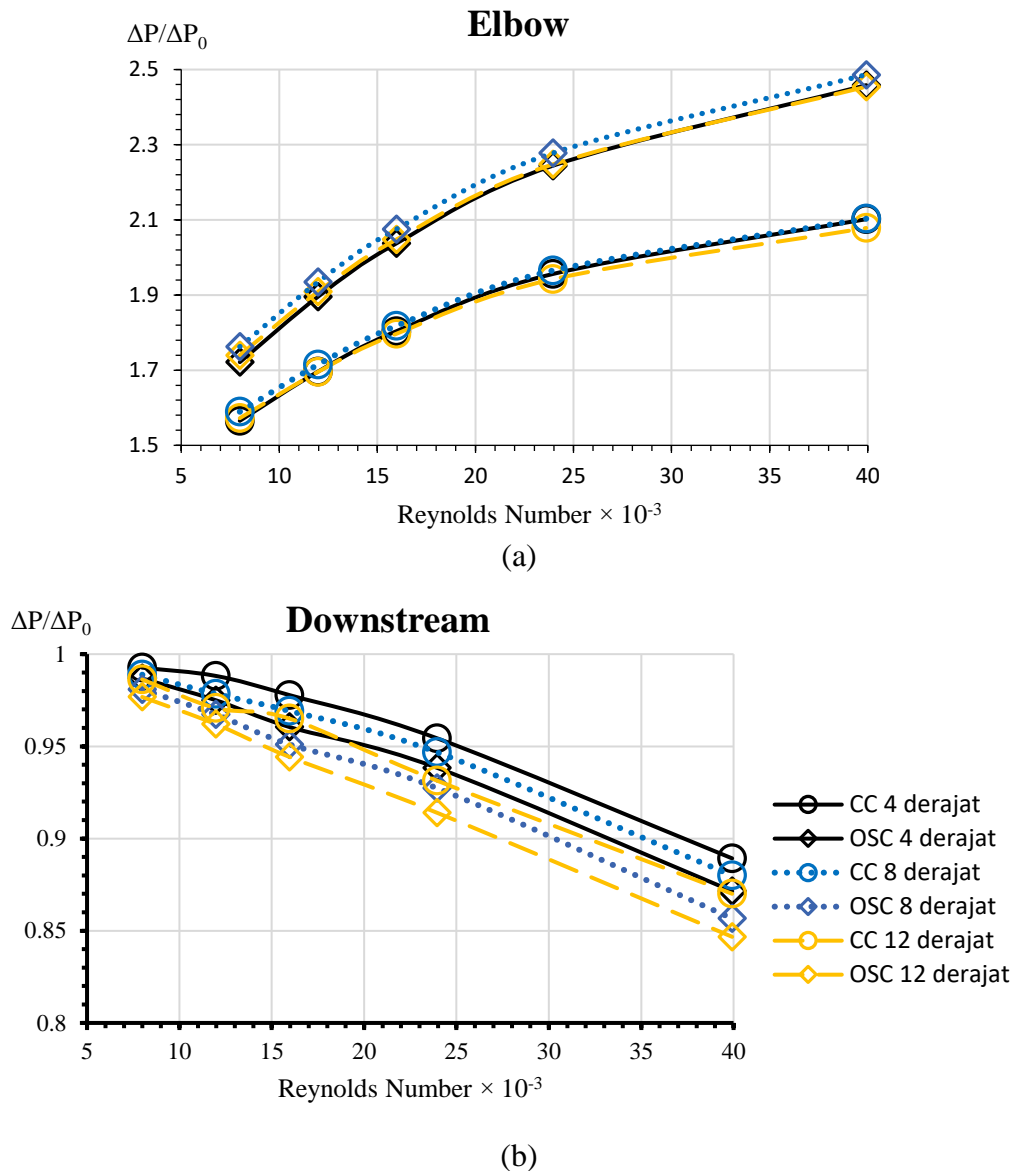
## BAB 4

### PEMBAHASAN

Pada bab ini menyajikan hasil *post processing* simulasi numerik di sepanjang *ducting system* yang terdiri dari *upstream*, *elbow 90°* dan *downstream duct*. Hasil *post processing* mengenai karakteristik aliran ditampilkan dalam bentuk data kuantitatif dan kualitatif. Terdapat informasi terkait *pressure drop* disepanjang *ducting system* maupun *pressure drop* pada *upstream duct*, *elbow 90°*, dan *downstream duct* yang dipengaruhi oleh bentuk *obstacle* (*circular cylinder* dan *oriented square cylinder*), penempatan *obstacle* pada tiga posisi ( $\alpha$ ) dan bilangan Reynolds. Seluruh hasil *post-processing* yang diperoleh baik berupa data kuantitatif dan kualitatif dibandingkan dengan hasil simulasi *ducting system* tanpa *obstacle*.



Gambar 4. 1 *dimensionless pressure drop* dengan variasi bentuk *obstacle*, *angular position* dan bilangan Reynolds; a) *Overall duct*, b) *upstream duct*



Gambar 4. 2 *pressure drop* dengan variasi bentuk *obstacle*, *angular position* dan bilangan Reynolds; a) *elbow 90°*, b) *downstream duct*

Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan grafik *pressure drop* pada *ducting system* dengan variasi bentuk *obstacle*, *angular position* dan bilangan Reynolds. Pada sumbu “Y” menunjukkan *dimensionless* parameter berupa perbandingan *pressure drop* pada variasi *obstacle* dengan *pressure drop* pada tanpa *obstacle*. Pada sumbu “X” menunjukkan bilangan Reynolds.

Pada gambar 4.1 (b) dapat dilihat bahwa peningkatan bilangan Reynolds dapat menurunkan *dimensionless pressure drop* pada daerah *upstream* untuk

seluruh variasi bentuk *obstacle* dan *angular position* ( $\alpha$ ). Penempatan *obstacle* pada posisi yang lebih dekat ke arah *upstream* juga mampu menurunkan *dimensionless pressure drop* aliran. Pada bagian *upstream* pengaruh dari bentuk *obstacle* tidak terlalu signifikan terhadap *pressure drop*. Pada gambar 4.2 (a) dapat dilihat bahwa variasi bentuk dari *obstacle* memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap peningkatan *dimensionless pressure drop* aliran pada *elbow*  $90^\circ$ . OSC memberikan pengaruh berupa peningkatan *dimensionless pressure drop* yang lebih besar jika dibandingkan dengan CC untuk seluruh variasi bilangan Reynolds dan *angular position* ( $\alpha$ ). Variasi *angular position* tidak terlalu berpengaruh terhadap peningkatan *dimensionless pressure drop* pada daerah *elbow*  $90^\circ$ .

Pada *downstream duct*, OSC lebih mampu menurunkan nilai *dimensionless pressure drop* pada seluruh variasi *angular position* dan bilangan Reynolds jika dibandingkan dengan *dimensionless pressure drop* CC. Penempatan *obstacle* yang semakin mendekati sisi *upstream* berdampak pada peningkatan *dimensionless pressure drop* pada seluruh variasi bentuk *obstacle* dan bilangan Reynolds. Penurunan *dimensionless pressure drop* aliran juga dipengaruhi oleh peningkatan bilangan Reynolds, semakin tinggi bilangan Reynolds maka semakin kecil *dimensionless pressure drop* aliran.

#### 4.1 Pengaruh Variasi Bentuk *Obstacle*

Pada subbab ini diuraikan hasil simulasi numerik pengaruh bentuk *obstacle*. Pembahasan penggunaan *obstacle* terfokus pada *elbow*  $90^\circ$  dan *downstream region*. Analisa yang disajikan hanya pada satu variasi bilangan Reynolds ( $Re_{dh} = 4 \times 10^4$ ) dan *angular position* ( $\alpha = 4^\circ$ ), karena pada variasi tersebut menunjukkan reduksi *pressure drop* yang paling signifikan jika dibandingkan dengan variasi yang lainnya.

Fenomena yang ditunjukkan terlebih dahulu adalah *Velocity magnitude*. *Velocity magnitude* ditampilkan berupa kontur, vektor dan grafik distribusi kecepatan. Pada kontur tersebut juga disertakan *pathline* dari aliran untuk mengetahui terbentuknya *vortex*.

Data *turbulent intensity* pada posisi *elbow*  $90^\circ$  dan *downstream* juga dianalisa. Data *turbulent intensity* ditampilkan secara kualitatif dan kuantitatif

berupa kontur dan grafik pada posisi penampang tertentu seperti pada gambar 3.7. *Turbulent intensity* memiliki pengaruh terhadap nilai *Reynolds stress* yang ditimbulkan. Penurunan *pressure drop* dapat dikorelasikan dengan peningkatan *turbulent intensity* dengan cara menunjukkan kontur dan grafik *skin friction coefficient*. Pengambilan data *skin friction coefficient* dilakukan di sepanjang *elbow 90°* dan *downstream*.

Pengaruh penggunaan *obstacle* terhadap perbedaan tekanan *inner* dan *outer wall* pada sisi *elbow 90°* juga akan dibahas. Pembahasan dilakukan dengan menunjukkan kontur tekanan dan grafik  $C_p$  di sepanjang *inner* dan *outer wall elbow 90°*. Grafik tersebut membantu menunjukkan distribusi tekanan di sepanjang dinding *inner* dan *outer elbow 90°* yang terbentuk semakin besar ataupun kecil.

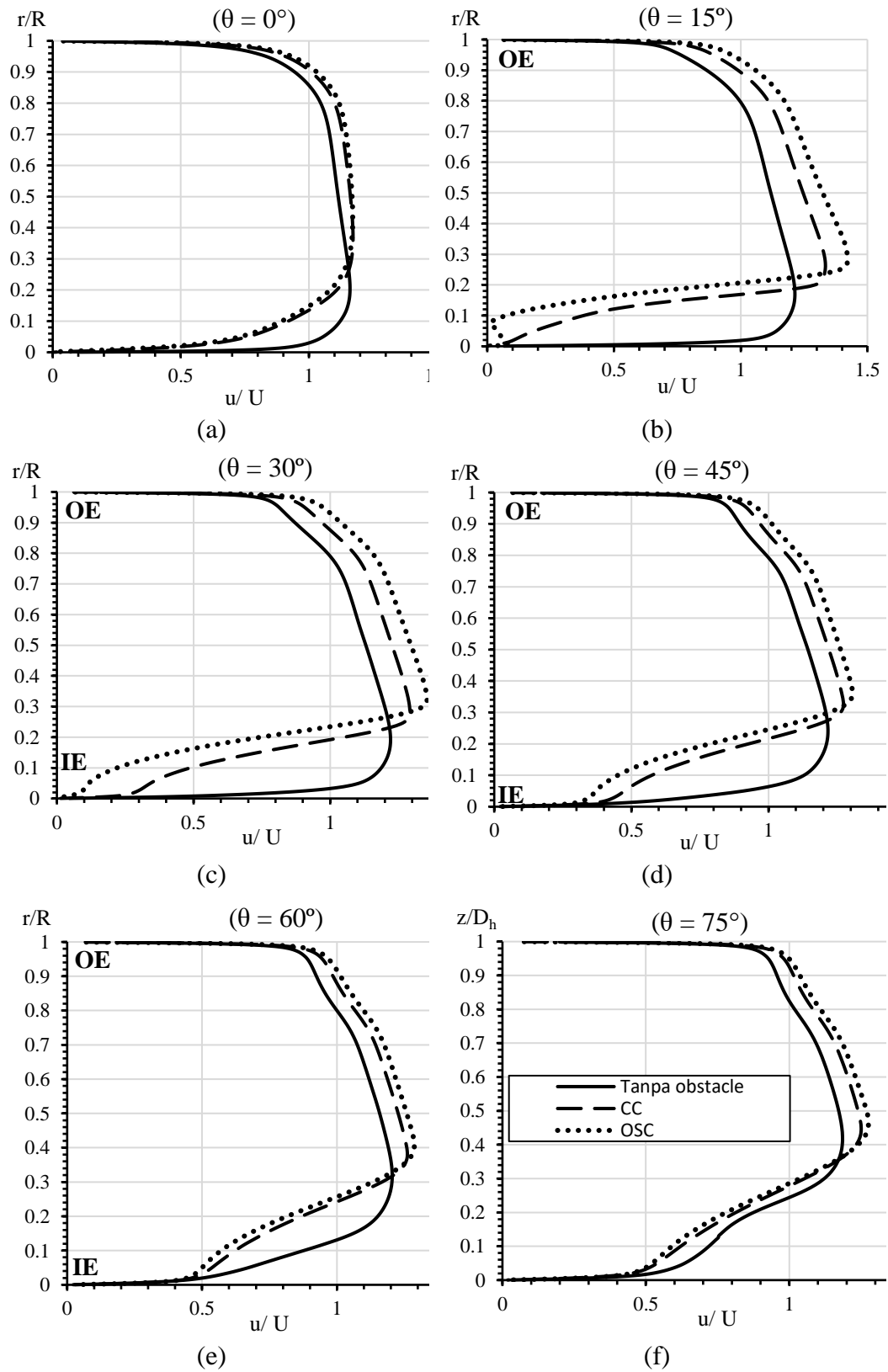
#### 4.1.1 Analisa data kuantitatif pengaruh bentuk *obstacle*

Salah satu karakteristik aliran yang diamati adalah distribusi kecepatan disepanjang *elbow 90°* dan *downstream*. Distribusi kecepatan berguna untuk menunjukkan besarnya *shear stress* dan daerah yang mengalami peningkatan atau pengurangan momentum. Data kuantitatif tersebut dapat dihubungkan dengan karakteristik aliran yang lainnya.

Data kuantitatif *velocity magnitude* berupa grafik pada potongan  $y/D_h = 0.5$  disepanjang *inner elbow 90°* hingga *outer elbow 90°* ditampilkan pada Gambar 4.3 dan 4.4. Grafik tersebut menunjukkan *normalize velocity magnitude* pada posisi  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  dan  $90^\circ$  dengan variasi *obstacle*. Grafik tersebut dilengkapi dengan informasi posisi penempatan *obstacle*.

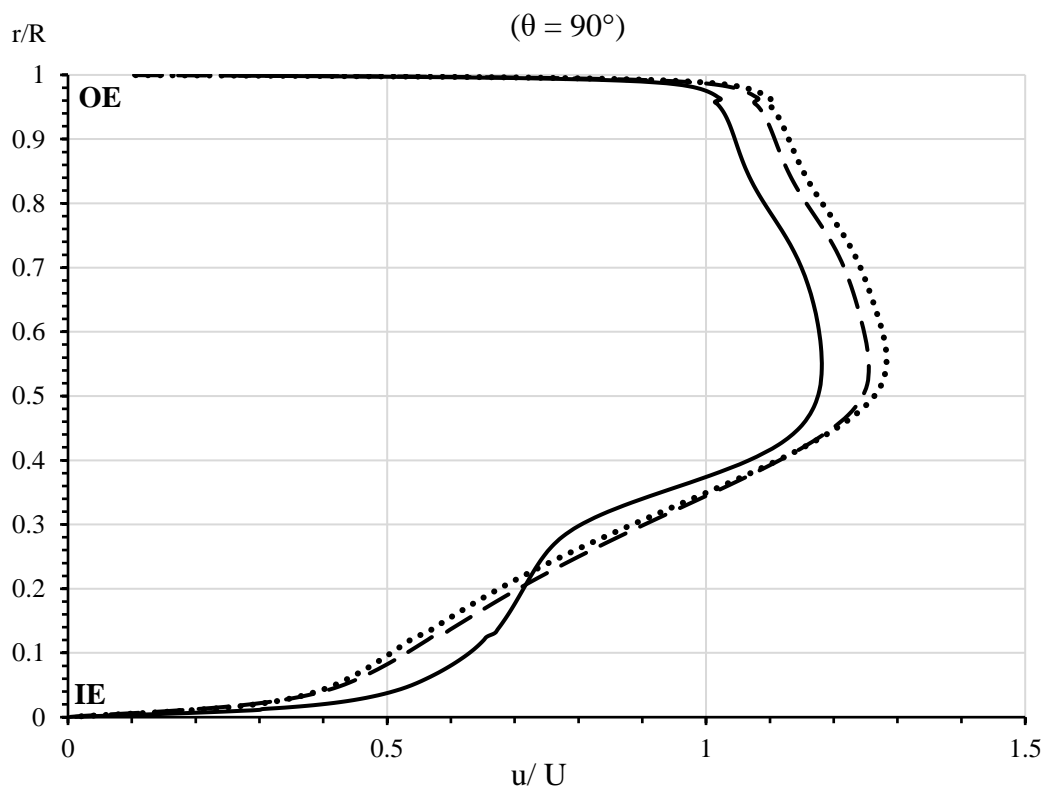
Pada Gambar 4.3 tersebut dapat dilihat proses perubahan profil kecepatan di sepanjang *elbow 90°*. Aliran yang melewati *elbow 90°* mengalami gaya sentrifugal sehingga aliran pada bagian tengah penampang ( $y/D_h = 0.5$ ) cenderung bergerak ke arah radial (*outer elbow*). Fenomena ini diindikasikan dengan semakin tingginya momentum di sisi dinding luar *elbow 90°* seiring aliran mengalir melewati *elbow 90°*. Pengaruh gaya *centrifugal* tersebut terus terjadi hingga aliran berada pada daerah *downstream duct*.





Gambar 4. 3 Distribusi kecepatan di kelengkungan *elbow*  $90^\circ$  pada bilangan  $Re_{Dh}$   $4 \times 10^4$  dan  $\alpha = 4^\circ$

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa adanya defisit momentum pada bagian *inner wall elbow*  $90^\circ$  dan kenaikan momentum di sisi *outer wall elbow*  $90^\circ$  di seluruh penampang untuk variasi OSC dan CC. Defisit momentum tersebut terjadi dikarenakan adanya *obstacle* yang diletakkan di dekat *inner wall elbow*  $90^\circ$  dengan *gap ratio* sebesar 0.2. Penempatan *obstacle* pada posisi tersebut menyebabkan adanya efek *blockage* sehingga fluida yang mengalir pada celah berkurang dan cenderung bergerak pada daerah yang lebih lebar. Defisit momentum yang disebabkan oleh OSC lebih besar dibandingkan CC. Hal ini disebabkan oleh pembentukan *wake* dibelakang OSC yang lebih lebar memperkecil celah antara *obstacle* dengan *inner wall elbow*  $90^\circ$ .



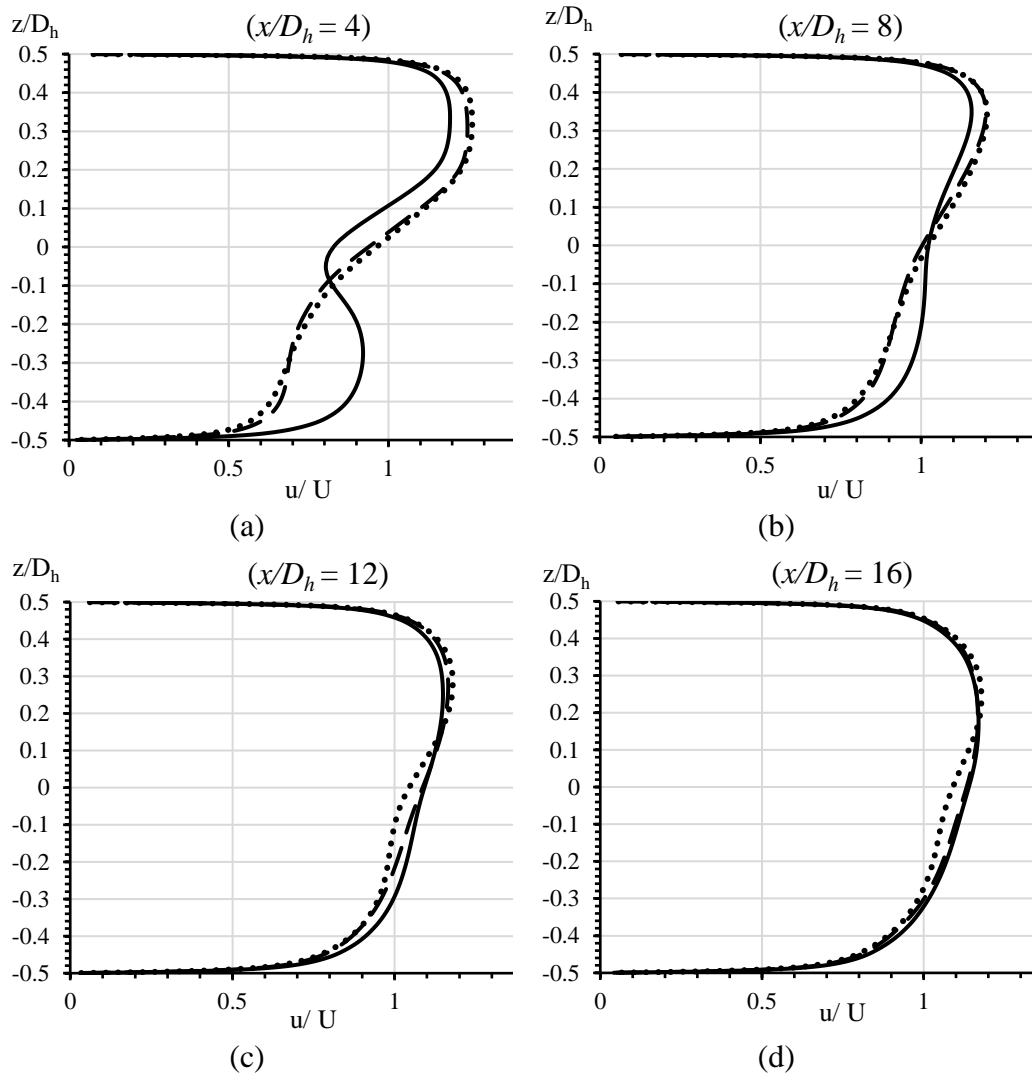
Gambar 4. 4 distribusi kecepatan pada penampang *outlet elbow*  $90^\circ$  dengan bilangan  $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$  dan  $\alpha = 4^\circ$

Gambar 4.5 menunjukkan grafik *normalize velocity* pada *downstream duct*. Pada  $x/D_h = 4$  dan  $x/D_h = 8$ , grafik *normalize velocity* masih menunjukkan pola yang sama dengan *normalize velocity* pada sisi *elbow*  $90^\circ$ . Pada penampang  $x/D_h = 4$

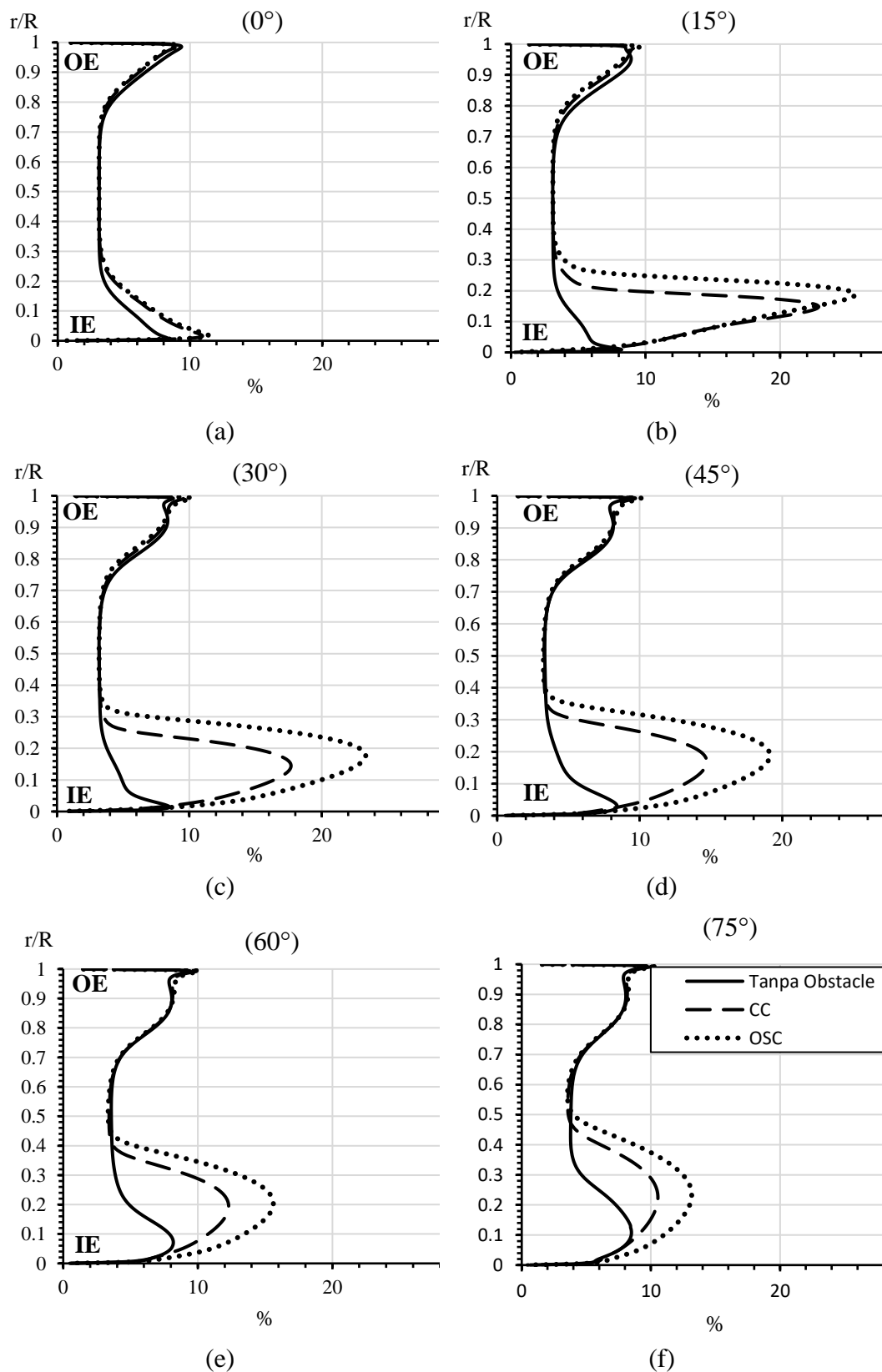
merupakan titik terjadinya penumpukan fluida akibat gaya sentrifugal, hal ini diindikasikan dengan momentum di sisi dinding luar *elbow*  $90^\circ$  yang paling tinggi dibandingkan dengan penampang yang lain. Seiring fluida mengalir menuju *downstream*, fenomena defisit momentum di sisi *inner wall downstream* dan peningkatan momentum di sisi *outer wall downstream* pada variasi OSC dan CC semakin berkurang. Hal ini ditunjukkan pada profil kecepatan pada  $x/D_h = 12$  dan  $x/D_h = 16$  yang memperlihatkan *normalize velocity* pada variasi OSC dan CC semakin mirip dengan bentuk profil *normalize velocity* tanpa *obstacle*.

Gambar 4.6 menjelaskan tentang grafik intensitas turbulensi di sepanjang *elbow*  $90^\circ$  dengan variasi *obstacle*. Gambar 4.7 menunjukkan profil intensitas turbulensi pada posisi  $y/D_h = 0.5$  untuk potongan penampang *outlet elbow*  $90^\circ$ ,  $x/D_h = 4$  hingga  $x/D_h = 12$ . Berdasarkan gambar 4.6 dan 4.7 dapat diketahui bahwa pengaruh pemasangan *obstacle* memberikan peningkatan intensitas turbulensi yang terjadi di dekat dinding dalam *elbow*  $90^\circ$ . Penggunaan OSC mampu memberikan peningkatan intensitas turbulensi yang lebih besar dan lebih menyebar jika dibandingkan dengan CC. Berdasarkan gambar 4.6 dan 4.7 tersebut dapat dilihat bahwa titik maksimal intensitas turbulensi yang awalnya berada di dekat *inner wall elbow*  $90^\circ$  bergerak ke arah tengah penampang. Fenomena ini terjadi dikarenakan adanya *secondary flow* yang bergerak ke arah dinding luar *downstream*. Pada daerah *downstream* dapat dilihat bahwa hasil peningkatan intensitas turbulensi oleh *obstacle* sudah relatif berkurang terutama terjadi pada penampang  $x/D_h = 8$ .

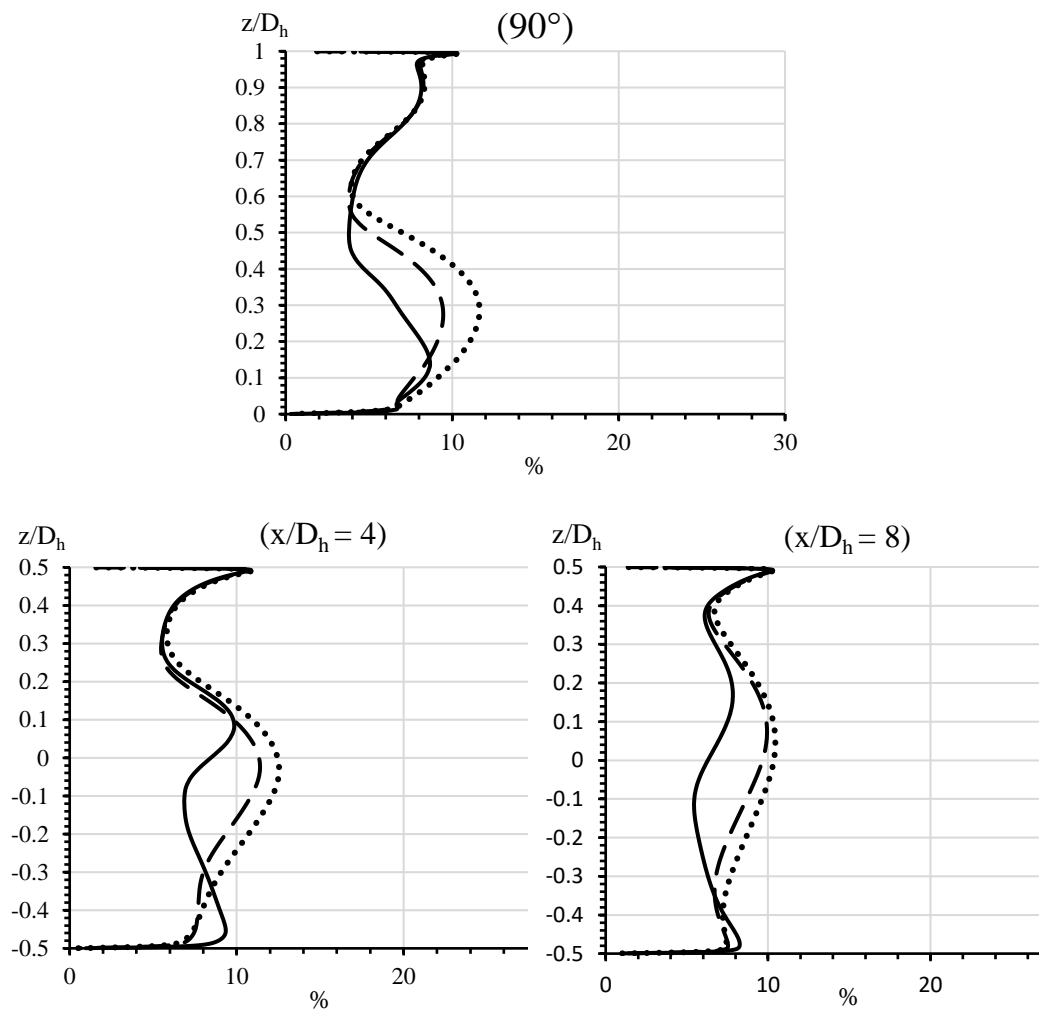
Pada gambar 4.8 ditampilkan grafik intensitas turbulensi pada *downstream region* tepatnya pada *outlet duct*. Grafik tersebut ditampilkan dengan absis logarithmic dan ordinat linier. Pada grafik tersebut ditambahkan keterangan mengenai *zone* di daerah *boundary layer*.



Gambar 4. 5 distribusi kecepatan pada penampang disepanjang *downstream duct* dengan bilangan  $Re_{D_h} = 4 \times 10^4$  dan  $\alpha = 4^\circ$

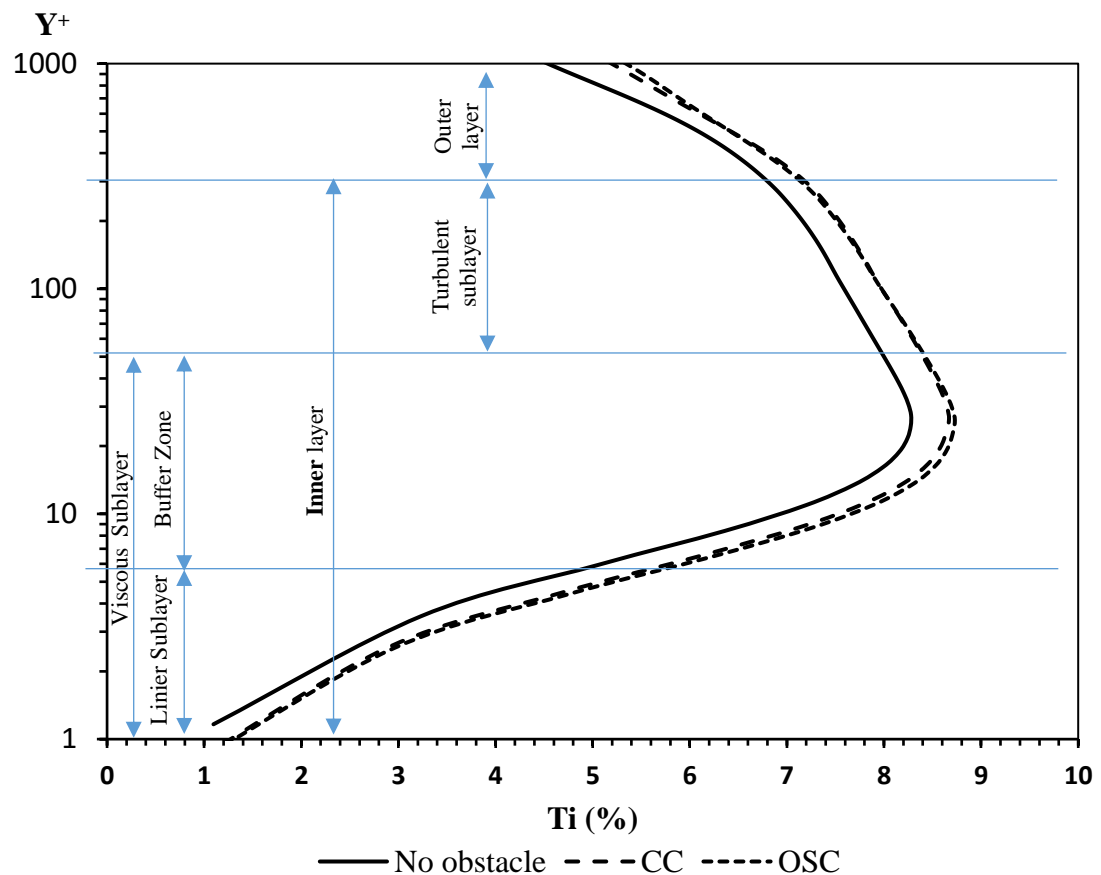


Gambar 4. 6 intensitas turbulensi disepanjang *elbow*  $90^\circ$  dengan bilangan  $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$  dan  $\alpha = 4^\circ$



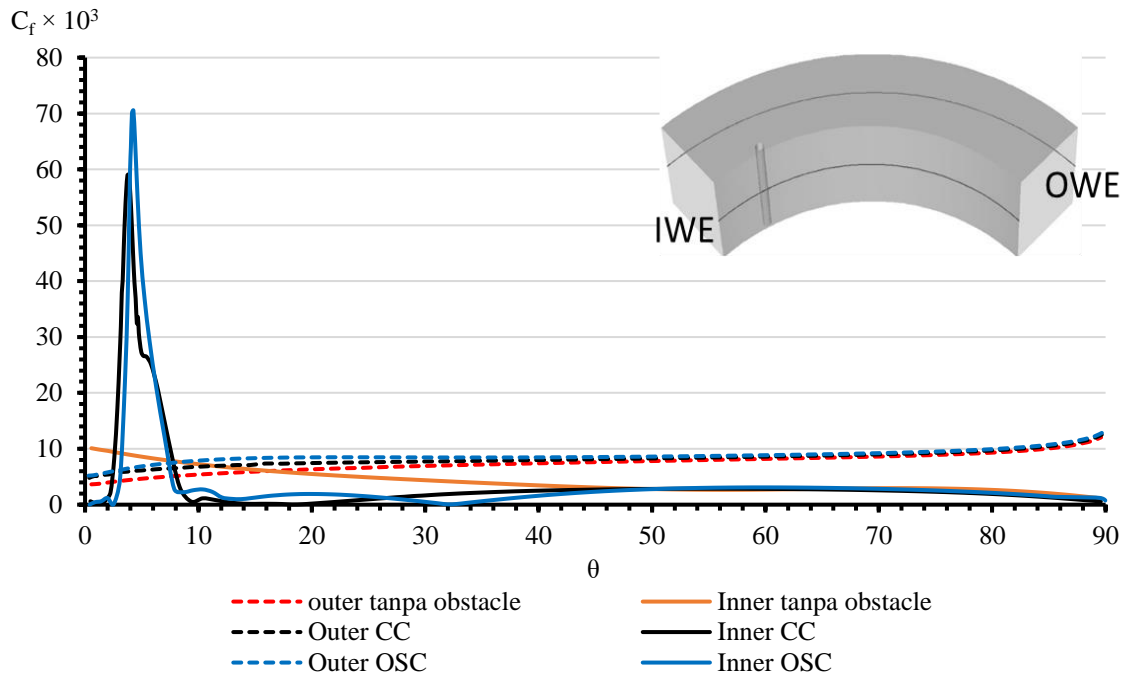
Gambar 4. 7 intensitas turbulensi pada *downstream duct* dengan bilangan  $Re_{D_h} = 4 \times 10^4$  dan  $\alpha = 4^\circ$

Pada gambar 4.8 dapat dilihat bahwa adanya pertumbuhan intensitas turbulensi aliran yang dimulai dari dinding dalam *downstream*. Peningkatan intensitas turbulensi tersebut terus meningkat hingga daerah *buffer zone*. Nilai intensitas turbulensi tersebut mengalami penurunan seiring terdapat peningkatan  $y^+$ . Walaupun terdapat penurunan intensitas turbulensi di daerah *outer layer* dan *buffer zone*, laju penurunan tersebut sangatlah rendah. Di daerah *centre line*, nilai intensitas turbulensi semakin rendah dan mendekati nilai intensitas turbulensi aliran di dekat dinding. Fenomena intensitas turbulensi tersebut telah sesuai dengan penelitian [28].



Gambar 4. 8 intensitas turbulensi pada *outlet duct* (semi-logarithmic)

Pengamatan secara kuantitatif juga diperlukan untuk memahami seberapa besar penurunan dan kenaikan *skin friction* pada sisi *inner* dan *outer wall elbow*  $90^\circ$ . Gambar 4.9 menunjukkan grafik *skin friction coefficient* pada *inner* dan *outer wall elbow*  $90^\circ$  tepatnya pada *midplane* masing-masing dinding tersebut. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa penggunaan *obstacle* menyebabkan kenaikan nilai *skin friction coefficient* di dinding dalam pada sudut  $2^\circ - 8^\circ$ . Pada sudut di atas  $10^\circ$  hingga  $42^\circ$  nilai *skin friction coefficient* di dinding dalam pada variasi *obstacle* lebih rendah dibandingkan dengan *skin friction* tanpa *obstacle*. Pada sudut  $\theta > 42^\circ$  tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai *skin friction coefficient* antara OSC, CC dan tanpa *obstacle*. Pada sisi dinding luar *elbow*  $90^\circ$  terdapat sedikit kenaikan *skin friction coefficient* pada  $0^\circ < \theta < 40^\circ$ . Pada sudut  $\theta > 40^\circ$  tidak terdapat perbedaan pada *skin friction coefficient* yang signifikan antara tanpa atau dengan *obstacle*.



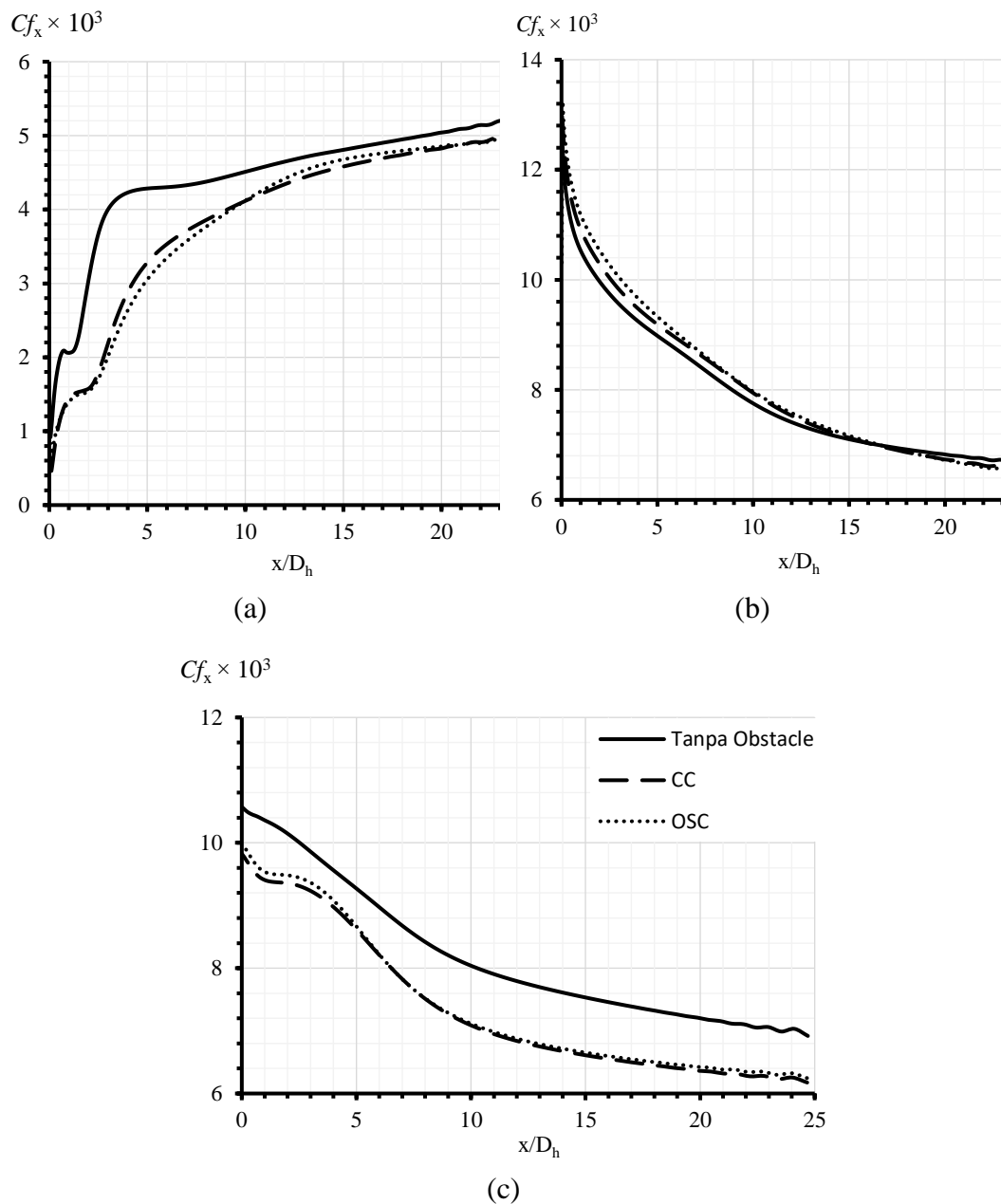
Gambar 4. 9 *skin friction coefficient* pada dinding dalam dan luar *elbow* 90°; IWE= *inner wall elbow*, OWE = *outer wall elbow*

Pengamatan secara kuantitatif terhadap *skin friction* pada bagian dinding *downstream* juga diperlukan untuk memahami seberapa besar penurunan dan kenaikan terhadap *skin friction coefficient*. Gambar 4.9 menunjukkan grafik *skin friction coefficient* pada *inner*, *outer* dan *top elbow* tepatnya pada  $y/D_h = 0.5$  masing-masing dinding tersebut. Berdasarkan gambar 4.10, *obstacle* memberikan pengaruh berupa penurunan nilai *skin friction coefficient* disepanjang *inner wall downstream* dan *top wall downstream*. Penurunan yang paling signifikan terjadi pada  $x/D_h = 0$  hingga  $x/D_h = 10$  untuk dinding dalam *downstream*.

Pada bagian dinding luar terdapat sedikit kenaikan *skin friction coefficient* pada  $x/D_h = 0$  hingga  $x/D_h = 10$ . Pada  $x/D_h = 15$  hingga  $x/D_h = 25$ , *skin friction coefficient* pada variasi OSC dan CC sedikit lebih rendah dibanding *skin friction coefficient* tanpa *obstacle*.

Nilai *coefficient of pressure* didapatkan dari data tekanan statis pada ( $y/D_h = 0.5$ ) dinding dalam dan dinding luar seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11. Data tersebut diolah dengan menggunakan persamaan 2.7. Hasil pengolahan tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada gambar 4.12.

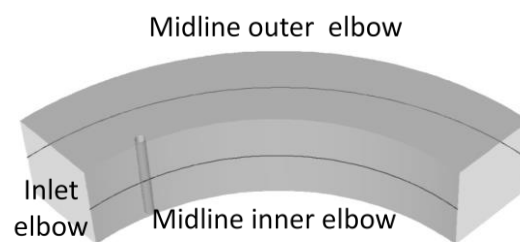




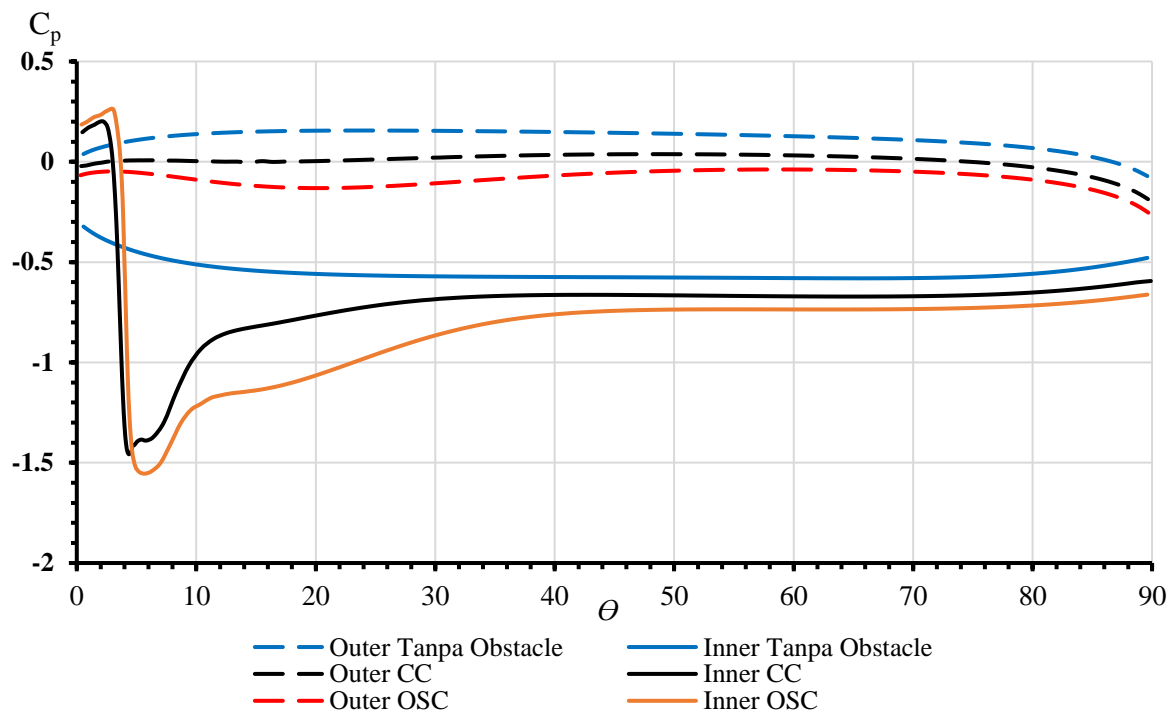
Gambar 4.10 *skin friction coefficient* a) dinding dalam *downstream*, b) dinding luar *downstream*, c) dinding atas *downstream*

Berdasarkan gambar 4.11 dapat dilihat bahwa *obstacle* dapat menurunkan nilai koefisien tekanan di sisi dinding luar dan dinding dalam *elbow*  $90^\circ$ . OSC memiliki nilai koefisien tekanan yang paling rendah diikuti oleh nilai CC. Pemasangan *obstacle* memberikan pengaruh kenaikan *coefficient of pressure* yang signifikan pada rentang  $\theta = 0^\circ-3^\circ$ . Kenaikan tersebut dikarenakan adanya aliran

cenderung bertumbuk dengan *obstacle*. Nilai *coefficient of pressure* tersebut menurun drastis pada  $\theta = 4^\circ$ , kenaikan dan penurunan tersebut merupakan dampak dari aliran yang melewati gap antara *obstacle* dengan dinding dalam *elbow*  $90^\circ$ . Aliran yang melewati gap tersebut mengalami peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan. Nilai koefisien tekanan kembali naik pada rentang  $\theta = 6^\circ - 40^\circ$ . Naiknya nilai  $C_p$  disebabkan adanya laluan yang menyerupai diffuser. Secara keseluruhan nilai *coefficient of pressure* untuk OSC dan CC lebih rendah daripada *coefficient of pressure* tanpa *obstacle*.



Gambar 4. 11 posisi ( $y/D_h = 0.5$ ) dinding luar *elbow*  $90^\circ$  dan dinding dalam *elbow*  $90^\circ$



Gambar 4. 12 koefisien tekanan dinding dalam dan dinding luar *elbow*  $90^\circ$

#### 4.1.2 Analisa data kualitatif pengaruh bentuk *obstacle*

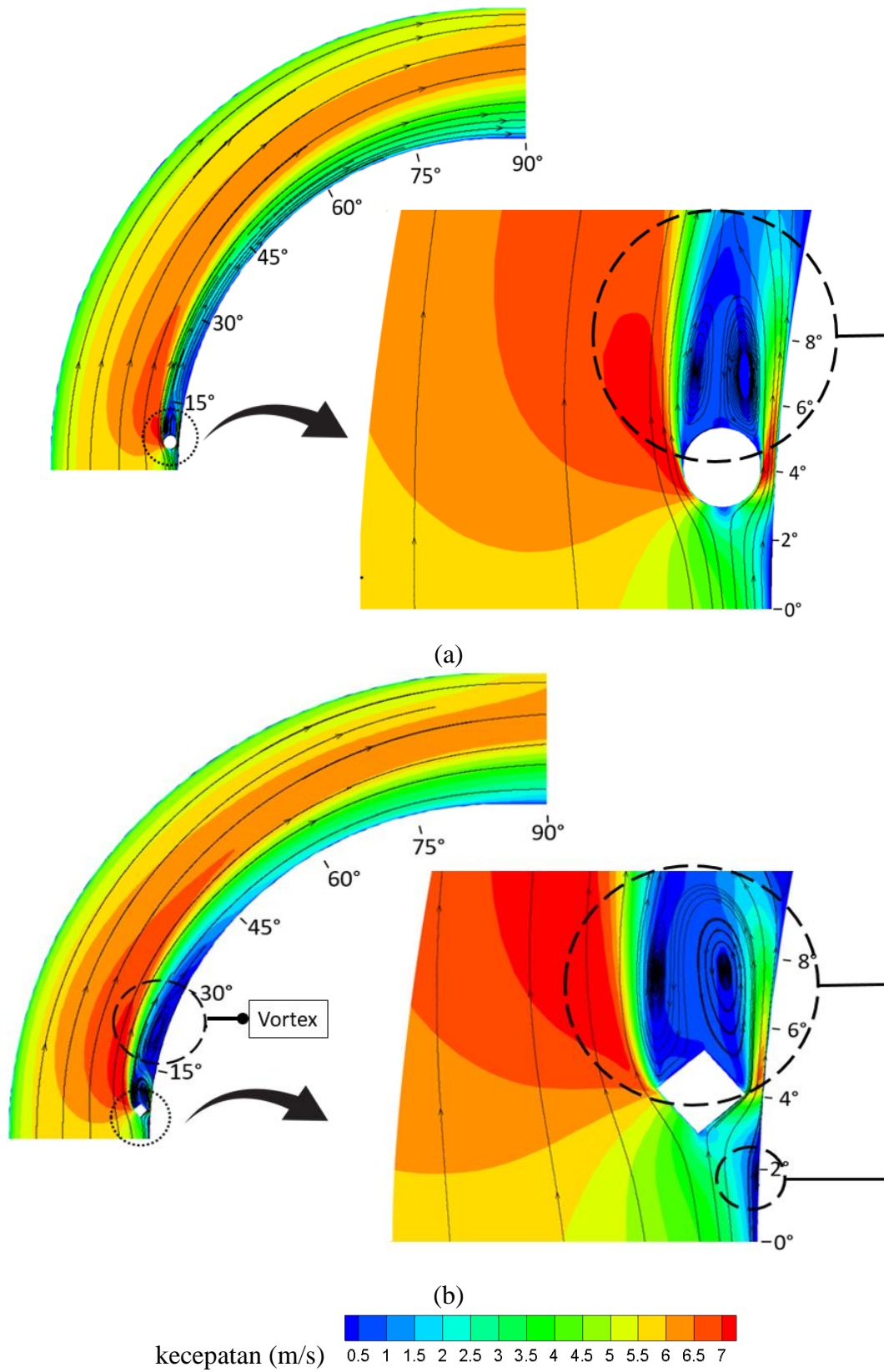
Gambar 4.13 menunjukkan kontur *velocity magnitude* pada penampang ( $y/D_h = 0.5$ ) disepanjang *elbow* untuk masing-masing variasi *obstacle*. Gambar tersebut dilengkapi oleh *pathline* dari aliran sehingga dapat diketahui *vortex* yang terbentuk.

Berdasarkan gambar 4.13 dapat diketahui bahwa *obstacle* yang diletakkan di dekat dinding dalam *elbow*  $90^\circ$  dengan ( $g/d = 0.2$ ) menimbulkan *wake* pada beberapa bagian. Salah satunya terbentuk pada bagian belakang *obstacle*. *Wake* tersebut terbentuk dikarenakan aliran fluida tidak dapat mengikuti bentuk ataupun kontur dari *obstacle*. Penyebab terjadinya hal ini terbagi menjadi dua hal yaitu *adverse pressure gradient* dan perubahan penampang secara signifikan.

Terdapat perbedaan karakteristik dari *Wake* yang terbentuk pada bagian belakang *obstacle*. *Wake* yang terbentuk pada CC *obstacle* disebabkan oleh *adverse pressure gradient* dan hilangnya *momentum* akibat efek *viscous*. Pada OSC *obstacle*, *wake* yang terbentuk diakibatkan perubahan geometri yang signifikan dari *obstacle*. *Wake* yang terbentuk pada OSC lebih lebar jika dibandingkan *Wake* yang terbentuk pada CC. Bentuk *wake* yang lebih besar tersebut memicu meningkatnya *pressure drag*. Di sisi lain vorticity yang ditimbulkan oleh OSC lebih banyak dibandingkan CC.

Pada sudut  $0^\circ$  hingga  $2^\circ$  terdapat *wake* yang terjadi pada bagian *inner wall elbow*  $90^\circ$ . Fenomena tersebut ditunjukkan dengan pada *pathline* yang berputar dan kontur kecepatan yang rendah. *Upstream Wake* yang terbentuk pada OSC lebih besar daripada *wake* yang terbentuk pada CC. Pada sudut  $8^\circ$  hingga  $35^\circ$  muncul *wake* pada bagian *inner wall elbow*  $90^\circ$  yang di indikasikan dengan kontur kecepatan yang rendah dan *pathline* aliran yang berputar. *Wake* yang terbentuk pada sudut  $8^\circ$  untuk variasi *obstacle* OSC lebih nampak dibandingkan dengan *wake* yang terbentuk pada variasi CC.

Gap antara *inner wall elbow*  $90^\circ$  dengan *obstacle* berdampak terhadap fenomena aliran. Gap yang terbentuk pada OSC berukuran lebih kecil, hal ini disebabkan oleh ukuran *wake* pada OSC lebih besar. Terdapat peningkatan kecepatan yang dimulai dari sudut  $3^\circ$  sedangkan kecepatan maksimal terjadi pada sudut  $4^\circ$  hingga  $6^\circ$ . Peningkatan kecepatan tersebut terjadi dikarenakan bentuk dari *gap* tersebut menyerupai konstruksi *nozzle*.



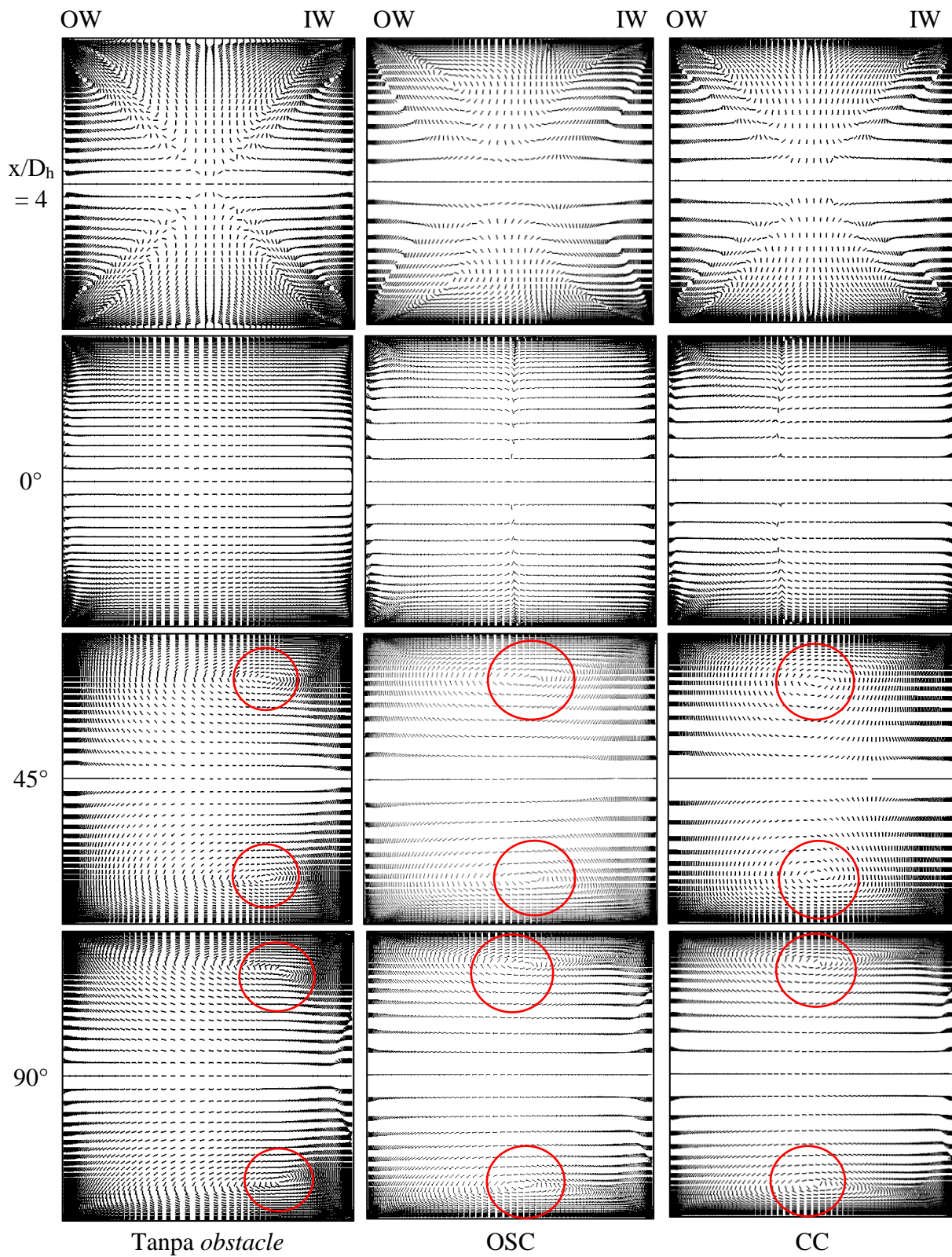
Gambar 4. 13 distribusi kecepatan pada *elbow* 90° a) CC, b) OSC

Vector *secondary flow* di sepanjang *elbow*  $90^\circ$  dan *downstream* ditampilkan pada Gambar 4.14 dan 4.15. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa adanya *secondary flow* yang bergerak dari dinding dalam menuju dinding luar pada bagian tengah ( $y/D_h = 0.5$ ). Pergerakan tersebut yang membuat distribusi kecepatan tinggi yang awalnya berada di dekat dinding dalam *elbow*  $90^\circ$  bergeser menuju dinding luar *elbow*  $90^\circ$ .

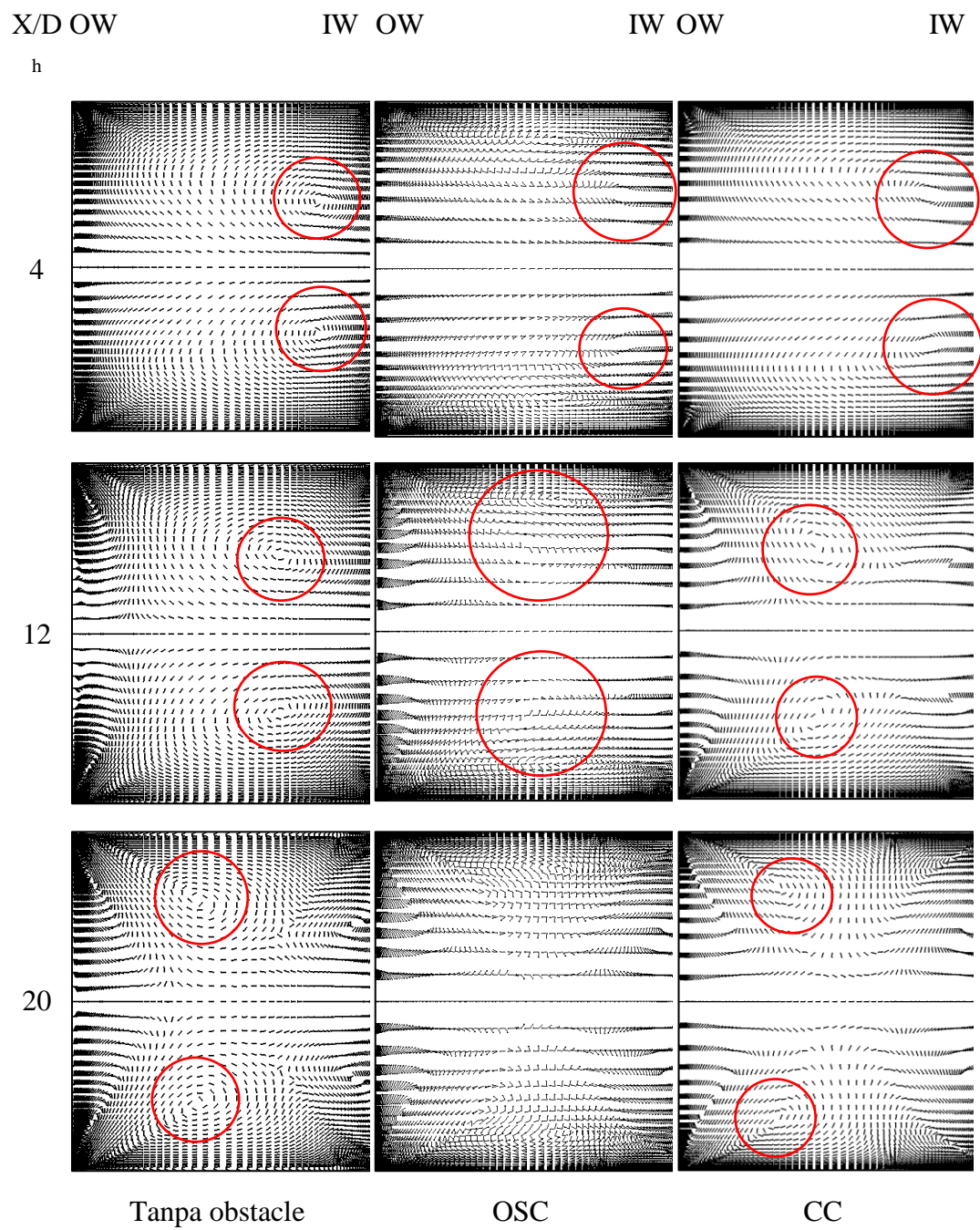
Penampakan munculnya sepasang vortex yang terletak pada bagian atas dan bawah pada suatu penampang dapat diamati pada sudut  $45^\circ$ . Pembentukan sepasang vortek tersebut semakin jelas pada *outlet elbow* dan *downstream region*.

Terdapat perbedaan pusat dari *based vortex*. Perbedaan pusat dari *based vortex* disebabkan oleh fluida yang mengalir pada daerah tengah penampang lebih banyak pada variasi *obstacle*. Perubahan posisi *based vortex* ke bagian tengah disebabkan oleh penempatan *obstacle* sehingga fluida cenderung menghindari celah sempit. *Secondary flow* tersebut masih muncul pada bagian *downstream* hingga  $x/D_h = 20$  namun dengan intensitas yang semakin mengecil.

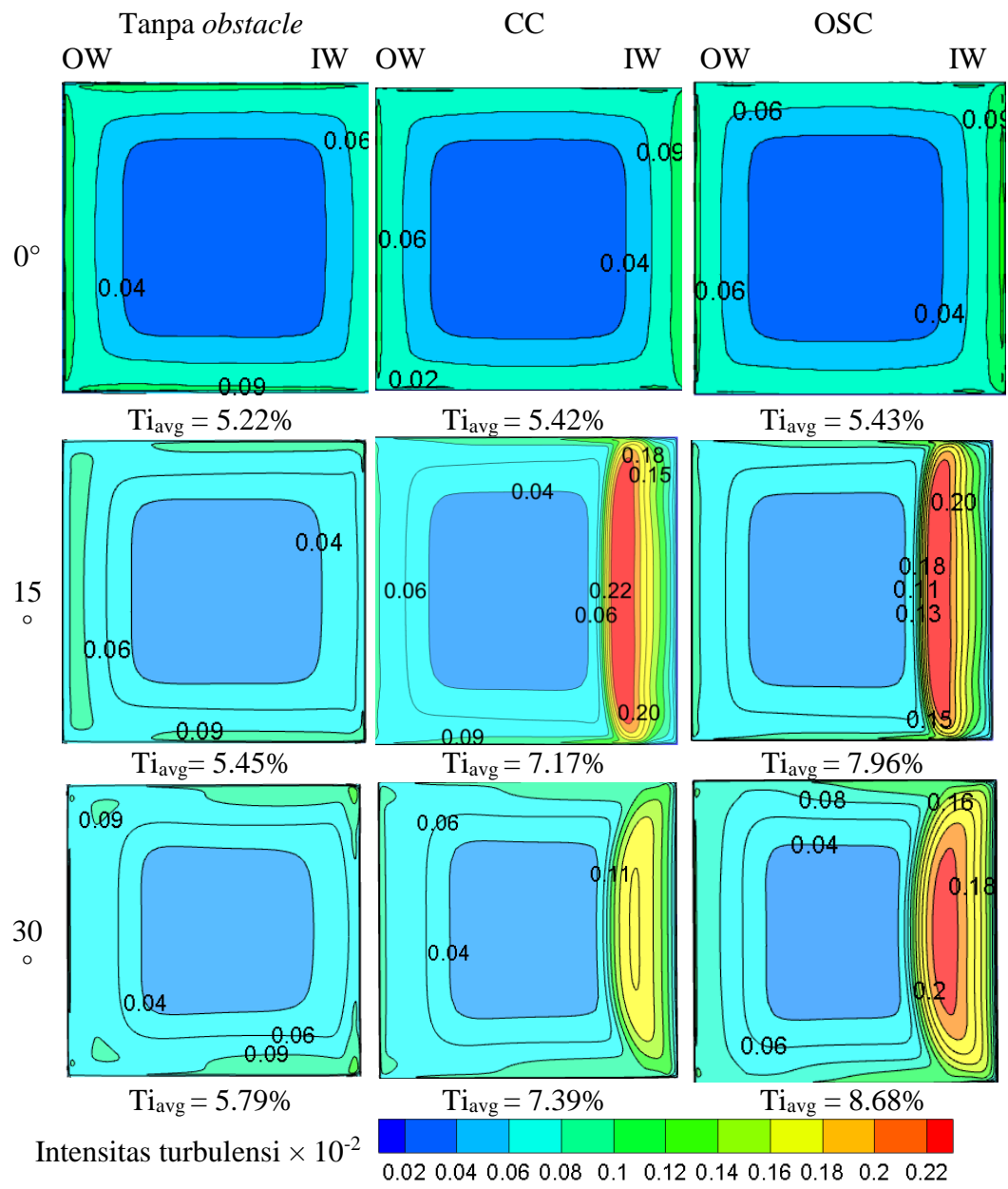
Pemasangan *obstacle* yang terletak di dekat dinding dalam dengan  $g/d$  sebesar 0.2 berdampak pada peningkatan intensitas turbulensi di dekat dinding. Peningkatan intensitas turbulensi tersebut dapat ditunjukkan kontur pada penampang di sepanjang *elbow* dan *downstream*. Gambar 4.16 dan 4.17 menunjukkan kontur intensitas turbulensi pada *elbow region* pada penampang  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  dan  $90^\circ$  untuk masing-masing variasi *obstacle*. Nilai rata-rata dari kontur intensitas turbulensi juga ditunjukkan pada tiap penampang. Pemasangan *obstacle* memberikan pengaruh yang signifikan pada kenaikan nilai intensitas turbulensi yang mulai terlihat pada penampang  $15^\circ$  hingga  $90^\circ$ . Pada  $15^\circ$  mulai terjadi peningkatan nilai intensitas turbulensi di sisi dinding dalam *elbow*  $90^\circ$ . Hal ini merupakan pengaruh dari interaksi antara *shear layer* dari *obstacle* dengan *boundary layer* dinding dalam *elbow*  $90^\circ$ . Terdapat perbedaan nilai intensitas turbulensi pada penampang OSC dan CC. hal ini dikarenakan OSC menghasilkan tingkat keacakaan fluida yang lebih besar dibanding CC. Pada penampang  $15^\circ$  dapat dilihat bahwa zona yang berwarna merah untuk OSC lebih besar dibanding dengan zona yang berwarna merah pada CC.



Gambar 4. 14 vektor kecepatan pada kelengkungan penampang *elbow*  $90^\circ$

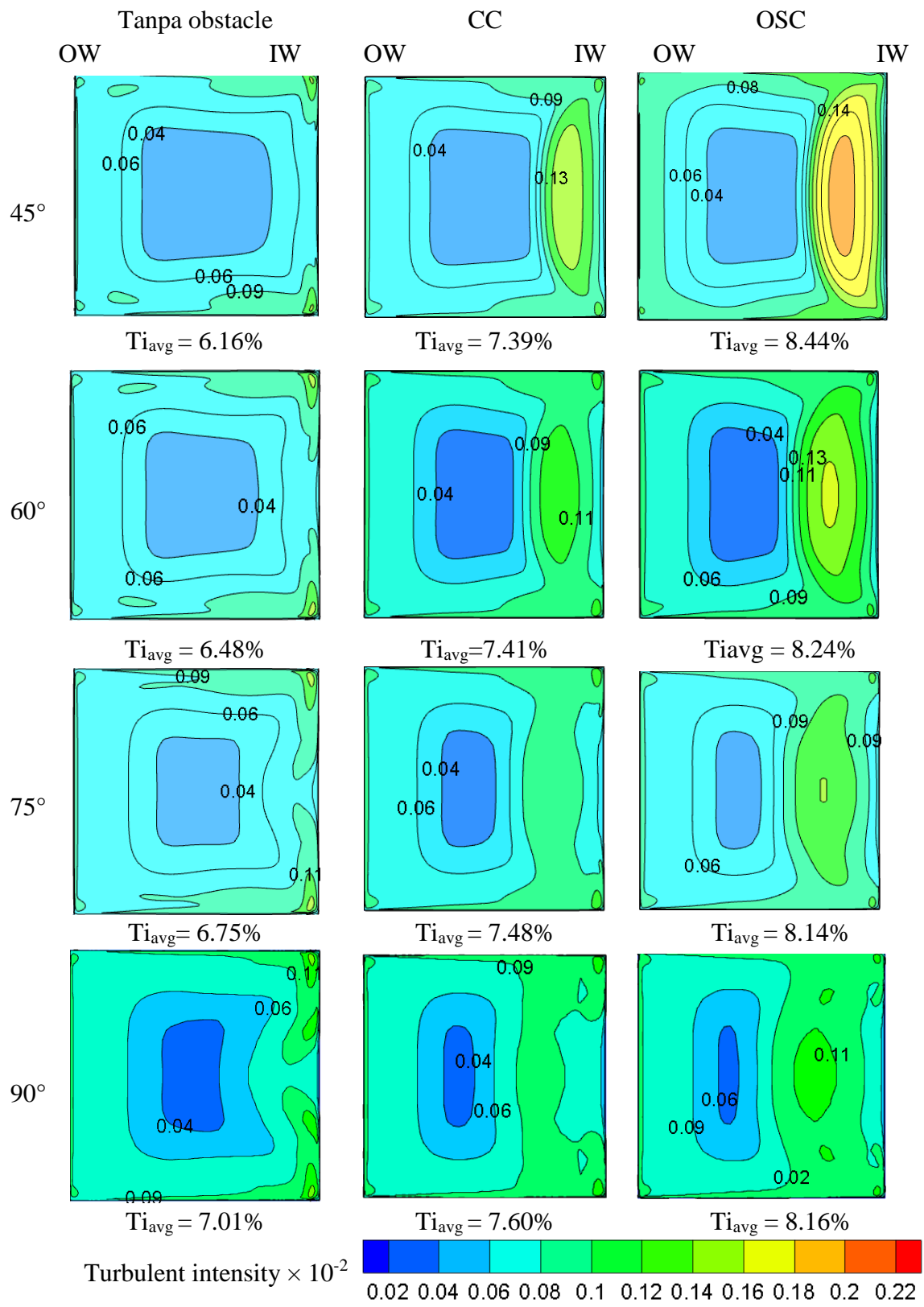


Gambar 4. 15 vektor kecepatan di sepanjang *downstream duct*.



Gambar 4. 16 intensitas turbulensi pada penampang  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ , dan  $45^\circ$





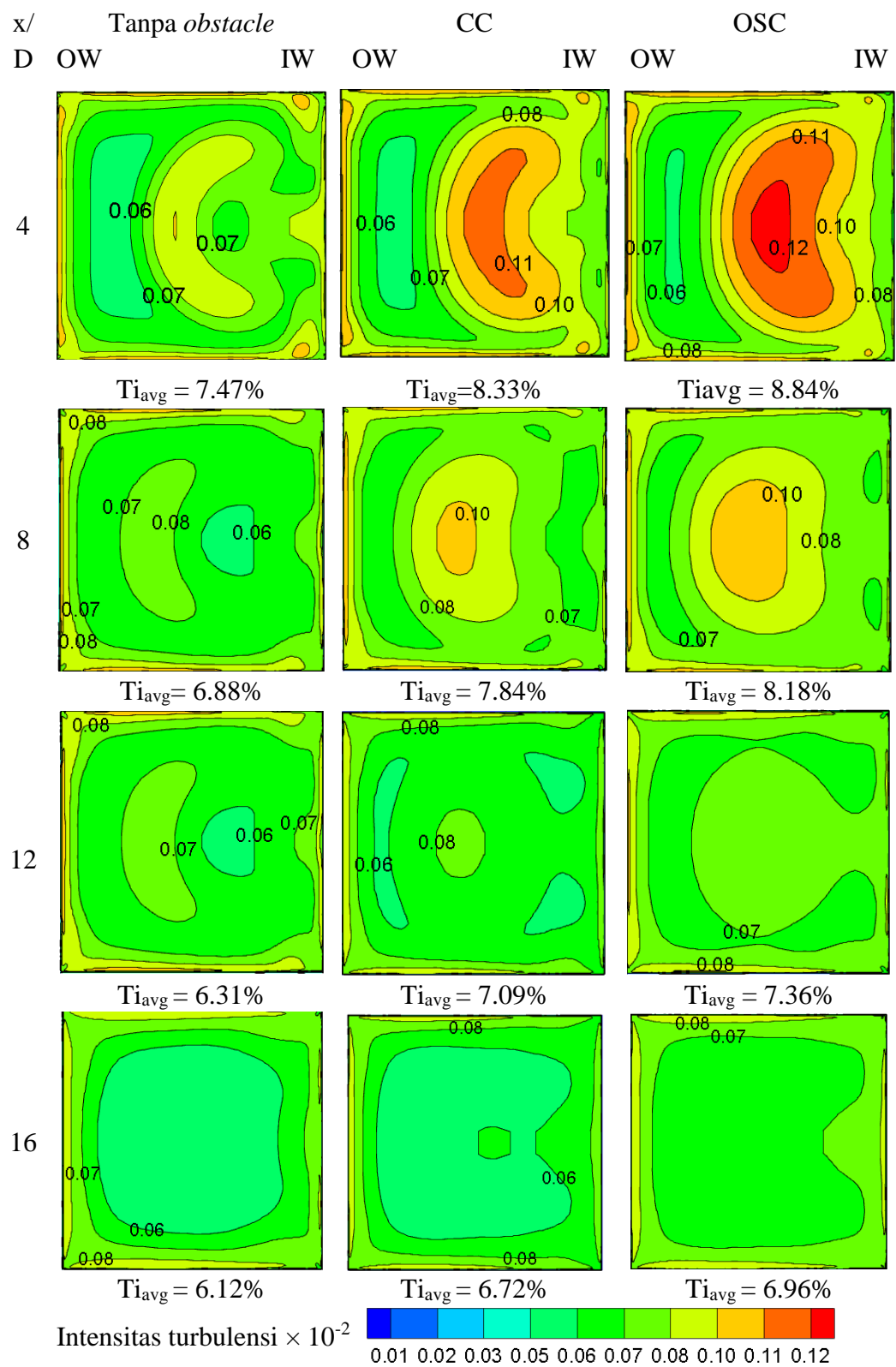
Gambar 4. 17 intensitas turbulensi pada penampang 60°, 75°, dan 90°

Gambar 4.17 menunjukkan kontur turbulent intensity di *downstream region* pada penampang  $x/D_h=4$ ,  $x/D_h=8$ ,  $x/D_h=12$  dan  $x/D_h=16$  untuk masing-masing variasi *obstacle*. Berdasarkan Gambar 4.17 untuk variasi OSC dan CC dapat dilihat bahwa masih terdapat hasil peningkatan TI dari *obstacle* yang dipasang pada *elbow region*. Hal ini membuktikan *shear layer* hasil interaksi antara *shear layer* dari *obstacle* dengan *boundary layer* masih berpengaruh hingga pada penampang  $x/D_h = 8$ . Pada  $x/D_h = 12$ , dan  $x/D_h = 16$ .

Gambar 4.19, 4.20 dan 4.21 menunjukkan kontur *skin friction coefficients* pada dinding *elbow* untuk masing-masing variasi *obstacle*. Penempatan *obstacle* pada dinding dalam *elbow*  $90^\circ$  memberikan dampak berupa menurunnya nilai *skin friction coefficients* terutama pada bagian di dekat dinding atas dan dinding bawah. Terdapat peningkatan *skin friction* pada bagian di dekat *inlet inner wall* pada  $\alpha = 2^\circ - 4^\circ$ . Hal ini dikarenakan posisi peletakan *obstacle*  $\alpha = 4^\circ$ , dan  $g/d = 0.2$ . Adanya celah antara dinding *obstacle* dengan dinding *inner wall* yang menyerupai konstruksi *nozzle* menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan pada area tersebut sehingga menyebabkan meningkatnya *laminar shear stress*.

Kontur *skin friction coefficient* pada dinding atas dan dinding luar *elbow*  $90^\circ$  menunjukkan hasil yang berbeda dengan kontur *skin friction coefficient* pada dinding dalam. Terjadi sedikit peningkatan nilai *skin friction coefficient* pada dinding atas dan dinding luar. Peningkatan pada dinding luar *elbow* dan dinding atas *elbow* disebabkan oleh aliran yang cenderung bergerak menghindari celah antara *obstacle* dengan *inner wall elbow*  $90^\circ$ . hal ini mengakibatkan semakin besar gradient kecepatan di dekat dinding luar & dinding atas *elbow*  $90^\circ$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3. Semakin besar gradient kecepatan di dekat dinding luar & dinding atas *elbow*  $90^\circ$  menyebabkan meningkatnya *laminar shear stress*.

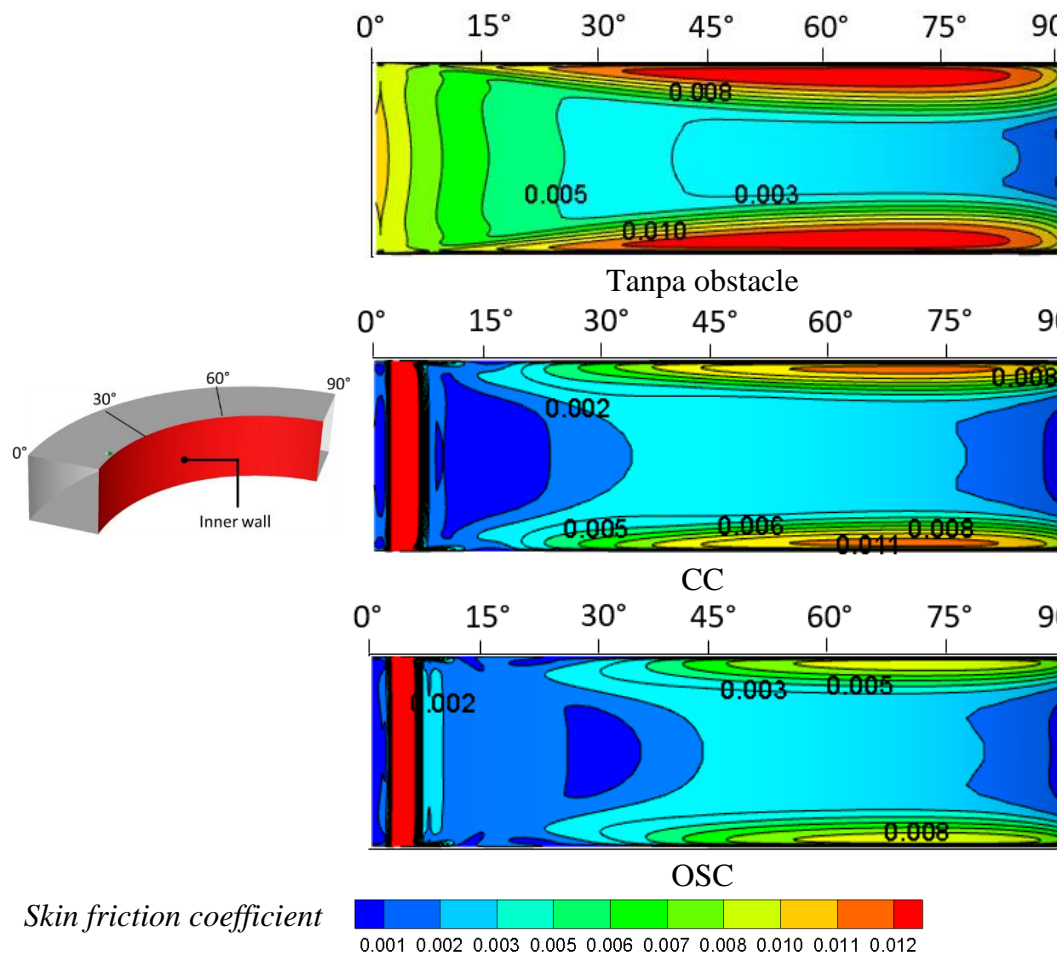
Pengaruh dari kenaikan turbulent intensity pada bagian *downstream* berpengaruh terhadap *skin friction coefficient* pada bagian *downstream*. Gambar 4.22, 4.23 dan 4.24 menjelaskan kontur *skin friction coefficient* pada bagian dinding *downstream*. Gambar tersebut difokuskan pada bagian  $x/D_h = 0$  hingga  $x/D_h = 6$ .



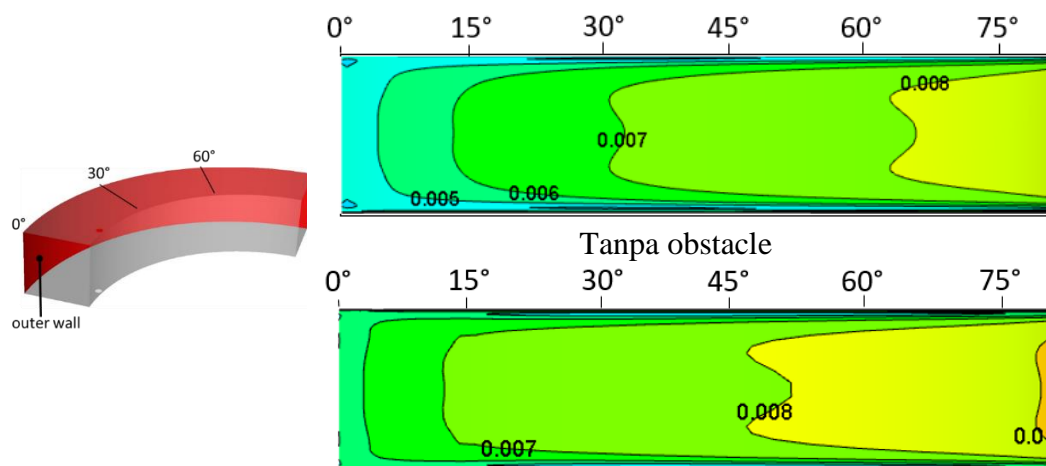
Gambar 4. 18 intensitas turbulensi pada penampang disepanjang *downstream duct*

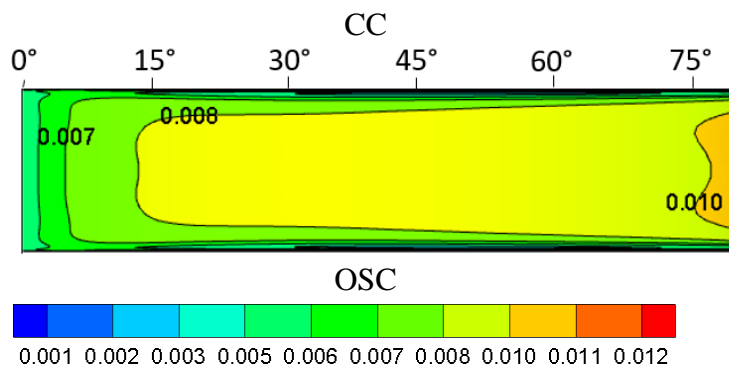
Pada bagian dinding dalam *downstream* terlihat jelas bahwa pemasangan *obstacle* memberikan pengaruh yang signifikan dalam menurunkan *skin friction*

*coefficient*. Terdapat perbedaan hasil di sisi dinding luar dan atas *downtream*. Berdasarkan gambar 4.19 dapat dilihat bahwa penggunaan *obstacle* sedikit menaikkan nilai *skin friction coefficient*. hal ini dapat dihubungkan dengan meningkatnya gradient kecepatan pada bagian tersebut.



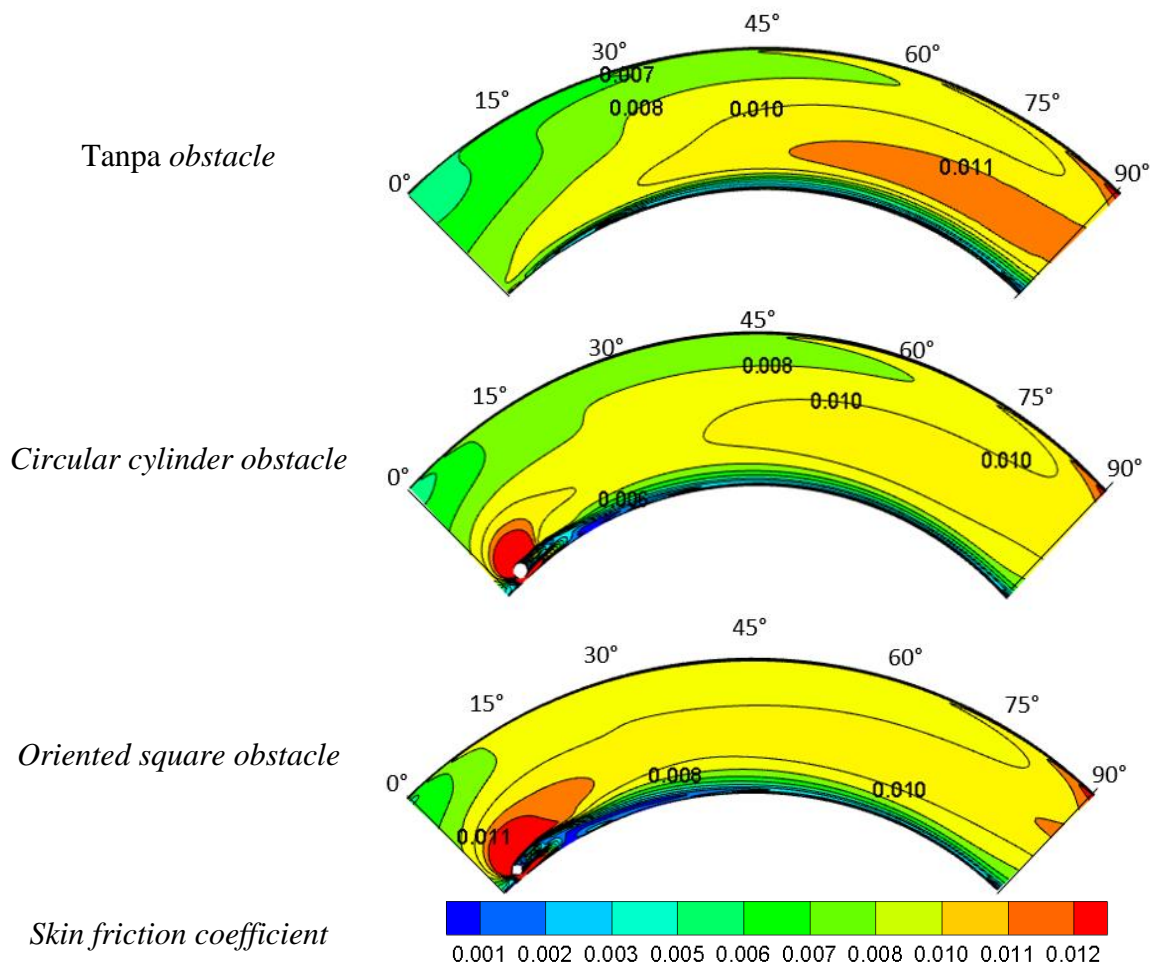
Gambar 4. 19 *skin friction coefficients* pada dinding dalam *elbow* 90°





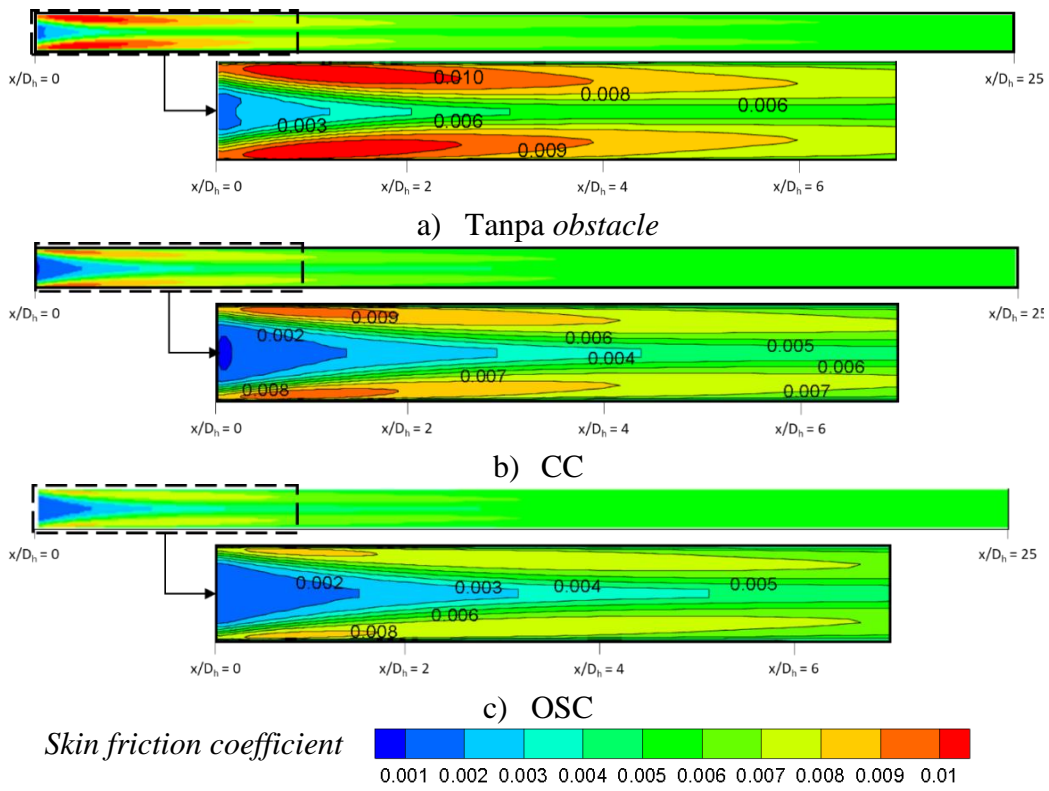
*Skin friction coefficient*

Gambar 4. 20 *skin friction coefficients* pada dinding luar elbow 90°

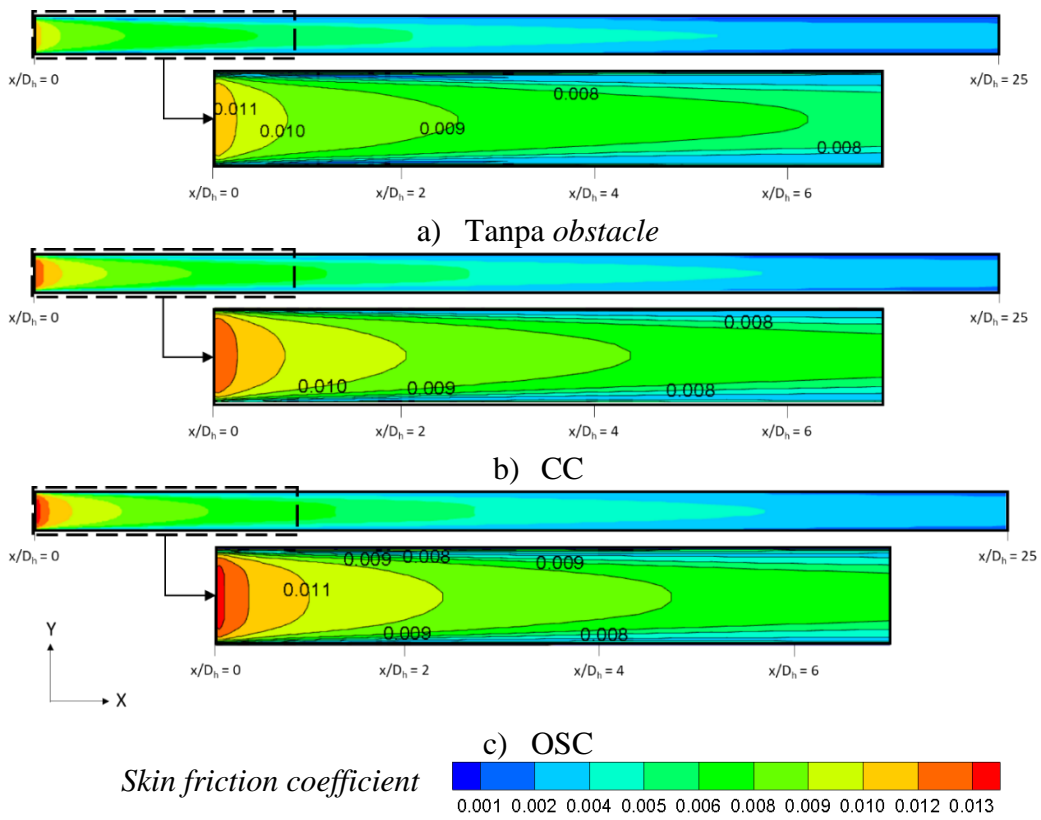


*Skin friction coefficient*

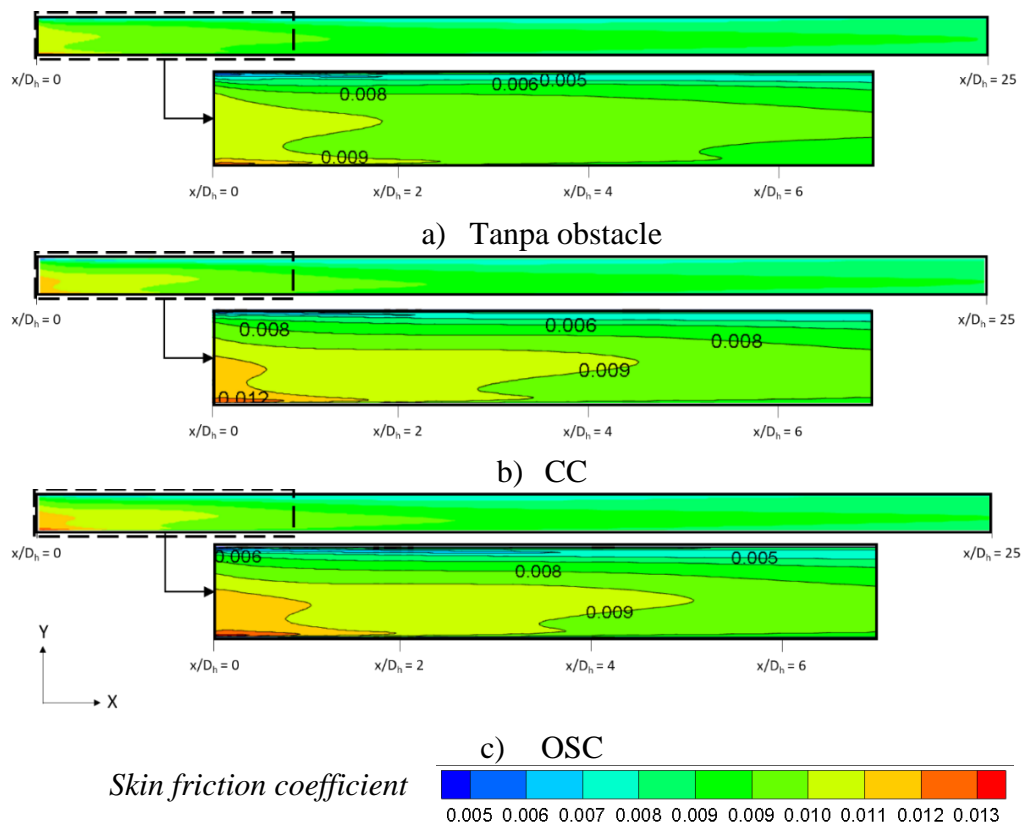
Gambar 4. 21 *skin friction coefficients* pada dinding atas elbow



Gambar 4. 22 *skin friction coefficients* pada dinding dalam *downstream*



Gambar 4. 23 *skin friction coefficients* pada dinding luar *downstream*



Gambar 4. 24 *skin friction coefficients* pada dinding atas *downstream*

## 4.2 Pengaruh penempatan obstacle ( $\alpha$ )

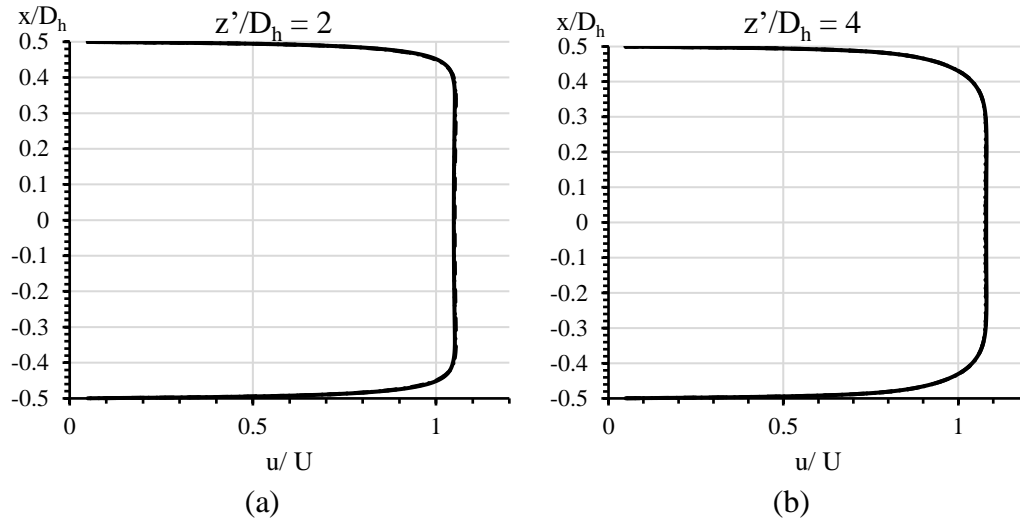
Pengaruh *angular position* terhadap karakteristik aliran juga akan dianalisa. *Velocity magnitude*, dan  $C_p$  pada variasi *angular position* ditunjukkan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi. Pada subbab ini dilakukan simulasi dengan menggunakan *obstacle* berupa *oriented square cylinder* dengan bilangan Reynolds  $4 \times 10^5$ .

### 4.2.1 Analisa data kuantitatif pada pengaruh angular position ( $\alpha$ )

Grafik *velocity magnitude* ditunjukkan di daerah *upstream*, *elbow*  $90^\circ$  dan *downstream* dari *duct*. Grafik tersebut berfungsi untuk menunjukkan kecenderungan aliran saat melewati *duct*. Kecenderungan aliran tersebut dapat dikorelasikan dengan besarnya *secondary flow* dan *laminar shear stress*.

Gambar 4.25 menunjukkan *velocity profile* pada  $z'/D_h = 2$  dan b)  $z'/D_h = 4$ . Perubahan *angular position* tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *velocity profile* pada daerah *upstream*. Hal ini mengindikasikan bahwa

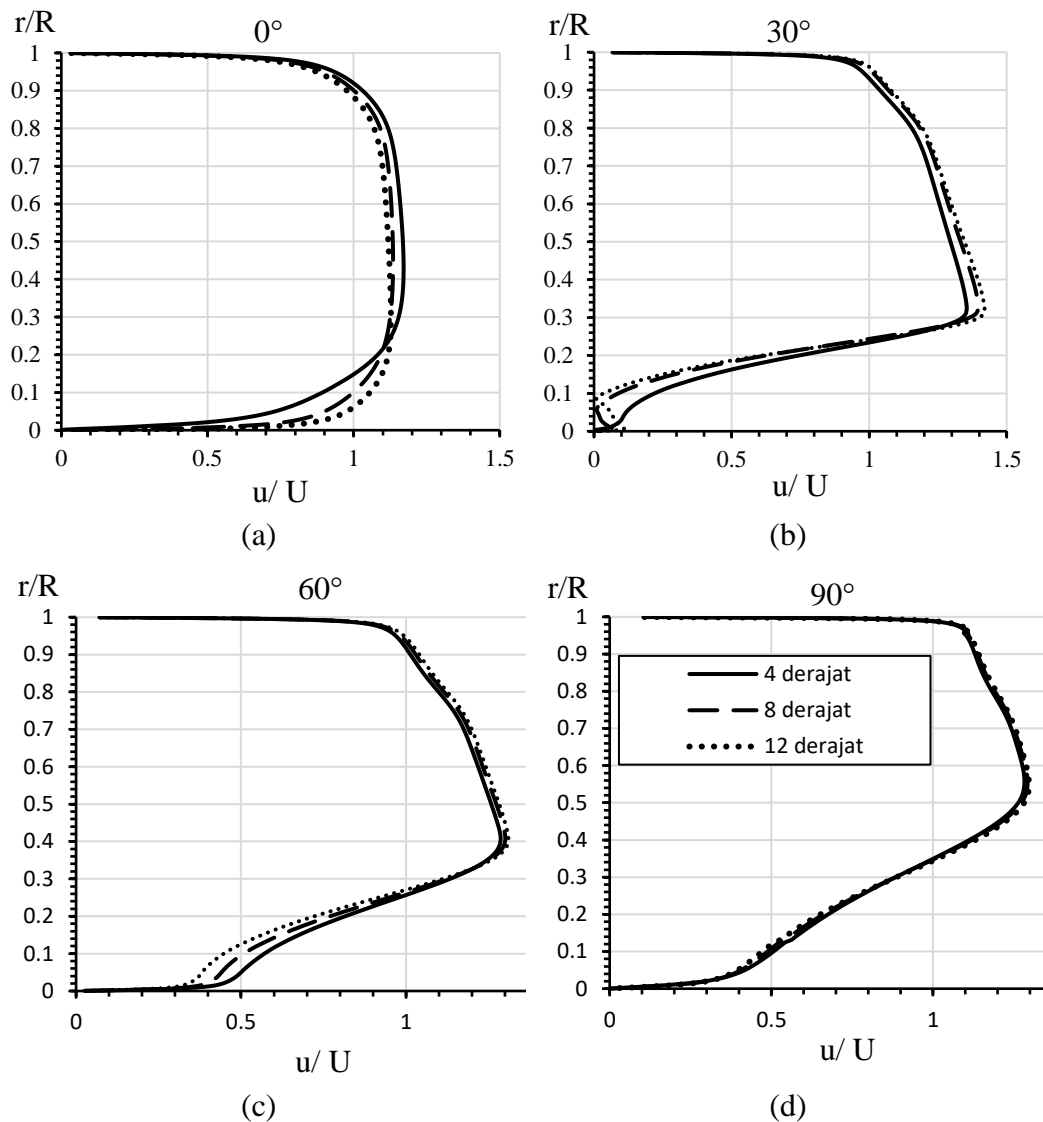
laminar *stress* pada daerah *upstream* bernilai tetap pada saat *angular position* divariasikan.



Gambar 4. 25 distribusi kecepatan pada (*upstream duct*): a)  $z'/D_h = 2$  dan b)  $z'/D_h = 4$ ;

Gambar 4.26 menunjukkan *velocity profile* di sepanjang penampang *elbow*  $90^\circ$ . Perubahan distribusi kecepatan terlihat dengan jelas pada di seluruh penampang *elbow*  $90^\circ$ . Pada penampang *inlet elbow*  $90^\circ$ , terdapat perbedaan momentum di dekat dinding dalam dan dinding luar *elbow*  $90^\circ$ . Perbedaan tersebut dikarenakan adanya *blockage effect* yang berasal dari posisi penempatan *obstacle*. Efek *blockage* tersebut menyebabkan fluida cenderung menghindari celah antara *obstacle* dengan dinding *inner wall elbow*  $90^\circ$ . Perubahan posisi angular yang semakin kecil menyebabkan efek *blockage* tersebut semakin bergerak ke arah *inlet elbow*  $90^\circ$ .



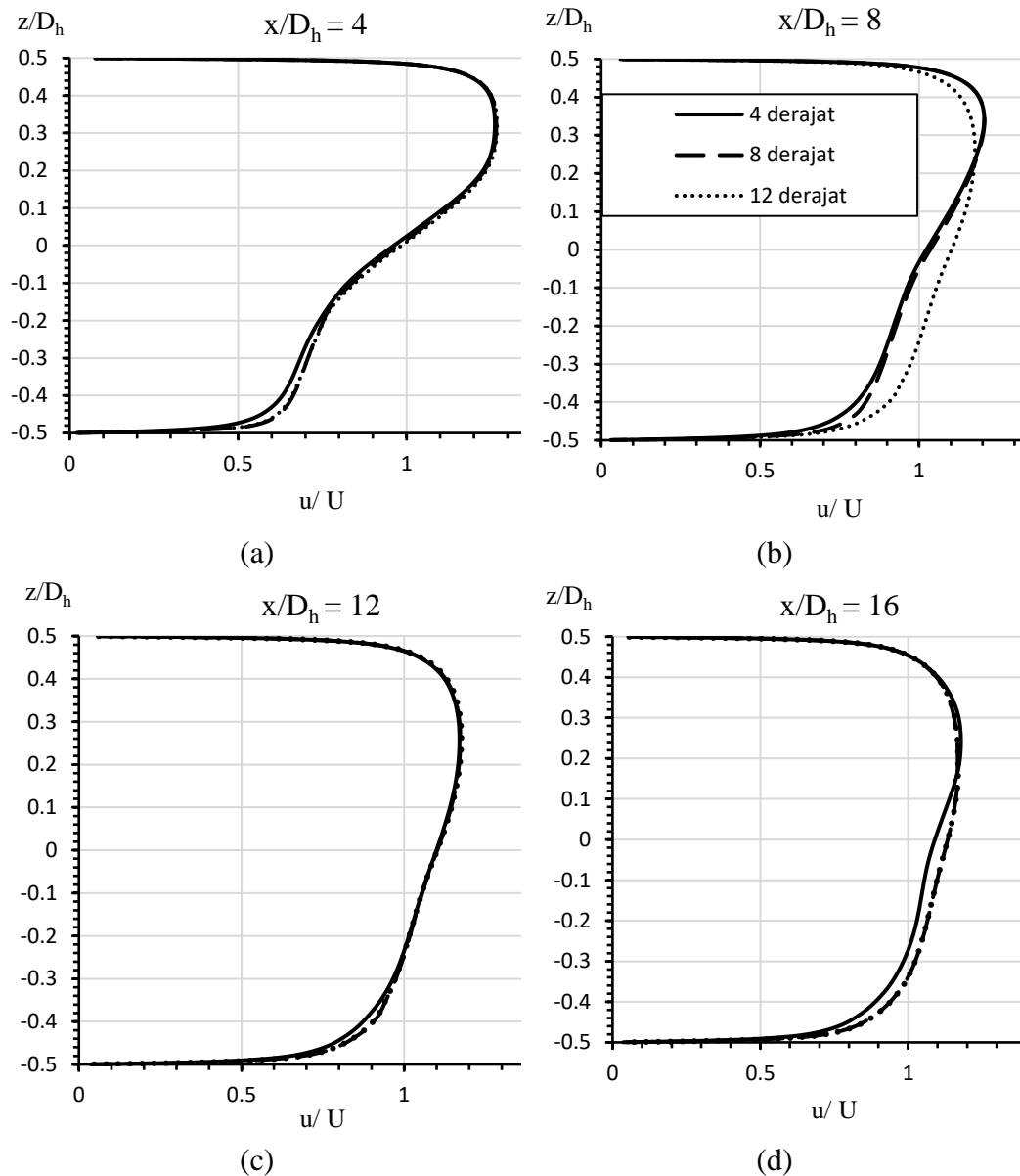


Gambar 4. 26 Distribusi kecepatan pada kelengkungan *elbow*  $90^\circ$  pada bilangan  $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$

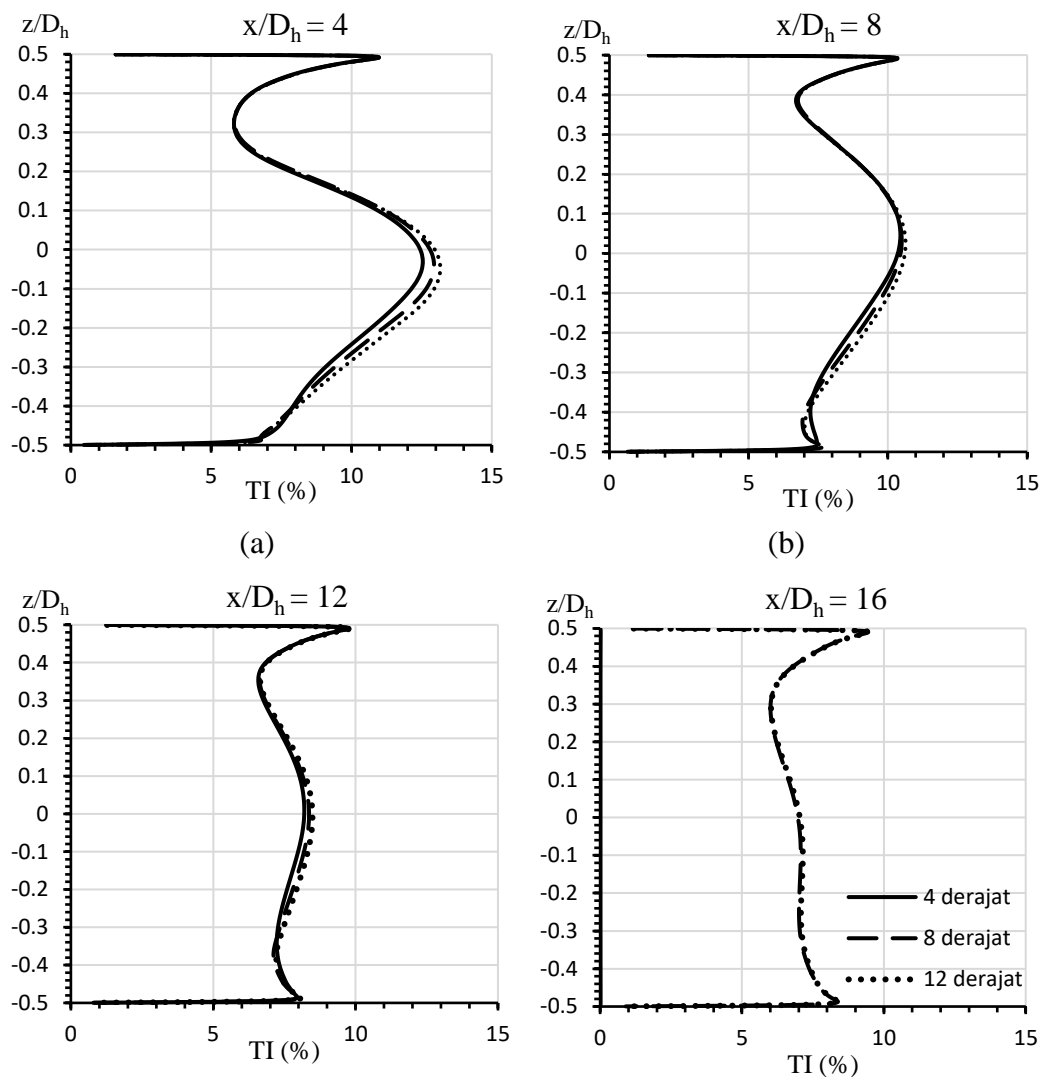
Pada daerah *downstream* (gambar 4.27) dapat dilihat bahwa momentum pada dinding dalam *downstream* cenderung meningkat, di sisi lain momentum pada sisi dinding luar *downstream* menurun untuk seluruh variasi angular position. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan kecuali pada  $x/D_h = 8$ , pada bagian tersebut ada sedikit peningkatan *inner wall downstream* dan penurunan *outer wall downstream* pada angular position  $8^\circ$  dan  $12^\circ$ .

Gambar 4.28 menjelaskan tentang grafik intensitas turbulensi di sepanjang *elbow*  $90^\circ$  dengan variasi *angular position*. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa distribusi turbulent intensity semakin tinggi pada penempatan

*obstacle* yang semakin dekat dengan *downstream*. Tingginya distribusi turbulent intensitas tersebut bukan disebabkan oleh semakin meningkatnya turbulent intensity hasil interaksi *shear layer*, namun dikarenakan titik awal terjadinya pelepasan energy atau disipasi sedikit bergerak ke arah *downstream*.



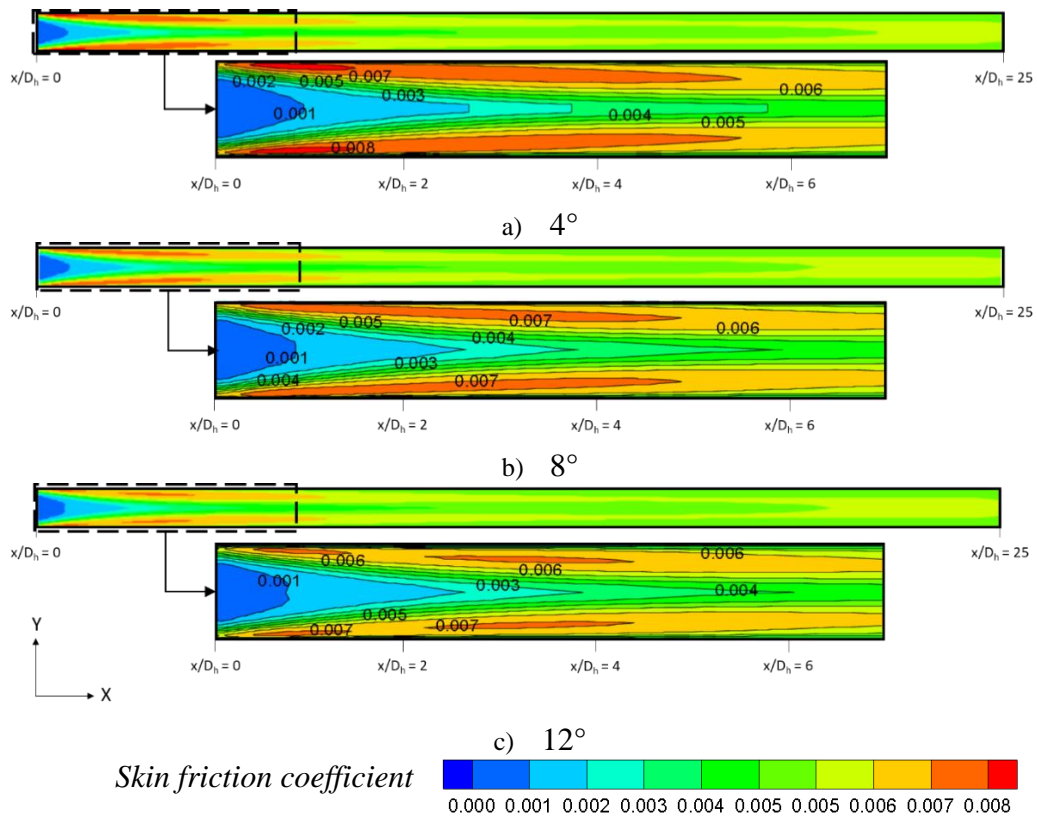
Gambar 4. 27 distribusi kecepatan disepanjang *downstream duct* pada bilangan  $Re_{Dh} = 4 \times 10^4$  (OSC)



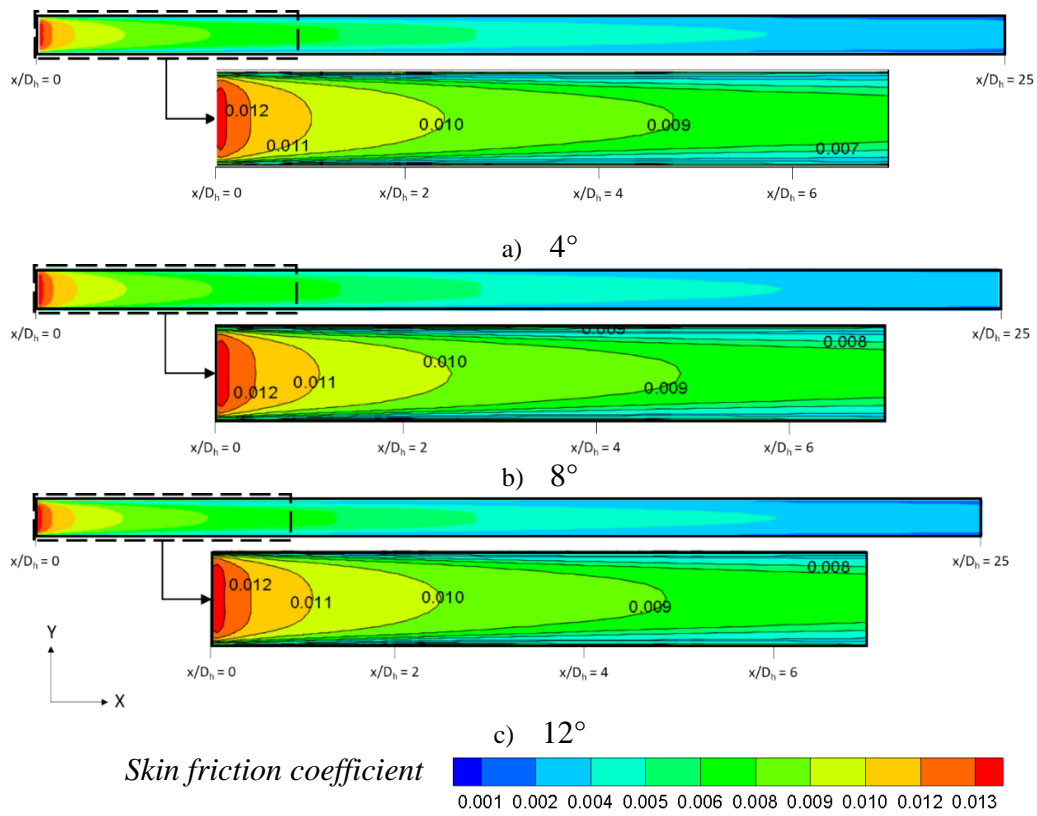
Gambar 4. 28 intensitas turbulensi disepanjang *downstream* pada bilangan  $Re_{D_h} = 4 \times 10^4$  (OSC)

#### 4.2.1 Analisa data kualitatif pada pengaruh *angular position* ( $\alpha$ )

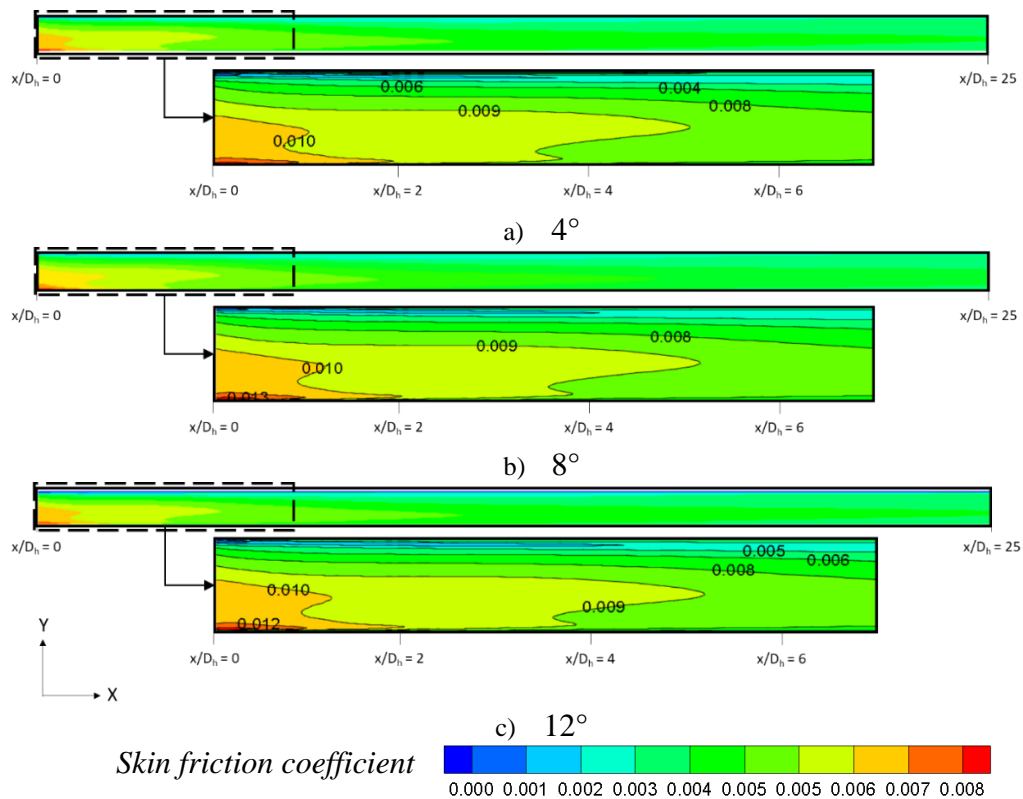
*Skin friction coefficient* pada dinding *downstream* ditunjukkan dalam berupa kontur. Pada kontur tersebut dapat diketahui pengaruh dari *angular position* terhadap nilai *skin friction coefficient*. Kontur tersebut menunjukkan dinding atas, luar dan dalam dari *downstream*. Berdasarkan kontur *skin friction coefficient* pada dinding dalam yang ditampilkan pada gambar 4.29, dapat diketahui bahwa pemasangan *obstacle* dengan *angular position* yang lebih besar berpengaruh terhadap pengurangan nilai *skin friction coefficient*. Penurunan *skin friction coefficient* tidak berlaku pada dinding atas dan luar *downstream*.



Gambar 4. 29 *skin friction coefficients* pada dinding dalam *downstream*



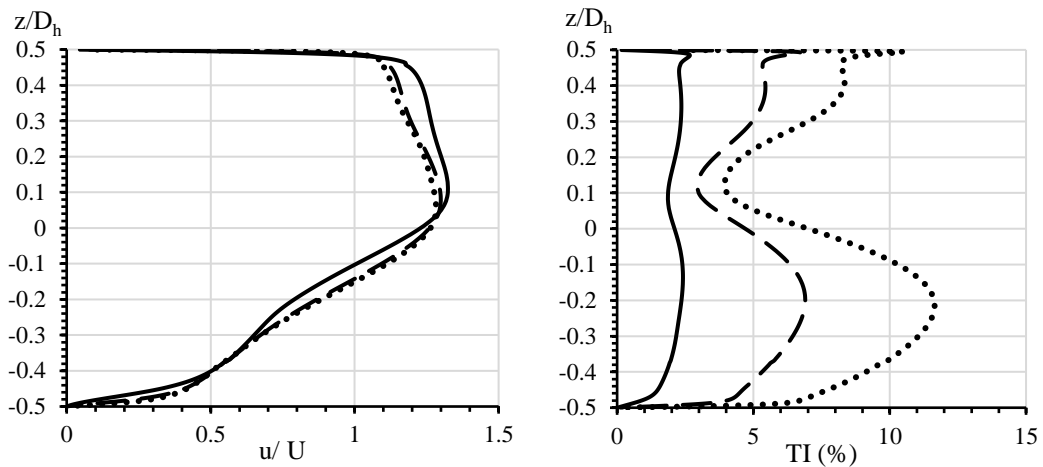
Gambar 4. 30 *skin friction coefficients* pada dinding luar *downstream*



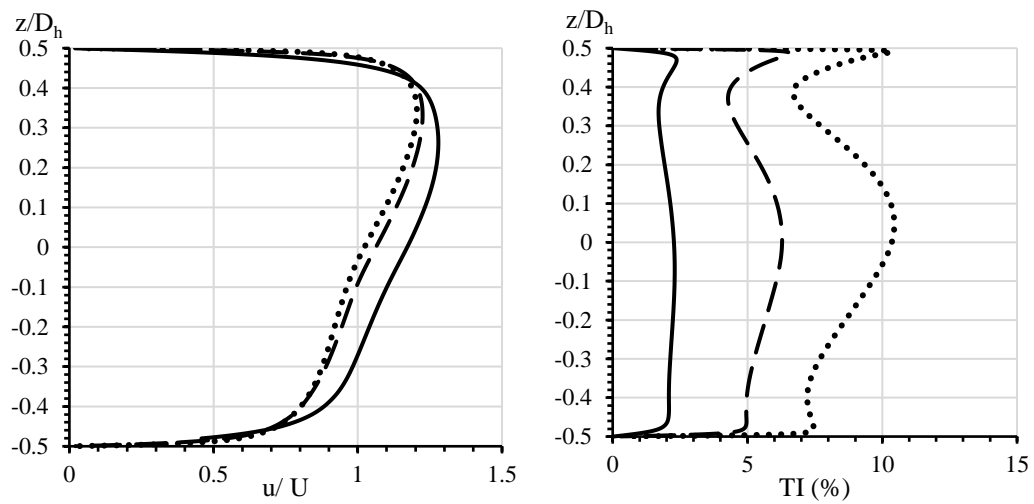
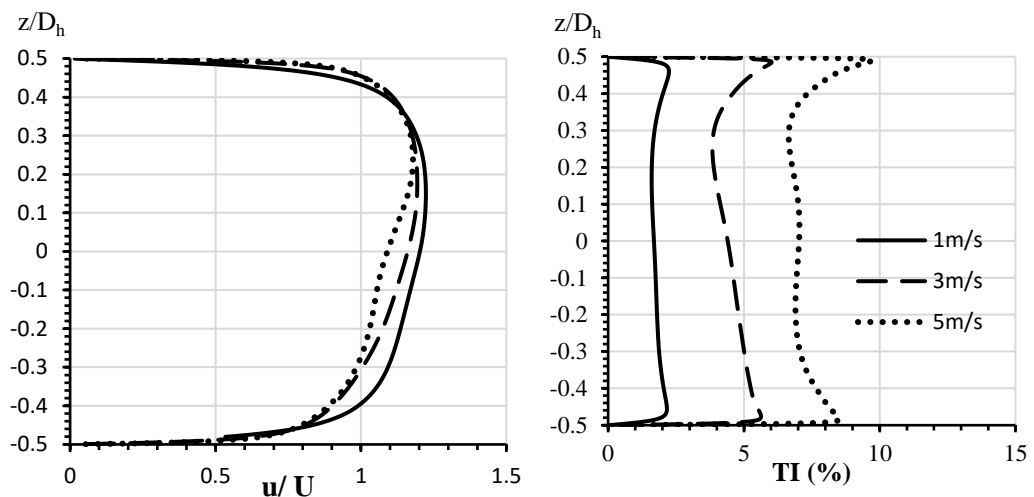
Gambar 4. 31 *skin friction coefficients* pada dinding atas *downstream*

### 4.3 Pengaruh bilangan Reynolds ( $Re_{Dh}$ )

Peningkatan kecepatan aliran berdampak pada meningkatnya perbedaan tekanan pada dinding luar dan dalam *elbow* 90°. Peningkatan *secondary flow* yang terbentuk menyebabkan meningkatnya momentum di sisi *outer wall elbow* dan menurunnya dinding dalam *elbow*. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.32. Pada gambar tersebut dapat dilihat peningkatan kecepatan menyebabkan meningkatnya momentum di sisi dinding luar *elbow* disepanjang *downstream*. Di sisi lain, aliran yang memiliki kecepatan yang lebih tinggi mampu meningkatkan *turbulent intensity* yang merupakan hasil interaksi antara *shear layer* dari *obstacle* dengan *boundary layer*. Peningkatan *turbulent intensity* dapat terlihat jelas pada gambar 4.32 dengan variasi Reynolds number.



(a) Outlet elbow 90°

(b)  $x/D_h = 8$ (c)  $x/D_h = 16$ 

Gambar 4. 32 distribusi kecepatan dan intensitas turbulensi disepanjang *downstream* pada variasi bilangan Reynolds (OSC)

## 4.4 Diskusi

### 4.4.1 Pengaruh bentuk *obstacle*

Pengaruh bentuk *obstacle* mempengaruhi karakteristik aliran pada bagian *elbow* 90° dan *downstream*. Pada sisi *upstream*, bentuk *obstacle* tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan. Pengaruh dari *obstacle* tersebut telah ditunjukkan dengan data *velocity magnitude*, *turbulent intensity*, *skin friction coefficient* dan distribusi tekanan di sepanjang dinding *elbow* 90°.

Pada daerah *elbow* 90°, bentuk *obstacle* memberikan pengaruh yang cukup signifikan. Peningkatan *pressure drop* pada variasi OSC dan CC disebabkan :1) adanya badan pengganggu yang menyebabkan *friction losses*, 2) *wake* pada bagian belakang *cylinder* yang menyebabkan peningkatan *skin friction drag* dan *pressure drag*, dan 3) *wake* yang terbentuk di sudut  $\pm 10^\circ$  pada dinding dalam *elbow* 90° menyebabkan *pressure drag* tambahan.

Pada variasi OSC terdapat peningkatan *pressure drop* yang lebih besar dibandingkan dengan CC. Hal ini dapat dijelaskan dengan lebih lebarnya *wake* yang terbentuk pada variasi OSC sehingga *pressure drag* aliran semakin membesar [12], lebih lebarnya *wake* yang terbentuk pada OSC dapat dilihat pada gambar 4.13 (b). *Wake* yang lebih lebar berdampak pada semakin kecilnya momentum pada bagian dinding dalam *elbow* 90°. Di sisi lain, OSC mampu memberikan peningkatan intensitas turbulensi yang lebih besar terutama di daerah dekat dinding dalam *elbow* 90° seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6. dan 4.16 [12]. Kontur dan nilai *skin friction coefficient* untuk *inner elbow* 90° pada gambar 4.19 membuktikan bahwa *wall shear stress* pada bagian tersebut berkurang.

Fenomena yang terjadi di daerah *downstream* hampir sama dengan fenomena yang terjadi di *elbow* 90°. Momentum aliran di dekat dinding dalam *elbow* 90° pada variasi CC dan OSC lebih rendah dibandingkan momentum aliran pada variasi tanpa *obstacle* [25]. Di sisi lain momentum aliran pada variasi CC dan OSC pada dinding luar *elbow* 90° lebih besar dibandingkan momentum pada variasi tanpa *obstacle*. Fenomena tersebut menyebabkan adanya peningkatan *laminar stress* pada daerah dekat dinding luar *downstream* dan penurunan *laminar stress* pada daerah dekat dinding dalam *downstream*. Peningkatan *turbulent intensity* yang pada mulanya terjadi di daerah di dekat dinding dalam *elbow* 90° bergerak ke

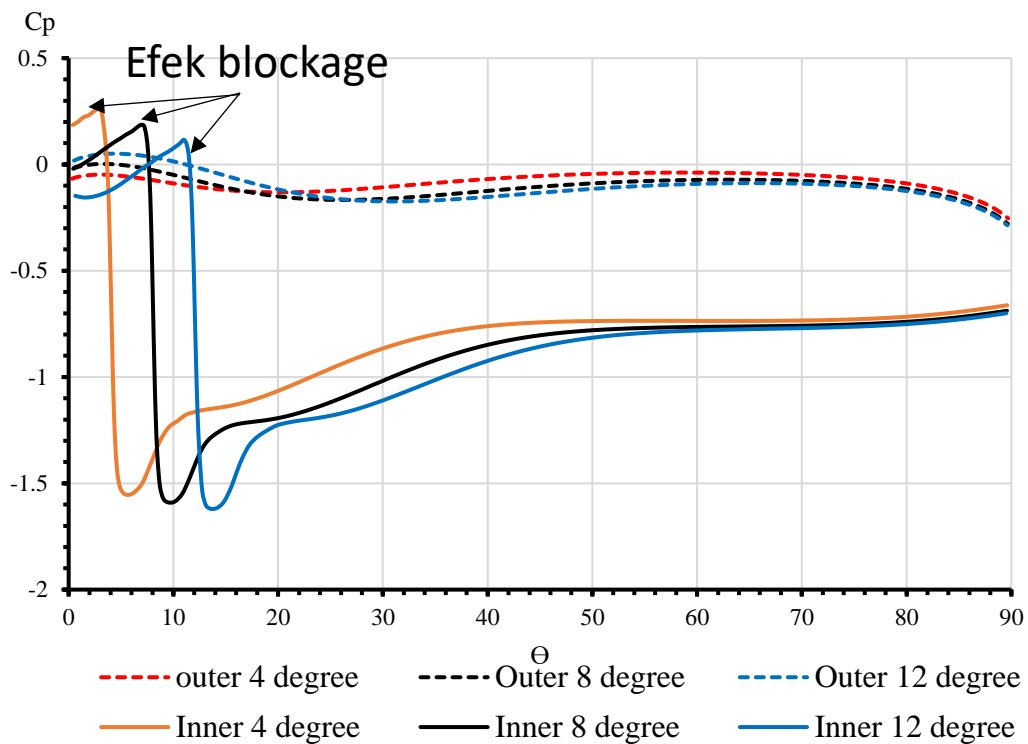
daerah tengah akibat *secondary flow*. Hal ini mempersulit untuk mengetahui apakah terjadi peningkatan *shear stress* pada bagian *inner* dan *outer wall elbow 90°* sehingga untuk mengetahui apakah seberapa besar gaya geser yang terjadi maka digunakan parameter *skin friction coefficient*. Berdasarkan kontur dan grafik *skin friction coefficient* pada gambar 4.22 diketahui bahwa terdapat penurunan *skin friction coefficient* yang signifikan pada dinding dalam *downstream*. Pada dinding luar *downstream* dan dinding atas *downstream* terdapat perbedaan yang tidak signifikan untuk variasi tanpa *obstacle* dan dengan *obstacle*. Penurunan *skin friction coefficient* pada *downstream* menyebabkan turunnya *pressure drop* aliran pada daerah tersebut.

#### 4.4.2 Pengaruh *angular position*

*Angular position* mempengaruhi karakteristik aliran terutama pada *upstream* dan *downstream*. Pada sisi *elbow 90°*, *angular position* tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan. Pengaruh dari *angular position* tersebut telah ditunjukkan dengan data *velocity magnitude*, *turbulent intensity*, *skin friction coefficient* dan distribusi tekanan di sepanjang dinding *elbow 90°*.

Grafik koefisien tekanan di sepanjang dinding dalam dan luar *elbow 90°* ditampilkan untuk membantu memahami pengaruh dari *angular position* terhadap *pressure drop* di sisi *upstream*. Grafik koefisien tekanan yang ditunjukkan pada gambar 4.33, grafik tersebut telah sesuai dengan grafik  $C_p$  yang ditunjukkan pada gambar 2.20. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa penempatan *angular position* yang semakin dekat dengan *upstream* menyebabkan efek *blockage* semakin dekat dengan *upstream* dan semakin tinggi. Efek *blockage* tersebut dapat diindikasikan dengan kenaikan tekanan akibat aliran fluida bertumbukan dengan bagian depan *obstacle*. Kontur tekanan pada daerah *upstream* ditampilkan untuk melihat pengaruh efek *blockage*. Kontur tekanan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.35. Pada daerah tersebut dapat dilihat bahwa pada variasi (OSC)  $4^\circ$  terlihat ada efek *blockage* yang berada di daerah *upstream*. Hal ini yang menyebabkan tekanan statis pada penampang *inlet elbow 90°* meningkat.





Gambar 4. 33 koefisien tekanan dengan variasi bilangan Reynolds (OSC)

Penempatan *obstacle* yang semakin mendekati *upstream* menyebabkan semakin kecilnya turbulent intensity pada daerah *downstream*. Semakin kecilnya turbulent intensity tersebut disebabkan oleh terjadinya disipasi energi yang lebih awal sehingga turbulent intensity pada daerah *downstream* semakin mendekati keadaan semula. Hal ini menyebabkan pengaruh Reynolds stress pada daerah *downstream* lebih kecil untuk sudut  $4^\circ$  daripada  $8^\circ$  dan  $12^\circ$ .

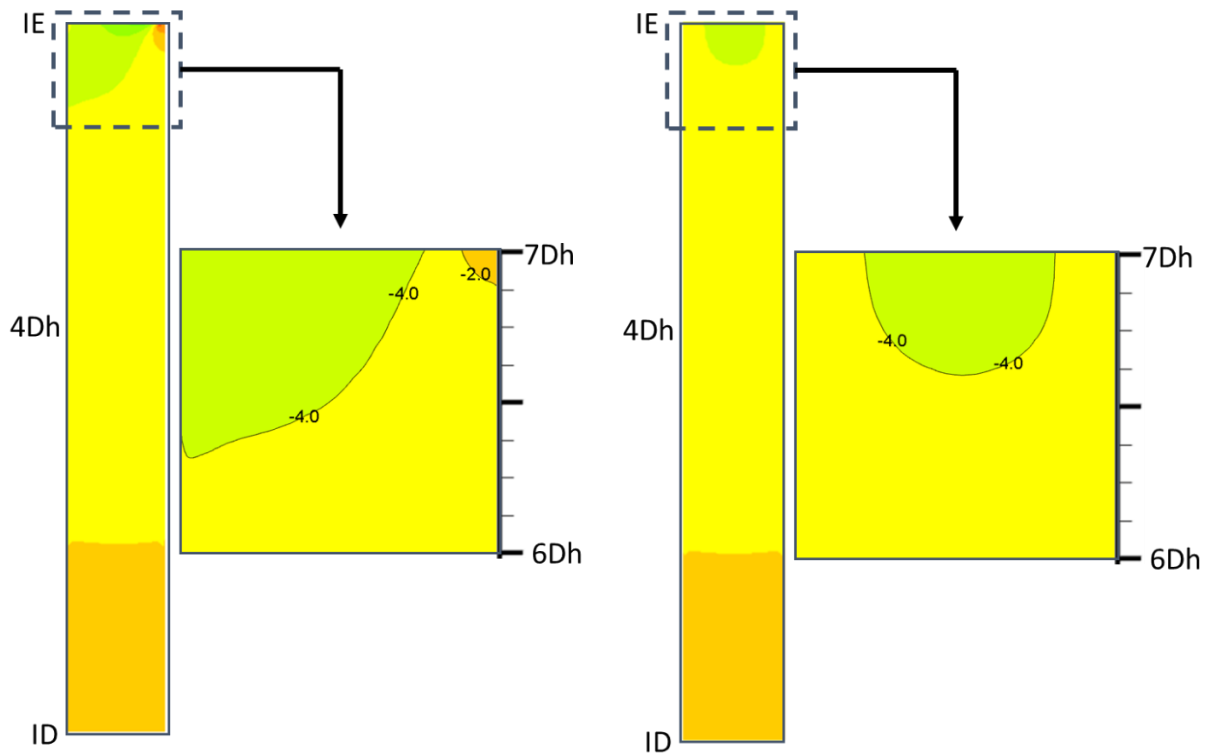
Pengaruh dari pengurangan momentum dan peningkatan intensitas turbulensi menyebabkan turunnya *shear stress*. *Obstacle* yang ditelakkan pada *angular position* yang semakin mengarah ke arah *downstream* berakibat pada turunnya *skin friction coefficient* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.29.

#### 4.4.3 Pengaruh bilangan Reynolds

*Dimensionless pressure drop* pada sisi *upstream* menurun seiring bilangan Reynolds ditingkatkan untuk variasi CC dan OSC. Penurunan *dimensionless pressure drop* tersebut disebabkan oleh beberapa hal salah satunya adalah *bubble separation* yang terbentuk pada bagian depan *obstacle*. *Bubble separation* di depan *obstacle* tersebut dapat dilihat pada gambar 4.36. *Bubble separation* tersebut

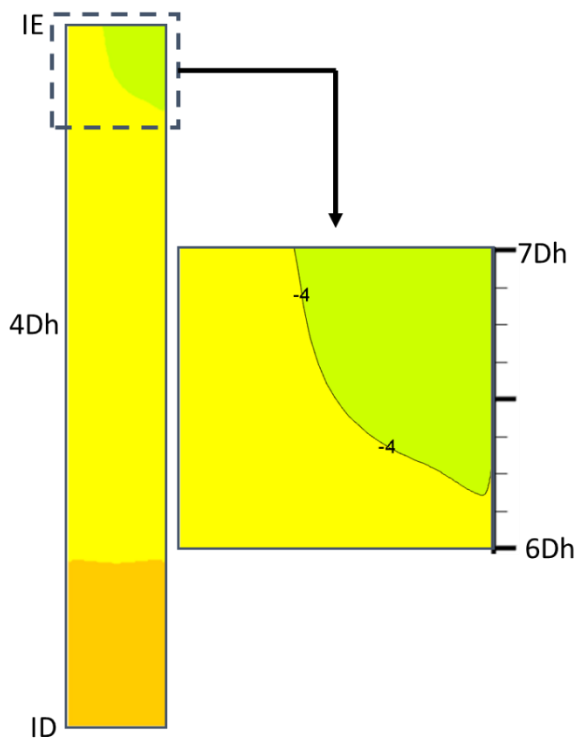
semakin mengecil seiring bilangan Reynold ditingkatkan. Hal ini dikarenakan momentum di sisi dinding dalam *elbow* 90° semakin membesar sehingga mampu melawan *adverse pressure gradient*. Semakin mengecilnya *bubble separation* tersebut menyebabkan titik *reattachment point* semakin maju ke arah *upstream*. Hal ini berdampak pada mengecilnya *skin friction drag* dan *pressure drag*. Fenomena terbentuknya *wake* pada bagian depan *cylinder* juga dapat ditemui pada beberapa referensi dapat dilihat pada gambar 2.21.

Untuk memahami pengaruh dari bilangan Reynolds terhadap kenaikan *pressure drop* pada daerah *elbow* 90°, maka perlu dipahami fenomena apa saja yang terjadi pada daerah tersebut. Fenomena pada *elbow* 90° dapat dengan mudah dipahami dengan cara melihat grafik  $C_p$  pada gambar 36. Pada gambar tersebut dapat dilihat pengaruh bilangan Reynolds terhadap koefisien tekanan pada dinding dalam dan dinding luar *elbow* 90°. Bilangan Reynolds tidak terlalu berpengaruh terhadap perubahan koefisien tekanan di sisi luar maupun dalam. Terdapat sedikit pengaruh berupa kenaikan koefisien tekanan di dinding luar elbow pada sudut 0°-4°. Bilangan Reynolds yang lebih tinggi memiliki kenaikan koefisien tekanan yang lebih tinggi pada sudut tersebut. Fenomena perubahan koefisien tekanan yang tidak signifikan terhadap Reynolds number tersebut telah sesuai dengan referensi [36]. Pada penelitian tersebut terdapat perubahan bilangan Reynolds rata-rata berkisar  $\pm 30000$ . Perubahan bilangan Reynolds 30000 memberikan efek kenaikan tekanan di sisi dinding luar dan penurunan di dinding dalam yang tidak signifikan. Pada penelitian kali ini perubahan Reynolds yang dilakukan cukup kecil yaitu  $Re_{Dh(1m/s)} = 0.8 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh(3m/s)} = 2.4 \times 10^4$ , dan  $Re_{Dh(5m/s)} = 4.0 \times 10^4$ , sehingga memiliki dampak yang cukup kecil terhadap perubahan  $C_p$  pada elbow region.

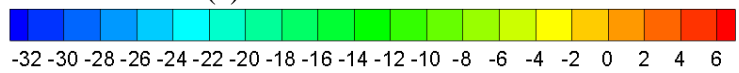


(a)

(b)

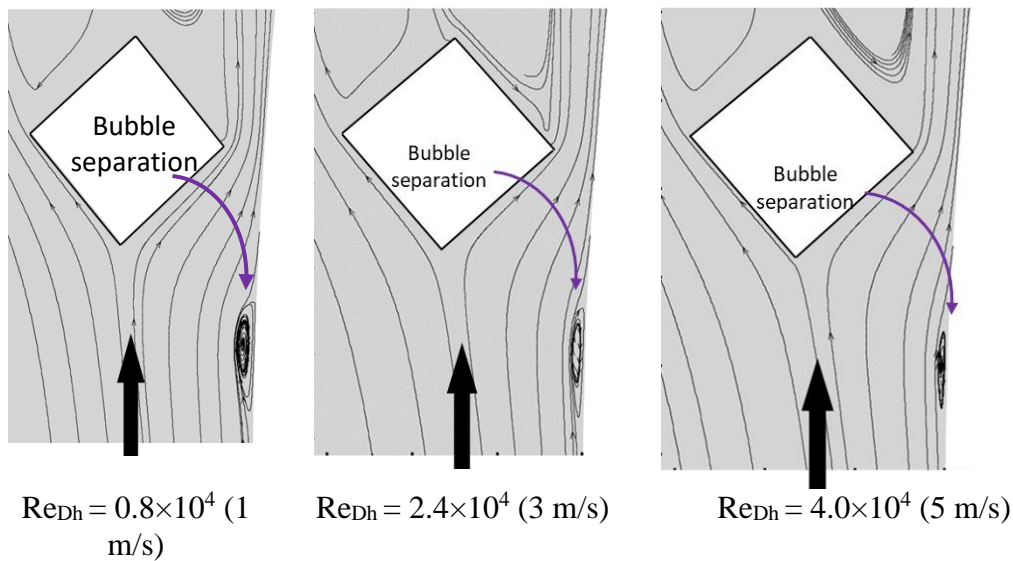


(c)



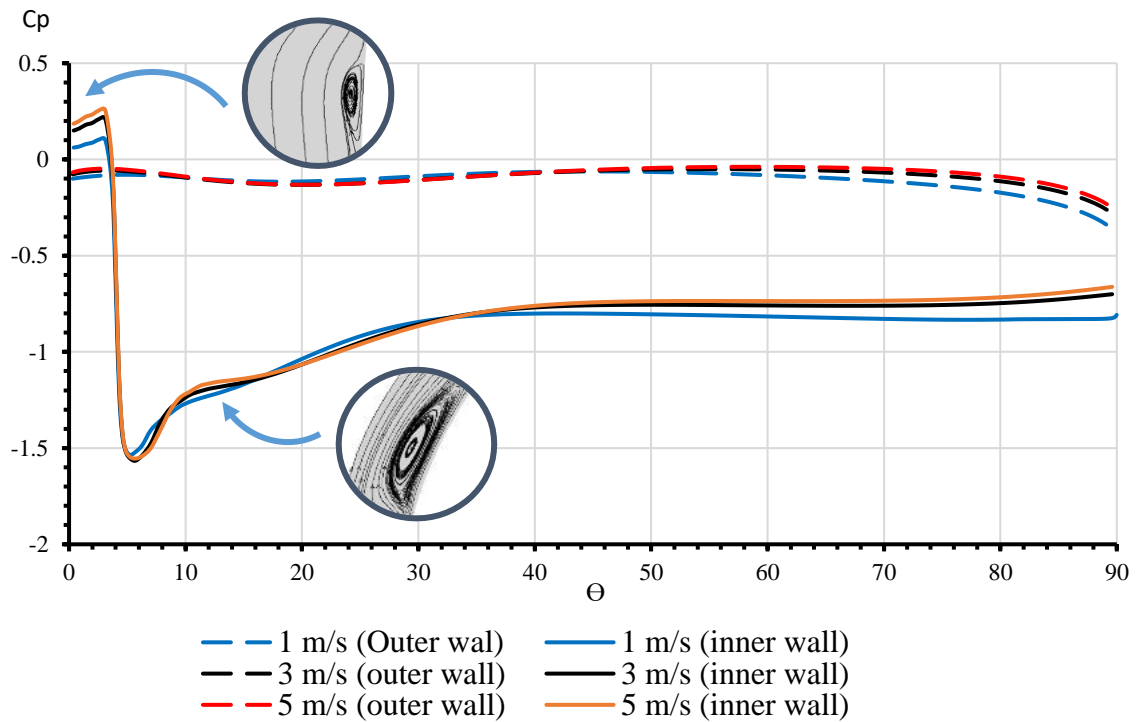
Tekanan statis (pa)

Gambar 4. 34 tekanan statis di *upstream duct* ; a)  $4^\circ$ , b)  $8^\circ$ , dan c)  $12^\circ$



Gambar 4. 35 *bubble separation* pada bagian depan *obstacle*

Pada Gambar 4.36 ditunjukkan beberapa *wake/secondary flow* yang terbentuk pada grafik  $C_p$  tersebut. Pada sudut  $0^\circ$ -  $4^\circ$  terdapat *bubble separation* yang telah ditunjukkan pada gambar 4.35 yang mana *bubble separation* tersebut berpengaruh pada daerah *upstream* dan *elbow*. Terdapat juga *wake* dibelakang *cylinder* dan *recirculation zone* pada sudut  $\pm 10^\circ$ . Peningkatan bilangan Reynolds berdampak pada semakin membesarnya *wake* di belakang OSC sehingga meningkatkan *skin friction drag* dan *pressure drag* aliran. Separasi di belakang *obstacle* yang semakin membesar mengakibatkan momentum aliran yang bergerak di celah antar *obstacle* dan dinding dalam *elbow*  $90^\circ$  semakin sedikit. Aliran yang semakin sedikit tersebut harus melewati sebuah celah yang terdapat *adverse pressure gradient*. Hal ini mengakibatkan adanya aliran yang berpotensi terseparasi pada dinding dalam *elbow*  $90^\circ$ . *Recirculation zone* yang terbentuk pada sudut  $\pm 10^\circ$  tersebut menambah *skin friction drag* dan *pressure drag* aliran.

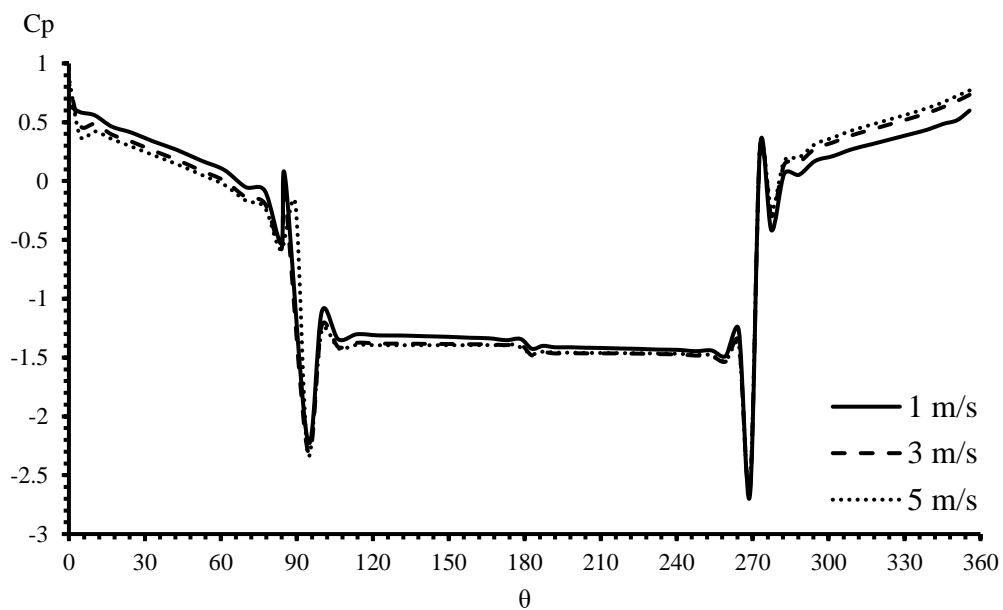


Gambar 4. 36 koefisien tekanan di sepanjang dinding dalam dan luar *elbow*  $90^\circ$  dengan variasi bilangan Reynolds.

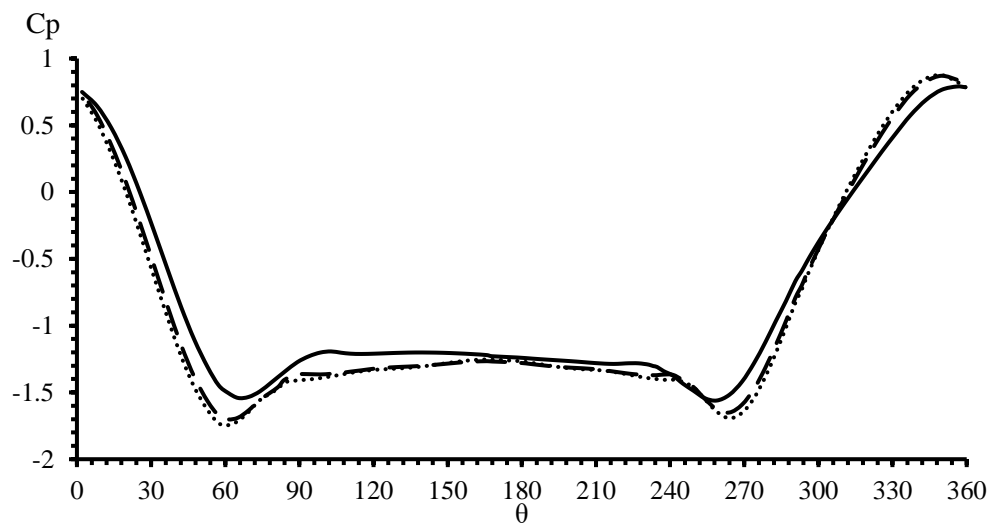
Terdapat perbedaan pada recirculation yang terbentuk di daerah dinding dalam elbow  $90^\circ$  pada variasi kecepatan OSC dan CC. Recirculation yang terbentuk pada CC semakin mengecil seiring Reynolds number ditingkatkan. Hal ini dikarenakan peningkatan Reynolds number tersebut semakin memperbesar momentum di yang melewati celah sehingga mampu melawan adverse pressure gradient.

Terdapat perbedaan karakteristik wake yang terbentuk antara OSC dan CC. Titik separasi yang terbentuk pada OSC tidak mengalami perubahan walupun terdapat peningkatan Reynolds number. Hal ini dikarenakan motif dari terseparasinya aliran. Pada OSC, aliran terseparasi akibat adanya perubahan geometri yang terjadi secara tiba-tiba. Di sisi lain pada CC terdapat perubahan titik separasi saat Reynolds number ditingkatkan. Peningkatan Reynolds number menyebabkan titik separasi aliran semakin menuju *upstream*. Fenomena ini dapat dilihat pada gambar 4.37 (a) dan 4.37 (b).

Hal ini dapat dipahami dengan fenomena tak terbentuknya *vortex way*. Seperti pada gambar 2.27 pada saat cylinder semakin didekatkan dengan permukaan/dinding *vortex way* yang biasa terbentuk pada  $g/d$  yang besar tidak dapat terlihat lagi. Interaksi antara *negative shear layer* dengan *boundary layer* menyebabkan tidak ada pemotongan antara *negative shear layer* dengan *positif shear layer*. Tidak adanya perpotongan tersebut menyebabkan vortex dibelakang wake semakin memanjang saat Reynolds number ditingkatkan ataupun pengecilan  $g/d$ .

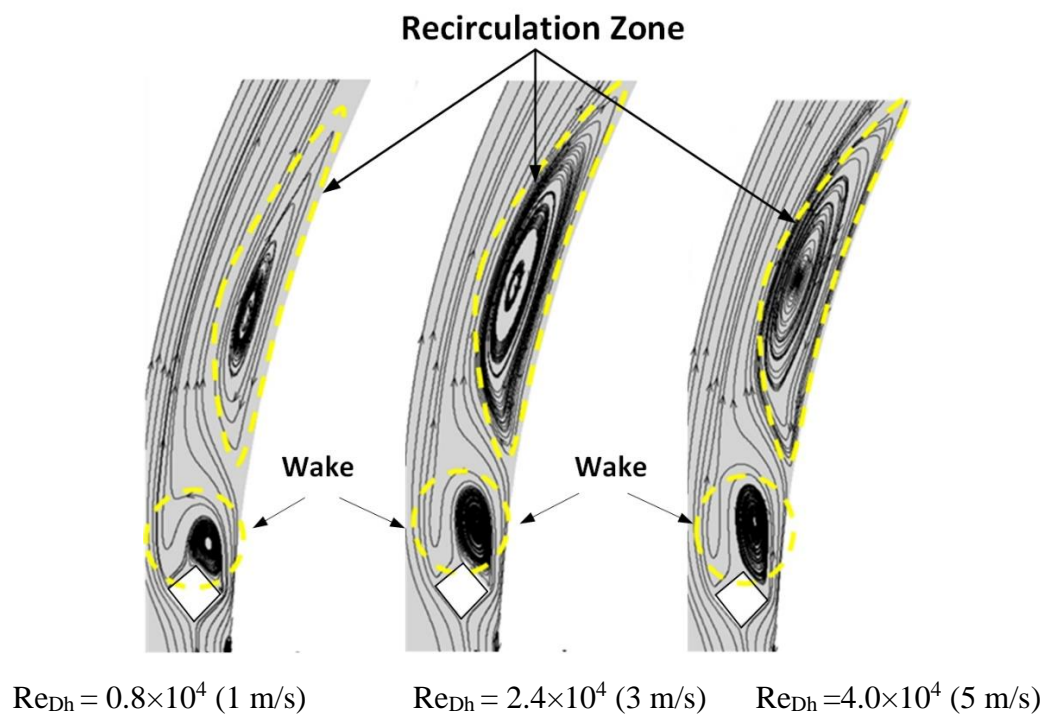
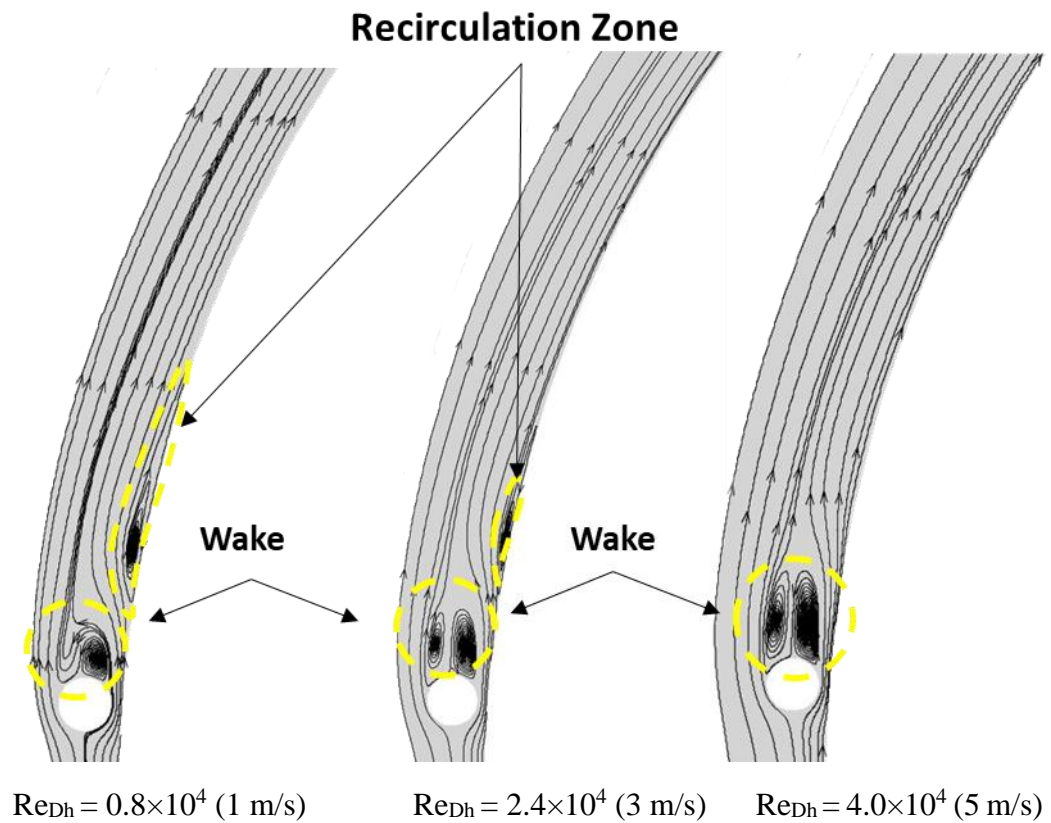


(a)



(b)

Gambar 4. 37  $C_p$  pada obstacle a) OSC dan b) CC



Gambar 4. 38 *wake* dan recirculation zone yang terbentuk di dekat dinding dalam *elbow* 90° pada variasi bilangan Reynolds (CC) dan (OSC).

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB 5

### KESIMPULAN & SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

1. Bentuk *obstacle* mempengaruhi besarnya intensitas turbulensi yang terbentuk akibat interaksi *shear layer* dengan *boundary layer*. OSC memiliki kemampuan untuk menghasilkan intensitas turbulensi aliran yang lebih besar daripada CC. di sisi lain OSC memiliki *wake* yang lebih besar sehingga meningkatkan *pressure drag* aliran.
2. *Angular position* memberikan pengaruh terhadap karakteristik aliran yang utamanya di daerah *upstream* dan *downstream*. *Angular position* yang diletakkan semakin mendekati kearah *upstream* berdampak pada penurunan *pressure drop* di sisi *upstream*. Namun hal ini mempercepat terjadinya disipasi energy sehingga nilai intensitas turbulensi aliran di daerah *downstream* lebih rendah.
3. Bilangan Reynolds berdampak pada meningkatnya *fluctuating component*. Semakin besar kecepatan inlet maka berdampak pada semakin besar intensitas turbulensi aliran. Selain mempengaruhi produksi *fluctuating component*, bilangan Reynolds mampu berdampak pada ukuran *wake* di daerah elbow  $90^\circ$

#### 5.2 saran

1. Diperlukan investigasi terhadap komponen nilai  $u'v'$  dan  $u'w'$  sehingga diketahui secara pasti seberapa besar peningkatan *Reynolds stress*.
2. Perbaikan meshing pada bagian tengah penampang merupakan hal yang harus diperhatikan dalam mendapatkan *split dean vortex*.
3. Diperlukan investigasi terhadap batas kecepatan maksimum branch duct, hal ini dilakukan atas dasar adanya indikasi penurunan *pressure drop* yang lebih besar saat *Reynolds number* ditingkatkan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Chopat, C. Guthrie, D. Pervex, J. Hamblin-Pyke, and N. Tack, "Construction Statistics , Great Britain : 2018," no. October, pp. 1–29, 2019.
- [2] D. Shiming and J. Burnett, "Energy Use and Management in Hotels in Hong Kong," *Int. J. Hosp. Manag.*, vol. 21, no. 4, pp. 371–380, 2002.
- [3] S. M. Deng and J. Burnett, "Study of Energy Performance of Hotel Buildings in Hong Kong," *Energy Build.*, vol. 31, no. 1, pp. 7–12, 2000.
- [4] Department of Environment and Energy, "HVAC Energy Breakdown," *Hvac Hess*, no. January 2012, pp. 36–37, 2013.
- [5] Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. and Leylegian, J. C, "Introduction to Fluid Mechanics 8th," USA: John Willey & Sons Inc, 2011.
- [6] P. Dutta and N. Nandi, "Numerical Study on Turbulent Separation Reattachment Flow in Pipe Bends with Different Small Curvature Ratio," *J. Inst. Eng. Ser. C*, 2018
- [7] P. Dutta and N. Nandi, "Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends," *Mech. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 5–16, 2015.
- [8] S. Sutardi, A. W. Wawan, I. Affan, I. Iswati, and M. D. Sutrisno, "Experimental Study of The Effect of Guide Vane Insertion And Reynolds Numbers on The Flow Pressure Drop in A 90° Rectangular Elbow 90°," *Reg. Conf. Mech. Aerosp. Technol.*, 2010.
- [9] K. Sudo, M. Sumida, and H. Hibara, "Experimental Investigation on Turbulent Flow in A Square-Sectioned 90-Degree Bend," *Exp. Fluids*, vol. 30, no. 3, pp. 246–252, 2001.
- [10] Á. P. Coppieters, "Airfoil Boundary-Layer Control through Pulsating Jets," 2011.
- [11] W. A. Widodo and N. Hidayat, "Experimental Study of Drag Reduction on Circular Cylinder and Reduction of Pressure Drop in Narrow Channels By Using A Cylinder Disturbance Body," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 493, no. 5, pp. 198–203, 2014.
- [12] M. Ozgoren, "Flow Structure in The Downstream of Square and Circular

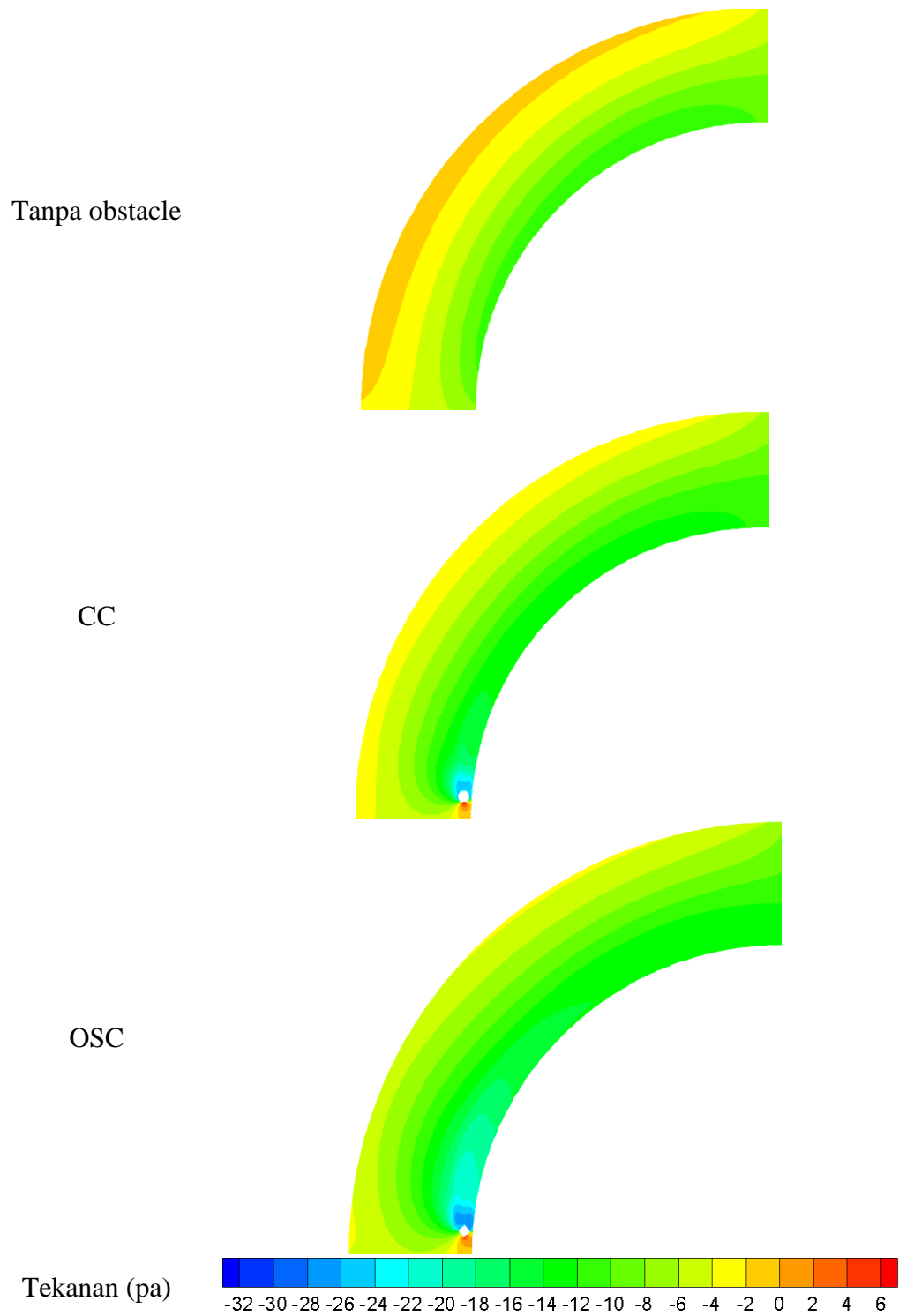
- Cylinders,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 17, no. 4, pp. 225–235, 2006.
- [13] Ashrae Standard, “ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals,” *Ashrae Stand.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2001.
- [14] S. K. Wang, “Air Systems: Air Duct Design,” *Handb. Air Cond. Refrig.*, pp. 17.1-17.79, 2001.
- [15] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, and W. W. Huebsch, “Elementary Fluid Dynamics - The Bernoulli Equation,” *Fundam. Fluids Mech.*, pp. 93–146, 2009.
- [16] D. S. Miller and W. D. Baines, “Internal flow systems,” *Journal of Hydraulic Research*, 71 vol. 28, no. 6. pp. 778–779, 1990.
- [17] K. Flaska and P. Manager, “Rotation Vanes Upstream of Pipe Elbow s Improves Flow,” no. 650, pp. 1–6.
- [18] Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., “Fluid Mechanics Fundamentals and Application,”. USA: McGraw-Hill,2014.
- [19] M. S. Siddiqui, A. Rasheed, T. Kvamsdal, and M. Tabib, “Effect of turbulence intensity on the performance of an offshore vertical axis wind turbine,” *Energy Procedia*, vol. 80, no. 1876, pp. 312–320, 2015.
- [20] M. M. Rahman, M. M. Karim, and M. A. Alim, “Numerical investigation of unsteady flow past a circular cylinder using 2-D finite volume method,” *J. Nav. Archit. Mar. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 27–42, 1970.
- [21] P. Dutta, S. K. Saha, N. Nandi, and N. Pal, “Numerical Study on Flow Separation in 90° Pipe Bend Under High Reynolds Number By K-E Modelling.” *J. Inst. Eng. Ser. C*, 2015.
- [22] R. P. Putra and W. A. Widodo, “The Study on the Effect of Inlet Disturbance Body Insertion on the Flow Pressure Drop in a 90o Square Elbow,” *AIP Confrence Proceedings.*, vol. 020016, 2018.
- [23] Y. Li, X. Wang, S. Yuan, and S. K. Tan, “Flow Development in Curved Rectangular Ducts with Continuously Varying Curvature,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 75, pp. 1–15, 2016.
- [24] J. H. Choi and S.J. Lee “Ground Effect Of Flow Around An Elliptic Cylinder In A Turbulent Boundary Layer,” *Journal of Fluids and Structures*, pp. 575–

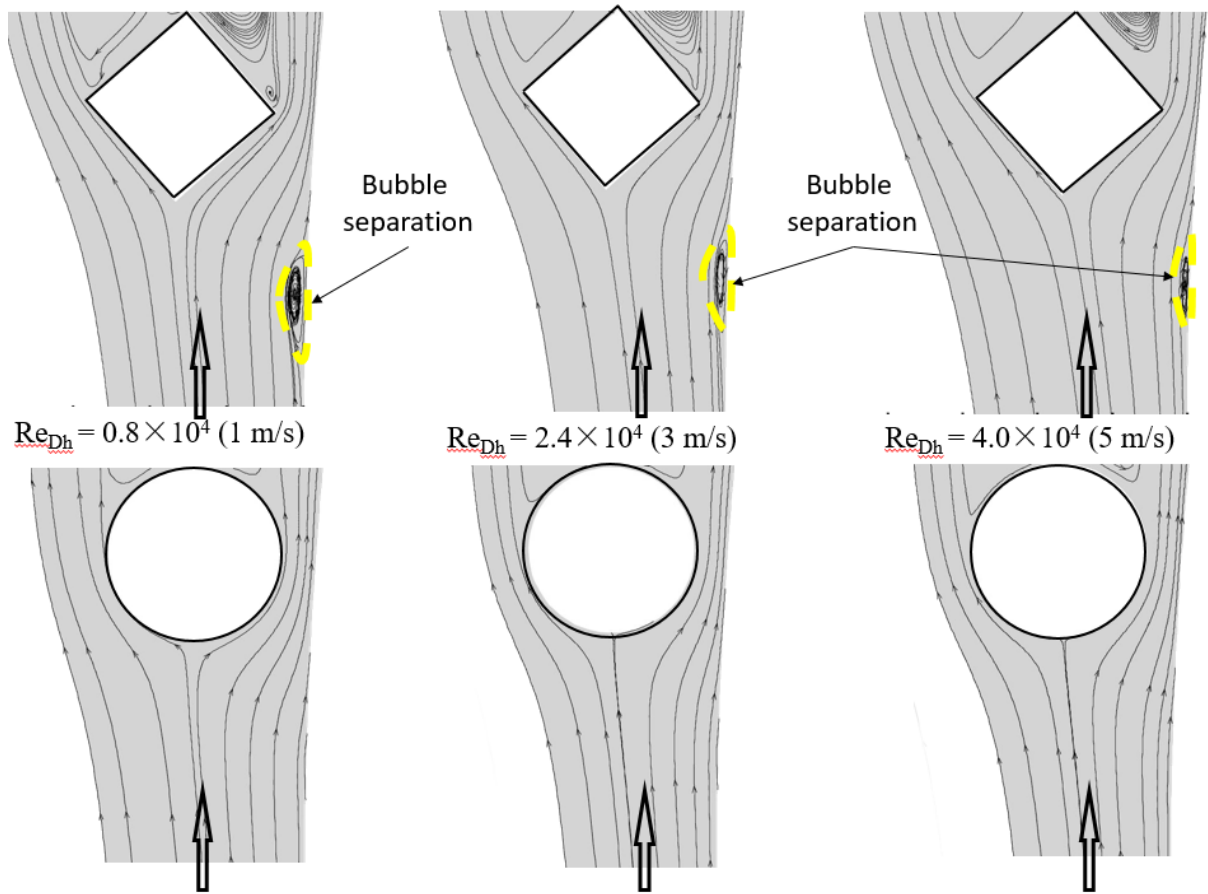
585, 2001.

- [25] S. J. Price, D. Sumner, J. G. Smith, K. Leong and M. P. Paigdoussiss. "Flow Visualization Around A Circular Cylinder Near To A Plane Wall," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 16, pp. 575–585, 2001.
- [26] N. Mahir, "Three-dimensional flow around a square cylinder near a wall," *Ocean Eng.*, vol. 36, no. 5, pp. 357–367, 2009.
- [27] P. R. Hanmaiahgari, V. Roussinova, and R. Balachandar, "Turbulence characteristics of flow in an open channel with temporally varying mobile bedforms," *J. Hydrol. Hydromechanics*, vol. 65, no. 1, pp. 35–48, 2017.
- [28] M. Yousry and C. Egbers, "Influence on flow behaviour inside a rectangular channel by patterned surface," *German Association for Laser Anemometry*, 2016.
- [29] M. C. Ong, L. E. Holmedal, and D. Myrhaug, "Numerical simulation of suspended particles around a circular cylinder close to a plane wall in the upper-transition flow regime," *Coastal Engineering*, vol. 61, no. 1. pp. 1–7, 2012.
- [30] R. P. Putra, Sutardi, and W. A. Widodo, "Experimental and numerical studies of pressure drop reduction in a 90° square elbow with the addition of circular turbulators," *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 10, pp. 608–618, 2019.
- [31] J. Kim, M. Yadav, and S. Kim, "Characteristics of secondary flow induced by 90-degree elbow in turbulent pipe flow," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 8, no. 2, pp. 229–239, 2014.
- [32] Y. Li, X. Wang, B. Zhou, S. Yuan, and S. K. Tan, "Dean Instability and Secondary Flow Structure in Curved Rectangular Ducts." *International Journal of Heat and Fluid Flow.*, vol. 68, hal. 189-202. 2017.
- [33] R. Gao, Z. Fang, A. Li, K. Liu, Z. Yang, and B. Cong, "Numerical Simulation and Experimental Study of the Drag Reduction of 90° Elbows for Ventilation and Air Conditioning Tubes in An Arc Form," *Procedia Eng.*, vol. 205, pp. 3978–3984, 2017.
- [34] A. P. P. dos Santos, C. R. Andrade, and E. L. Zaparoli, "CFD Prediction of the Round Elbow Fitting Loss Coefficient," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 743–747, 2014.

- [35] P. Louda, J. Příhoda, K. Kozel, and P. Sváček, “Numerical simulation of flows over 2D and 3D backward-facing inclined steps,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 43, pp. 268–276, 2013.
- [36] K. Rup and P. Sarna, “Analysis of turbulent flow through a square-sectioned duct with installed 90-degree elbow,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 22, no. 5, pp. 383–391, 2011.

**Lampiran 1** : distribusi tekanan pada  $y/D_h = 0.5$  pada  $Re_{D_h} = 4 \times 10^4$  dan  $\alpha = 4^\circ$



**Lampiran 2 : pathline aliran pada  $y/D_h = 0.5$  (CC dan OSC)  $\alpha=4^\circ$** 



**Lampiran 3** : intensitas turbulensi aliran pada aliran pada  $y/Dh = 0.5$  (elbow  $90^\circ$ )  
OSC

