



TUGAS AKHIR - TM091486 (KE)

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK ALIRAN  
DIDALAM *RECTANGULAR ELBOW 90°* YANG  
DILENGKAPI DENGAN *ROUNDED LEADING EDGE  
GUIDE VANE***

**“Studi Kasus Untuk Bilangan Reynolds,  $Re_{Dh} = 2,1 \times 10^4$ ”**

**ADITYAS WIBOWO KUSUMO  
2109100032**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng. Ph.D**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014**



FINAL PROJECT - TM091486 (KE)

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF  
FLOW IN RECTANGULAR ELBOW 90° WITH  
ROUNDED LEADING EDGE GUIDE VANE**

"Study Case For Reynolds Numbers,  $ReDh = 2.1 \times 10^4$ "

**ADITYAS WIBOWO KUSUMO  
2109100032**

**Supervisor :  
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng. Ph.D**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Industrial Technology Faculty  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2014**



**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK ALIRAN  
DIDALAM *RECTANGULAR ELBOW 90°* YANG  
DILENGKAPI DENGAN *ROUNDED LEADING  
GUIDE VANE***

**“Studi Kasus Untuk Bilangan Reynolds,  $Re_{Dh} = 2,1 \times 10^4$ ”**

**Nama Mahasiswa : ADIYAS WIBOWO KUSUMO**  
**NRP : 2109 100 032**  
**Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D**

***Abstrak***

*Penggunaan elbow dalam perancangan sistem perpipaan, akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut dikarenakan oleh perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut. Nilai penurunan tekanan (pressure drop) pada aliran yang melalui elbow tersebut dipengaruhi oleh besarnya jari-jari kelengkungan dan sudut belok dari elbow, yang menyebabkan terjadinya separasi dan aliran sekunder (secondary flow) pada elbow. Hal ini akan menyebabkan kerugian energi aliran (headloss) yang lebih besar sehingga perlu dilakukan usaha untuk mengurangi pressure drop yang terjadi di dalam elbow 90°. Model uji yang akan digunakan di dalam studi ini berupa rectangular elbow 90° dengan radius ratio ( $r_m/D_h$ ) 1.875, tanpa rounded dan rounded leading edge guide vane. Fluida yang mengalir adalah udara yang incompressible, viscous, steady dan mempunyai profil kecepatan uniform pada sisi inlet dengan Bilangan Reynolds yang digunakan  $Re_{Dh} \approx 2,1 \times 10^4$ . Variabel yang diukur adalah tekanan stagnasi dan tekanan statis. Tekanan stagnasi diukur dengan menggunakan pitot*



*tube sedangkan tekanan statis diukur menggunakan inclined manometer yang dihubungkan dengan wall pressure tap. Penelitian dilakukan secara eksperimen dan numerik 3D, dimana penelitian numerik menggunakan software Fluent 6.3.26 dan Gambit 2.4.6 dengan model turbulensi k-ε Realizable. Hasil studi yang didapatkan dengan rounded leading edge guide vane pada eksperimen tidak memberikan pengaruh signifikan menurunkan pressure drop yaitu sebesar 0.05% dibanding dengan elbow tanpa rounded. Pada rounded leading edge guide vane secondary flow yang terbentuk lebih kecil dari pada elbow tanpa rounded terutama pada posisi leading edge. Hasil simulasi numerik tentang kontur tekanan dan kecepatan aliran sangat mendukung hasil eksperimen.*



**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF  
FLOW IN RECTANGULAR ELBOW 90° WITH  
ROUNDED LEADING EDGE GUIDE VANE**

**"Study Case For Reynolds Numbers,  $Re_{Dh} = 2.1 \times 10^4$ "**

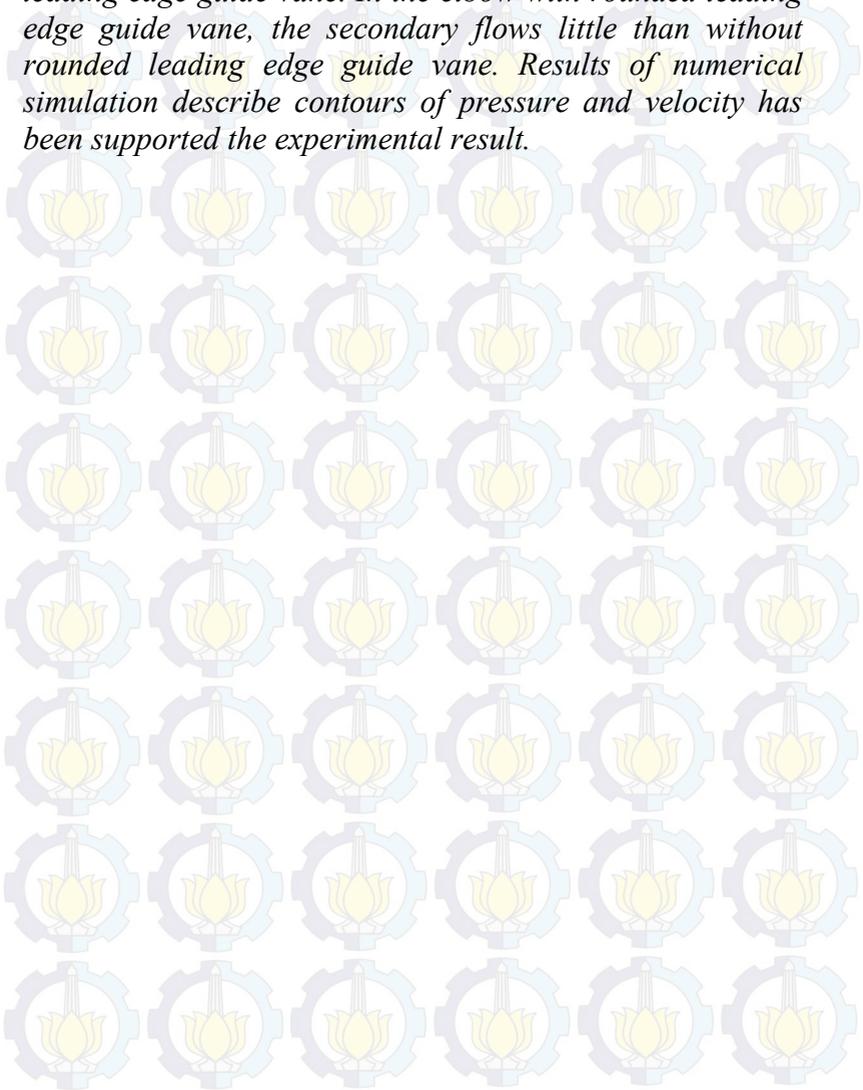
**Student Name : ADITYAS WIBOWO KUSUMO**  
**NRP : 2109 100 032**  
**Major : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Lecture : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D**

***Abstract***

*The use of elbows in the piping system will cause pressure loss caused by friction. This is due to the change in direction of fluid flow through the channel. Value of the pressure drop in flow to through the elbow is affected by the magnitude of the radius curvature, which led to the separation and secondary flow at the elbow. This will cause loss of flow energy (headloss) larger so that necessary efforts to reduce the pressure drop that occurs within elbow 90°. The test model used in this research an rectangular 90° elbow with a radius ratio ( $r_m/D_h$ ) is 1,875 without and with the addition of rounded leading edge guide vane and using  $Re_{Dh} \approx 2,1 \times 10^4$ . Fluid flow used in this experiment is air which incompressible, viscous, steady and uniform. The measured variable is stagnation and static pressure. Stagnation pressure was measured using a pitot tube, while the static pressure is measured using an inclined manometer connected to the wall pressure taps. The study was conducted experimentally and numerically 3D using Fluent software 6.3.26 and Gambit 2.30 with model k-ε Realizable. The results of this study showed that addition rounded leading edge guide vane in the elbow decreases the pressure*



*drop of 0.05% in the elbow compared without rounded leading edge guide vane. In the elbow with rounded leading edge guide vane, the secondary flows little than without rounded leading edge guide vane. Results of numerical simulation describe contours of pressure and velocity has been supported the experimental result.*



**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK ALIRAN  
DIDALAM RECTANGULAR ELBOW 90° YANG  
DILENGKAPI DENGAN ROUNDED LEADING EDGE  
GUIDE VANE**

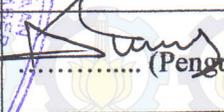
”Studi Kasus Untuk Bilangan Reynolds ( $Re$ ) =  $2,1 \times 10^4$ “

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh :

**ADITYAS WIBOWO KUSUMO**  
NRP. 2109 100 032

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :	
1. <u>Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D.</u> (NIP. 196412281990031002)	 (Pembimbing)
2. <u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT</u> (NIP.197104051997021001)	 (Penguji I)
3. <u>Nur Ikhwan, ST, M.Eng.</u> (NIP.196709151995121001)	 (Penguji II)
4. <u>Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, Ph.D.</u> (NIP.197512062005011002)	 (Penguji III)

**SURABAYA  
JANUARI 2014**

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Sholawat dan salam juga tetap tercurahkan kepada Nabi besar Muhammad SAW yang telah memberikan segala tauladannya.

Dalam terselesaikannya Tugas Akhir ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. **Bapak, ibu, Mbak Danik, Mas Danu** dan keluarga besar yang selalu memberi doa dan motivasinya. Tanpa do'a dan motivasi itu penulis tidak bias menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
2. **Bpk. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.d** sebagai Dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah banyak memberikan tenaga dan perhatian di sela-sela padatnya aktivitas kampus beliau.
3. **Bapak Dr Bambang Pramujati** selaku Ketua Jurusan Teknik mesin ITS yang telah member motivasi kepada penulis
4. **Bpk. Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT, Bpk. Nur Ikhwan, ST. M.Eng** dan **Bpk Dedy Zulhidayat Noor, ST, M.T, Ph.D** sebagai Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.
5. **Bpk. Prof Dr. Ing. Herman Sasonngko** sebagai dosen wali yang banyak memberikan perhatian dan bimbingannya selama penulis kuliah di Teknik Mesin ITS baik mengenai akademik.
6. Teman-teman angkatanku M52 yang tidak bisa disebutkan satu per satu
7. Tim Tugas Akhir yaitu Danies, Dio, Mega, Thomas dan Edwin.
8. Senna, Galang dan Andri yang senantiasa memberi arahan dan masukan dalam penggunaan software FLUENT.

9. Teman-teman seperjuangan Lab. Mekanika Fluida yakni Fasya, Faruq, Vikri, Heru, Ageng, Acol, Imam, Hanafi, Dea, Aulia, Fitri, Erni, Riska, Kumaro dan lain-lain yang selalu memotivasi dalam mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada wisuda ke-109 serta selalu menghibur penulis jika sedang dalam kondisi bosan.
10. Teman-teman komunitas SPR K-12 (Samsul, Latif, Arif dan Rois) yang memberi warna dalam kehidupan sehari-hari.
11. Teman-teman seperjuangan Lab. Perpindahan Panas dan Konversi Energi yakni Akbar, Satya, Firdaus, Ari, Anis, Viki, Selly, Luki dan lain-lain yang senantiasa member fasilitas untuk kelancaran penyusunan tugas akhir ini.
12. **Bpk. Nur Rochman** dan **Bpk. Sutrisno** sebagai karyawan Lab Mekflu yang telah banyak membantu Penulis dalam melakukan eksperimen.
13. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Akhirnya, Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Februari 2014

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	i
<b>ABSTRAK</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	xxiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Persamaan Euler Pada Koordinat <i>Streamline</i> .....	7
2.2 Proses terjadinya separasi.....	9
2.3 Proses terjadinya aliran sekunder.....	9
2.4 <i>Coefficient Pressure (Cp)</i> .....	11
2.5 Distribusi Tekanan disepanjang <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow 90</i> .....	12
2.6 Karakteristik Aliran didalam <i>Elbow</i> .....	13
2.7 Pengaruh besarnya $\eta = R/H$ terhadap percepatan terjadinya separasi pada bidang sisi <i>rounded</i> .....	19
2.8 Fluent Tutorial.....	20
2.9 Deskripsi Tentang RANS <i>Turbulence Model</i> .....	21
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Analisa Dimensi Parameter-parameter yang Dianalisa .....	27
3.2 Instalasi penelitian.....	31
3.3 Peralatan pendukung .....	33



3.4 Langkah-langkah eksperimen .....	36
3.3.1 Pengambilan data kuantitatif .....	36
3.3.2 Pengolahan data kuantitatif .....	37
3.4 Studi numerik .....	41
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Distribusi <i>Wall Pressure Coefficient</i> ( $C_p$ ).....	49
4.1.1 Distribusi <i>Wall Pressure Coefficient</i> ( $C_p$ ) searah <i>streamline</i> (s).....	50
4.1.2 Distribusi <i>Wall Pressure Coefficient</i> ( $C_p$ ) pada kelengkungan <i>elbow</i> .....	58
4.2 Distribusi profil kecepatan .....	63
4.3 Aliran sekunder.....	73
<b>BAB V PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan .....	79
5.1 Saran .....	81
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	82
<b>LAMPIRAN</b> .....	84
<b>BIOGRAFI PENULIS</b> .....	85



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> .....	8
Gambar 2.2	Secondary flow.....	9
Gambar 2.3	<i>Secondary Flow at corner rectangular elbow 90</i> .....	10
Gambar 2.4	Distribusi tekanan pada <i>curved pipe</i> .....	11
Gambar 2.5	Distribusi tekanan pada <i>curved wall (a) concave wall; (b) convex wall</i> .....	12
Gambar 2.6	Distribusi tekanan pada <i>curved pipe</i> .....	12
Gambar 2.7	Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada <i>downstream elbow</i> .....	13
Gambar 2.8	(a) Profil kecepatan pada <i>Downstream Junction</i> ; (b) Intensitas Turbulensi pada Downstream; (c) Variasi <i>friction factor</i> dengan penambahan <i>guide vane</i> .....	14
Gambar 2.9	Studi numerik kontur tekanan statis ( $N/m^2$ ) pada <i>midspan (a) tanpa guide vanes; (b) dengan dua guide vanes</i> .....	15
Gambar 2.10	Kontur tekanan statis ( $N/m^2$ ) <i>elbow</i> dengan <i>tiga guide vane</i> (numerik).....	16
Gambar 2.11	(a) Parameter dimensi bidang (b) Separasi pada 3D untuk $\eta = R/H = 1, 0.125$ .....	18



## *Tugas Akhir Konversi Energi*

---

Gambar 2.11	Prediksi tekanan statis dinding <i>outlet rectangular bend 90°</i> menggunakan berbagai macam permodelan.....	19
Gambar 3.1	Skema penelitian .....	26
Gambar 3.2	Instalasi penelitian.....	29
Gambar 3.3	<i>Centrifugal blower</i> .....	30
Gambar 3.4	<i>Honey comb</i> .....	30
Gambar 3.5	Skema Pemasangan <i>wall pressure tap</i> dan <i>pitot tube</i> .....	32
Gambar 3.6	<i>Inclined manometer</i> dan mistar.....	33
Gambar 3.7	Pembaca <i>wall pressure tap</i> pada <i>inclined manometer</i> .....	37
Gambar 3.8	<i>Meshing volume</i> pada <i>elbow</i> dengan <i>rounded leading and trailing edges guide vane</i> .....	40
Gambar 3.9	<i>Meshing volume</i> pada <i>elbow</i> dengan <i>guide vane</i> biasa.....	41
Gambar 3.10	<i>Boundary condition</i> .....	42
Gambar 3.10	Diagram alir.....	45
Gambar 4.1	Distribusi $C_p$ <i>inner</i> dan <i>outer wall rectangular elbow 90°</i> dengan <i>satu guide vane</i> dan dengan <i>rounded leading edge guide vane</i> .....	47
Gambar 4.2	Distribusi $C_p$ <i>inner</i> dan <i>outer wall rectangular elbow 90°</i> <i>satu guide vane</i> (eksperimen dan numerik).....	50



Gambar 4.3	Distribusi $C_p$ <i>inner dan outer wall rectangular elbow 90° rounded leading edge guide vane</i> (eksperimen dan numerik).....	50
Gambar 4.4	Kontur tekanan statis di <i>midspan elbow</i> dengan bilangan <i>Reynolds 21000</i> ; a). <i>satu guide vane</i> ; b) <i>leading edge guide vane</i> , (numerik)....	52
Gambar 4.5	Kontur tekanan statis ( $N/m^2$ ) pada delapan <i>cross section</i> untuk <i>elbow</i> dengan <i>rounded leading edge guide vane</i> (numerik).....	54
Gambar 4.6	Distribusi $C_p$ tegak lurus <i>streamline</i> untuk <i>satu guide vane dan rounded leading edge guide vane</i> (eksperimen).....	56
Gambar 4.7	Distribusi $C_p$ tegak lurus <i>streamline</i> untuk <i>satu guide vane dan rounded leading edge guide vane</i> (numerik).....	57
Gambar 4.8	Distribusi $C_p$ tegak lurus <i>streamline</i> untuk <i>rounded leading edge guide vane</i> (eksperimen dan numerik).....	58
Gambar 4.9	Distribusi profil kecepatan masing-masing <i>section rectangular elbow 90°</i> untuk <i>elbow</i> dengan <i>satu guide vane dan elbow dengan leading edge guide vane section</i> a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6; g) 7; h) 8 (eksperimen).....	62
Gambar 4.10	Kontur kecepatan (m/s) di <i>midspan elbow 90°</i> untuk <i>partial guide vanes</i> (numerik).....	66



*Tugas Akhir Konversi Energi*

---

Gambar 4.11	<i>Total pressure di 8 cross section elbow untuk satu guide vane (numerik) (a) keseluruhan (b) setiap section.....</i>	<i>67</i>
Gambar 4.12	<i>Total pressure di 8 cross section elbow untuk leading edge guide vane (numerik) (a) keseluruhan (b) setiap section.....</i>	<i>68</i>
Gambar 4.13	<i>Aliran sekunder pada corner elbow di section 5 (a) elbow dengan satu guide vane (b) elbow dengan rounded leading edge guide vane .....</i>	<i>69</i>
Gambar 4.14	<i>Aliran sekunder pada leading and trailing edge guide vane elbow di section 5 (a) elbow dengan satu guide vane (b) elbow dengan rounded leading edge guide vane.....</i>	<i>70</i>



### DAFTAR SIMBOL

Simbol geometri *elbow*

- $a$  : tinggi *cross section elbow* 90°, (mm)  
 $b$  : lebar *cross section elbow* 90°, (mm)  
 $D_h$  : diameter hidrolis,  $D_h = 4.A_c / P = 4.a.b / 2(a+b)$ , (mm)  
 $L_i$  : panjang *inlet elbow*, (mm)  
 $L_o$  : panjang *outlet elbow*, (mm)  
 $n$  : jumlah *guide vane*, tak berdimensi  
 $R_i$  : *inner radius elbow*, (mm)  
 $R_o$  : *outer radius elbow*, (mm)  
 $R_m$  : *mean radius elbow*,  $R_m = (R_i + R_o)/2$ , (mm)  
 $R_m/D_h$  : *radius ratio*, tak berdimensi  
 $l_i$  : panjang total dari *inner wall*, (mm)  
 $l_o$  : panjang total dari *outer wall*, (mm)  
 $C_p$  : *wall pressure coefficient*,  $C_p = (p_{s,i} - p_{ref}) / (0,5 \cdot \rho \cdot U_{ref}^2)$ , tak berdimensi  
 $g$  : percepatan gravitasi ( $\text{kg/m}^2$ )  
 $p_{s,i}$  : tekanan statis dinding pada  $x/D_h = i$ , (Pa)  
 $p_{ref}$  : tekanan statis referensi pada  $x/D_h = 0$ , (Pa)  
 $p_o$  : tekanan stagnasi yang diukur dengan *stagnation pressure tube*, (Pa)  
 $p_s$  : tekanan statis sejajar dengan *stagnasi pressure tube*, (Pa)  
 $r/b$  : koordinat normal *streamline*, tak berdimensi  
 $Re_{D_h}$  : bilangan *Reynolds* =  $\frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}$ , tak berdimensi  
 $SG$  : *specific gravity*, tak berdimensi  
 $T$  : temperatur ruangan, (°C)  
 $u$  : kecepatan lokal rata – rata, (m/s)  
 $U_{ref}$  : kecepatan referensi yang diukur pada  $x/L_i = 0$ , atau  $x/L_o = 0$ , (m/s)
-



$x_i/D_h$	: koordinat sepanjang <i>streamline</i> berdasarkan panjang sisi <i>inner</i> , tak berdimensi
$x_o/D_h$	: koordinat sepanjang <i>streamline</i> berdasarkan panjang sisi <i>outer</i> , tak berdimensi
$z$	: koordinat vertikal
$\Delta C_{p_{inner-outer}}$	: selisih $C_p$ maksimum di sisi <i>outer</i> dan $C_p$ minimum di sisi <i>inner</i> , tak berdimensi
$\frac{\partial p}{\partial x}$	: gradient tekanan, (N/m <sup>3</sup> )
$\frac{\partial p}{\partial r}$	: gradien tekanan searah radial/ searah jari-jari, (N/m <sup>3</sup> )
$\Delta h$	: selisih bacaan awal dan akhir manometer, (mm)
$\nu$	: viskositas kinematis udara, (m <sup>2</sup> /s)
$\rho_{H_2O}$	: massa jenis air, (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{ud}$	: massa jenis udara, (kg/m <sup>3</sup> )
$\varphi$	: sudut <i>inclined manometer</i> , derajat



---

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Matrik perbandingan penelitian terdahulu .....	18
Tabel 2.2	<i>Error</i> dalam memprediksi tekanan <i>statis rectangular bend 90°</i> pada masing masing permodelan turbulensi .....	21
Tabel 3.1	Tabel 2.1 Matrik perbandingan penelitian terdahulu .....	35
Tabel 4. 1	Data eksperimen perbenadingan <i>elbow satu guide vane</i> dengan <i>rounded leading edge guide vane</i> .....	61
Tabel 4.2	Data eksperimen perbandingan <i>elbow</i> tanpa <i>rounded</i> dan <i>rounded leading edge guide vane</i> .....	62
Tabel 5.1	Data eksperimen perbenadingan <i>elbow satu guide vane</i> dengan <i>rounded leading edge guide vane</i> .....	78
Tabel 5.2	Data eksperimen perbenadingan <i>elbow satu guide vane</i> dengan <i>rounded leading edge guide vane</i> .....	78



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Pada zaman modern seperti saat ini kebutuhan manusia tidak dapat dipisahkan dengan teknologi dan ilmu pengetahuan. Pesatnya perkembangan berbagai bidang ilmu mendorong majunya peradaban kehidupan manusia. Ilmu teknik sebagai salah satu bidang yang mengaplikasikan ilmu dan teknologi tentu memegang peranan penting bagi kehidupan manusia. Dalam dunia industri misalnya, kebutuhan akan instalasi pipa yang mempunyai head dan efisiensi tinggi sangat menunjang kemajuan dalam proses produksinya. Dalam sistem perancangan perpipaan ada beberapa hal yang berpengaruh terhadap effisiensinya, meliputi: diameter pipa, ketebalan, kekasaran, sambungan-sampungan (*fitting*) dan belokan (*elbow*).

Penggunaan *elbow* dalam perancangan sistem perpipaan, akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut dikarenakan oleh perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut. Penurunan tekanan (*pressure drop*) pada pada aliran yang melewati *elbow* lebih besar dibandingkan dengan pipa lurus dengan panjang yang sama. Besar kecilnya penurunan tekanan (*pressure drop*) pada aliran yang melalui *elbow* tersebut dipengaruhi oleh besarnya jari-jari kelengkungan dan sudut belok dari *elbow* itu sendiri yang menyebabkan terjadinya separasi (*separation loss*) dan aliran sekunder (*secondary flow*) pada pipa *elbow* 90°. Separasi terjadi bila momentum yang digunakan untuk menggerakkan fluida sudah tidak mampu mengatasi gaya gesek dan tekanan balik (*adverse pressure gradient*) yang mengakibatkan terjadinya *vortex*, getaran, dan kavitasi, dimana kerugian tersebut mengakibatkan penurunan head dan berpotensi merusak instalasi pipa.



Penelitian tentang pipa *elbow 90°* sebelumnya pernah dilakukan **Kim dan Patel (1994)** tentang distribusi tekanan disepanjang *streamline*. Dari hasil penelitian menunjukkan distribusi tekanan dari *outer wall* ke *outlet wall* mengalami peningkatan dengan  $C_p$  bernilai positif sedangkan pada *inner wall* ke *outlet* mengalami penurunan dengan  $C_p$  yang bernilai negative. Penelitian selanjutnya dilakukan **Danbon dan Sollicc (2006)** mengenai profil kecepatan pada daerah *downstream circular elbow 90°*. Didapat hasil penelitian di daerah disepanjang *inner wall* dan *outer wall* terjadi perbedaan distribusi tekanan dan profil kecepatan yang tidak *uniform*. Distribusi tekanan pada sisi *outer wall* memiliki nilai yang lebih besar dibanding *inner wall*. Hal ini menyebabkan partikel fluida bergerak dari *outer wall* ke *inner wall* yang menimbulkan aliran sekunder (*secondary flow*). Penelitian mengenai aliran sekunder (*secondary flow*) juga pernah dilakukan **Marn dan Primos (2006)** dengan melakukan studi numerik menunjukkan bahwa terjadi perbedaan distribusi tekanan di *outer wall* dan *inner wall*. *Outer wall* memiliki distribusi tekanan yang lebih besar dibandingkan *inner wall* yang menyebabkan terjadinya aliran sekunder (*secondary flow*).

Penelitian tentang *guide vane* pernah dilakukan **Liou dan Lee (2001)** mengenai pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *friction factor*. Dari hasil penelitian menunjukkan dengan menambah satu *guide vane* maka *friction factor* akan menurun. Namun ketika ditambah dua atau tiga *guide vane* nilai *friction factor* yang terjadi cenderung meningkat. **Sutrisno (2009)** melakukan studi numerik dan eksperimental pada penambahan tiga *guide vanes* terhadap penurunan tekanan (*pressure drop*) dengan angka *Reynolds*  $2,1 \times 10^4$ ,  $8,4 \times 10^4$  dan  $1,2 \times 10^5$ . Dari hasil penelitian dengan menambah tiga *guide vanes* perbedaan  $C_p$  *outer wall* dengan *inner wall* sangat kecil, maka aliran sekunder (*secondary flow*) dan penurunan tekanan (*pressure drop*) pada *elbow rectangular 90°* juga sangat kecil. **Iswati (2012)** melakukan studi tentang pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* aliran didalam *rectangular elbow 90°*

---



dengan *Reynolds*  $2,1 \times 10^5$  dengan metode numerik dan eksperimen untuk mengetahui penurunan tekanan (*pressure drop*) disepanjang sisi output dan input didalam *rectangular elbow*  $90^\circ$ . Dari hasil penelitian didapatkan pengaruh penambahan dua *guide vane* justru meningkatkan penurunan tekanan (*pressure drop*) aliran karena perbedaan  $C_p$  antara *outer wall* dengan *inner wall* yang semakin besar.

Dari penelitian tersebut, maka dibuat *guide vane* dengan sisi dibentuk *rounded* dengan harapan untuk mengurangi terjadinya separasi ketika fluida kontak dengan *guide vane* saat memasuki *rectangular elbow*  $90^\circ$ . Variabel yang divariasikan adalah *rounded leading edge guide vane* dan standar penelitian sebelumnya, dengan satu nilai *Reynolds number* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap penurunan tekanan (*pressure drop*).

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada penjelasan sebelumnya pemasangan *rectangular elbow*  $90^\circ$  memungkinkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*) disepanjang aliran. Pada *rectangular elbow*  $90^\circ$  jari-jari kelengkungan dan besarnya sudut sangat berpengaruh pada penurunan tekanan (*pressure drop*) karena sangat berpengaruh terbentuknya separasi dan aliran sekunder (*secondary flow*). Ketika sebuah aliran melewati *outer wall* memiliki profil kecepatan yang cenderung *uniform* kemudian menjadi tidak *uniform* ketika melewati *inner wall*. Perubahan profil kecepatan menyebabkan terjadinya perbedaan distribusi tekanan antara *inner wall* dan *outer wall* pada aliran.

Cara yang digunakan untuk mengurangi penurunan tekanan (*pressure drop*) dengan menambahkan *guide vanes* pada *rectangular elbow*  $90^\circ$ . Sesuai penelitian sebelumnya penambahan *guide vane* perlu diperhatikan karena sangat berpengaruh pada besarnya *friction factor*. Penambahan satu



*guide vane* akan menurunkan nilai *friction factor* akan tetapi ketika menambah dua atau tiga *guide vanes* nilai *friction factor* cenderung akan meningkat. Bentuk *guide vane* dengan sisi dibuat *rounded* bertujuan untuk mengurangi terjadinya separasi dan aliran sekunder (*secondary flow*).

Penggunaan bilangan *Reynolds* yang lebih besar cenderung meningkatkan efisiensi aliran ketika melewati *rectangular elbow 90°*. Semakin besar bilangan *Reynolds* yang digunakan maka kemampuan aliran untuk melawan gesekan dan tekanan balik (*adverse pressure*) akan semakin besar sehingga *vortex* yang dapat mengakibatkan separasi akan semakin turun dan perbedaan distribusi tekanan antara *outer wall* dan *inner wall* lebih kecil karena dihasilkan profil kecepatan disepanjang aliran yang cenderung *uniform*. Permasalahan terkait dengan aliran didalam *elbow rectangular* bisa diringkas sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan *rounded leading edge guide vane* terhadap distribusi tekanan pada sisi *outer wall* dengan *inner wall*?
2. Bagaimana pengaruh penambahan *rounded leading edge guide vane* terhadap perubahan profil kecepatan aliran?
3. Bagaimana perbandingan hasil penelitian yang dilakukan dengan studi numerik dan eksperimen pada variasi *rounded leading edge guide vane*?

### 1.3 Tujuan Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi akibat penambahan *guide vane* dengan variasi *rounded leading edge guide vane* pada *rectangular elbow 90°*. *Guide vane* diletakkan ditengah-tengah *rectangular elbow 90°* pada sebuah aliran yang mempunyai bilangan *Reynolds*  $= 2.1 \times 10^4$ . Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:



1. Mengukur distribusi tekanan disepanjang aliran pada sisi *outer wall* dan *inner wall* dengan penambahan *rounded leading edge guide vane*.
2. Mengukur profil kecepatan aliran dengan penambahan *rounded leading edge guide vane*.
3. Melakukan studi numerik untuk mendapatkan detail visualisasi aliran pada *rectangular elbow 90°* dibandingkan dengan hasil yang diperoleh ketika eksperimen.

Penelitian ini juga mempunyai tujuan khusus yang ingin dicapai, yaitu:

1. Analisa *pressure drop* yang terjadi pada masing-masing benda uji (*rectangular elbow 90°* dengan *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane*). Analisa tersebut digunakan untuk mengetahui *pressure drop* yang terjadi akibat saluran (*mayor*) serta kehilangan tekanan akibat *elbow* (*minor*).
2. Mengetahui *koefisien friction* pada *rectangular elbow 90°* agar dapat mengetahui *head loss minor* yang diakibatkan oleh *fittings*.
3. Mengetahu *head loss total* untuk mendapatkan tenaga yang dibutuhkan blower.

#### 1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dapat kita ambil beberapa batasan masalah agar penelitian yang dilakukan lebih fokus. Adapun batasan masalahnya sebagai berikut:

1. Fluida yang digunakan adalah udara yang bersifat *incompressible*, *viscous*, *steady* dan mempunyai profil kecepatan sama pada sisi masuknya.
2. Penelitian dilakukan pada kondisi adiabatik dimana tidak terjadi perpindahan panas antara fluida dengan sistem.



3. Kekasaran pada permukaan saluran udara *rectangular* diabaikan.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat kita peroleh pada penelitian ini, antara lain:

1. Mengetahui perbedaan penambahan *rounded leading edge guide vane* terhadap distribusi tekanan pada *rectangular elbow 90°*.
2. Mengetahui perbedaan penambahan *rounded leading edge guide vane* terhadap profil kecepatan aliran pada *rectangular elbow 90°*.
3. Melengkapi penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya.



## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Persamaan *Euler* Pada Koordinat *Streamline*

Penjelasan aliran fluida di sepanjang *streamline* pada kondisi *steady flow*, dimana setiap partikel fluida yang berurutan yang melewati sebuah titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. Persamaan gerakannya dinyatakan dalam koordinat *streamline* yang dibangun dari persamaan Euler pada *Inviscid flow* yang dinyatakan pada persamaan 2.1.

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

Dari persamaan 2.1 dapat dijelaskan hubungan antara tekanan dengan kecepatan dari partikel fluida disepanjang *streamline*, dimana semakin besar tekanan partikel fluida maka kecepatan yang dihasilkan akan semakin kecil. Hubungan antara tekanan dan kecepatan tersebut memenuhi hukum kekekalan energi, jika aliran dianggap tanpa gesekan penjumlahan komponen tekanan dan kecepatan pada setiap titik adalah sama sehingga persamaan Euler dapat disederhanakan sebagai persamaan 2.2:

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

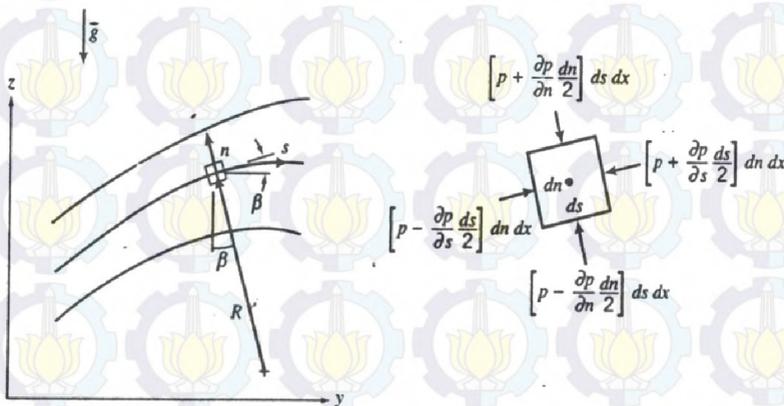


Pada kondisi *steady flow* dimana R adalah kelengkungan dari *streamline*, maka persamaan Euler normal dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.3)$$

Pada aliran *streamline* pada bidang horizontal efek ketinggian dapat diabaikan, sehingga persamaan dapat disederhanakan sebagai berikut:

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



**Gambar 2.1** Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline  
(Fox dan Mc. Donald, 1998)

Pada persamaan 2.4 menjelaskan pengaruh dari perubahan radius kelengkungan tekanan fluida disepanjang aliran *streamline* normal (n). Semakin besar radius kelengkungan maka tekanan yang terjadi juga semakin besar. Perbedaan tekanan ini digunakan untuk mengimbangi gaya sentrifugal oleh karena itu



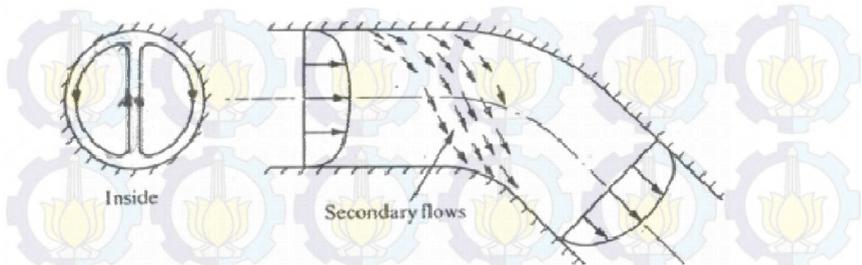
aliran di dalam pipa lurus, tekanan pada sisi normalnya konstan. Ketika streamlinenya lurus maka tidak ada perubahan tekanan pada normal *streamline*.

## 2.2 Proses Terjadinya Separasi di Dalam *Elbow*

Separasi merupakan salah satu karakter aliran yang penting untuk dikaji pada *elbow* yang dapat menimbulkan terjadinya kerugian *pressure drop*. Kontak antara aliran secara kontinyu dengan dinding *elbow* menyebabkan terjadinya gesekan yang dapat mengurangi momentum dari aliran. Ketika momentum aliran tidak mampu lagi melawan gesekan dan hambatan akan terjadi tekanan balik (*adverse pressure gradient*) yang dapat merugikan yang ditunjukkan dengan perubahan besarnya kecepatan dan terjadinya *vortex* disekitar dinding *elbow*. Besarnya *vortex region* dapat merugikan karena menurunkan momentum aliran dimana luas penampang aliran utama akan semakin kecil yang menyebabkan aliran mengalami percepatan dan menyebabkan terjadinya *pressure drop*.

## 2.3 Proses Terjadinya Aliran Sekunder didalam *Elbow*

Aliran sekunder didalam *elbow* merupakan fenomena aliran tiga dimensi karena terjadinya perbedaan distribusi pada sisi *inner* dan *outer wall*. Perbedaan ini terjadi karena semakin kesisi luar maka tekanan statis aliran akan semakin besar sehingga pada sisi *outer wall* tekanan statisnya lebih besar dibanding sisi *inner wall*. Ketika aliran melewati dinding *elbow* aliran yang terjadi tidak sepenuhnya searah dengan *streamwise*, ini terjadi karena terdapat *boundery layer* pada sisi bawah dan samping pada *elbow*. Kecepatan aliran salah satunya bergerak searah dengan normal *streamwise* bergerak menuju *inner wall* karena tekanan statisnya lebih kecil. Pada aliran *elbow* terjadinya aliran sekunder tampak jelas terjadi pada bagian *cross section* seperti terlihat pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Secondary flow (Miller, 1990)

Pada *rectangular elbow* mempunyai karakter khusus jika dibandingkan *circular elbow* dengan terjadinya aliran sekunder pada sisi *corner*. Ini terjadi karena pada *rectangular elbow* terjadi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping sedangkan pada *sirkular elbow* tidak dijumpai. Interaksi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping menyebabkan terjadinya aliran sekunder.



**Gambar 2.3** *Secondary Flow at corner rectangular elbow 90°*  
(Hakim, 2008)



Penelitian tentang *secondary flow* juga pernah dilakukan oleh **Hakim (2008)** dengan menambah dua *guide vane* pada *rectangular elbow 90°* yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Pada dasarnya penambahan *guide vane* dapat memecah aliran sekunder pada sisi *inner* dan *outer* akan tetapi dengan bertambah *guide vane* cenderung akan memperbesar terjadinya aliran sekunder pada sisi *corner* dan mengikis momentum karena akumulasi *adverse pressure gradient* dan gesekan pada dinding atas dan bawah sehingga partikel aliran pada *leading edge end wall guide vane* akan terpecah sebelum menumbuk dinding *guide vane*.

## 2.4 Coefficient of Pressure ( $C_p$ )

*Coefficient of Pressure* pada *elbow* didefinisikan sebagai selisih antara tekanan statis lokal dengan tekanan statis acuan (referensi) dibagi dengan tekanan dinamis yang diukur pada bagian sisi *inlet elbow*. Untuk menyatakan besarnya *pressure drop* secara tidak langsung dengan menggunakan  $C_p$ . Harga  $C_p$  sebagai selisih antara *inlet* dengan *outlet* dapat menjelaskan besarnya *pressure drop* disepanjang aliran. Semakin besar selisih  $C_p$  antara *inlet* dengan *outlet* maka *pressure drop* yang terjadi akan semakin besar seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_s - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} \quad (2.5)$$

dimana :

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{ref}^2$  = tekanan dinamis di *inlet elbow*

$P_s$  = tekanan statis lokal pada dinding

$P_{ref}$  = tekanan statis acuan (referensi)

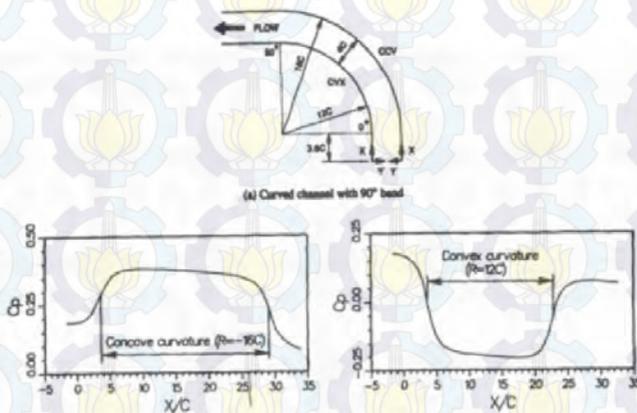
$\rho$  = massa jenis fluida pada kondisi kerja

$U_{ref}$  = kecepatan *freestream*



## 2.5 Distribusi Tekanan disepanjang *inner* dan *outer wall elbow 90°*

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan **Kim dan Patel (1994)** untuk mendapatkan distribusi tekanan disepanjang *inner* dan *outer wall elbow 90*. Pada gambar 2.4 disepanjang sisi *outer wall* didapatkan distribusi tekanan yang mula-mula terjadi peningkatan tekanan kemudian secara perlahan terjadi penurunan, ketika melewati *outlet* terjadi penurunan secara drastis menuju permukaan datar, sedangkan pada sisi *inner wall* yang mula-mula didapatkan distribusi tekanan yang mengalami penurunan tekanan, ketika melewati *outlet elbow* mengalami kenaikan secara perlahan.

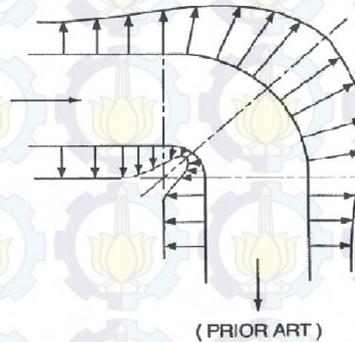


**Gambar 2.4** Distribusi tekanan pada *curved wall* (a) *concave wall*; (b) *convex wall* (Kim dan Patel, 1994)

**Cheng (1994)** juga melakukan penelitian tentang distribusi tekanan di sepanjang sisi *inner wall* dan *outer wall*



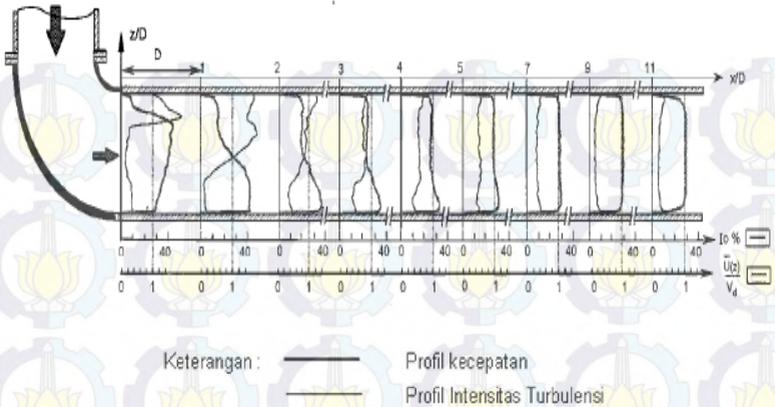
*elbow 90°*. Pada gambar 2.5 terlihat bahwa sisi *inner wall* serta *outer wall* terjadi kenaikan tekanan (*adverse pressure gradient*).



**Gambar 2.5** Distribusi tekanan pada *curved pipe* (Cheng, 1994)

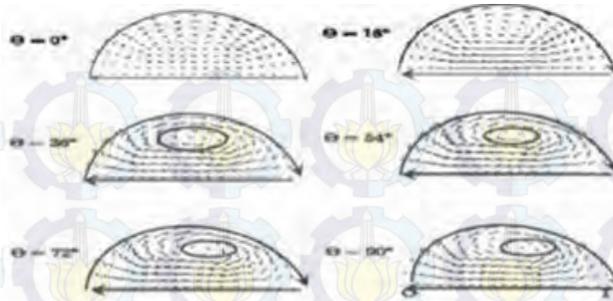
## 2.6 Karakteristik Aliran didalam *Elbow*

Penelitian selanjutnya dilakukan **Danbon dan Sollicc (2006)** mengenai profil kecepatan pada daerah *downstream circular elbow 90°*. Dari hasil penelitian terdapat perbedaan distribusi tekanan dan kecepatan, dimana *outer wall* memiliki nilai yang lebih besar dibanding *inner wall*. Ini menyebabkan partikel fluida bergerak dari *outer wall* ke *inner wall* yang dapat menghambat laju aliran fluida. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya aliran sekunder (*secondary flow*) yang dapat menyebabkan penurunan tekanan (*pressure drop*).

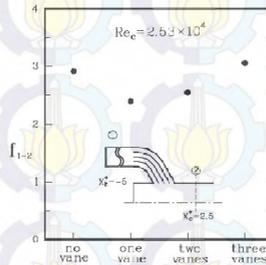


**Gambar 2.6** Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada *downstream elbow* (Danbon dan Sollicec, 2000)

Penelitian mengenai aliran sekunder (*secondary flow*) pernah dilakukan **Marn dan Primos (2006)** dengan melakukan studi numerik menunjukkan bahwa terjadi perbedaan distribusi tekanan di *outer wall* dan *inner wall*. *Outer wall* memiliki distribusi tekanan yang lebih besar dibandingkan *inner wall*. Perbedaan distribusi tekanan inilah yang dapat menyebabkan terjadinya aliran sekunder (*secondary flow*) pada masing-masing *cross section elbow*, mulai dari *inlet elbow* pada posisi  $0^\circ$  sampai *outlet elbow* pada posisi  $90^\circ$  yang ditunjukkan pada gambar 2.7 (a).



(a)



(b)

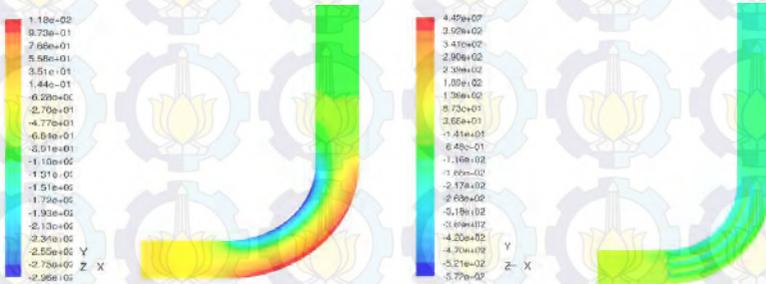
**Gambar 2.7** (a) *Secondary flow* pada masing-masing *cross section elbow 90°* (Marn dan Primoz, 2006) (b) Variasi *friction factor* dengan penambahan *guide vane* (Liou et al,2001)

Untuk mengurangi terjadinya aliran sekunder (*secondary flow*) dilakukan pemasangan *guide vane* pada pipa circular elbow  $90^\circ$  untuk fluida *non newtonian*. Penelitian dilakukan pada masing-masing *cross section*, dimana *secondary flow* merupakan gerakan sepasang *vortex* dari *outer wall* menuju *inner wall*. Dari hasil penelitian yang ditunjukkan gambar 2.7 (a) vortex mulai muncul pada posisi  $36^\circ$  dan mulai terdeformasi pada posisi  $90^\circ$ .



Penelitian tentang *guide vane* pernah dilakukan **Liou dan Lee (2001)** mengenai pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *friction factor*. Penelitian dilakukan dengan menambah *inlet guide vane* pada *curved duct* di *side dump combustor* dengan menggunakan 4 jenis variasi *guide vane* yaitu tanpa *vane*, 1 *vane*, 2 *vane* dan 3 *vane*. *Guide vane* secara horisontal membagi *curved duct* menjadi bagian yang sama dengan *Reynold Number* ( $Re_c$ ) adalah  $2.6 \times 10^4$ . Dari hasil penelitian gambar 2.7 (b) menunjukkan dengan menambah satu *guide vane* maka *friction factor* akan menurun. Namun ketika ditambah dua atau tiga *guide vane* nilai *friction factor* yang terjadi cenderung meningkat.

**Iswati (2009)** melakukan studi numerik dan eksperimental pada penambahan dua *guide vanes* terhadap penurunan tekanan (*pressure drop*) pada *elbow rectangular 90°* dengan angka *Reynolds*  $1,2 \times 10^5$ .



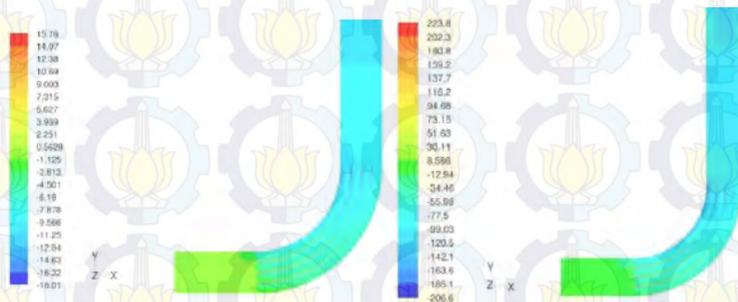
**Gambar 2.8** Studi numerik kontur tekanan statis ( $\text{N/m}^2$ ) pada *midspan elbow* (a) tanpa *guide vanes*; (b) dengan dua *guide vanes* (**Iswati, 2009**)

Pada *elbow* tanpa *guide vane* kontur tekanan statis ditunjukkan pada gambar 2.8 (a). Terlihat bahwa aliran masih mempunyai tekanan statis pada daerah *upstream*. Kemudian akan mulai terpengaruh oleh kelengkungan geometri *elbow* yang berbelok  $90^\circ$ , akibatnya distribusi tekanan statis pada sisi *inner*



dan *outer* tidak sama. Tekanan minimum terjadi pada sisi *inner* sedangkan tekanan maksimum terjadi pada sisi *outer*. Pada gambar 2.8 (b) juga terlihat bahwa dua *guide vanes* membagi satu *elbow* menjadi tiga bagian yang sama besar dan masing-masing mempunyai sisi *inner* dan *outer*. Sisi *inner* tetap mempunyai tekanan yang rendah sedangkan sisi *outer* mempunyai tekanan yang tinggi. Namun dengan penambahan dua *guide vanes*, antara sisi *inner* dan *outer elbow* perbedaan *pressure coefficient* ( $C_p$ ) menjadi kecil. Dari hasil penelitian dengan penambahan dua *guide vanes* didapatkan perbedaan  $C_p$  *outer wall* dengan *inner wall* sangat kecil, maka aliran sekunder (*secondary flow*) yang terjadi sangat kecil akibatnya penurunan tekanan (*pressure drop*).

**Sutrismo (2012)** melakukan studi tentang pengaruh penambahan *partial guide vane* 5 mm terhadap *pressure drop* aliran didalam *rectangular elbow 90* dengan *Reynolds* =  $2,1 \times 10^4$  dan  $8,4 \times 10^4$  dengan metode numerik dan eksperimen untuk mengetahui penurunan tekanan (*pressure drop*) disepanjang sisi *output* dan *input* didalam *rectangular elbow 90*.



**Gambar 2.9** Kontur tekanan statis ( $N/m^2$ ) *elbow* dengan tiga *guide vane* (numerik) (**Sutrismo, 2009**)

Dari hasil kontur tekanan statis pada gambar 2.9 didapatkan bahwa pengaruh penambahan tiga *guide vane* justru



meningkatkan penurunan tekanan (*pressure drop*) aliran. Penambahan *partial guide vane* justru akan memperbesar friksi.

**Tabel 2.1** Matrik perbandingan penelitian terdahulu

Jumlah Guide Vane	$Re_{Dh} \approx 2,1 \times 10^4$	$Re_{Dh} \approx 8,4 \times 10^4$	$Re_{Dh} \approx 1,2 \times 10^5$	$Re_{Dh} \approx 1,4 \times 10^5$
1 Guide vane	Farida (2008) eksperimen	Farida (2008) eksperimen	Affan (2009) eksperimen & numerik	Amalia (2010) eksperimen & numerik
2 Guide Vane	Hakim (2008) eksperimen	Hakim (2008) eksperimen	Iswati (2009) eksperimen & numerik	Puti (2010) eksperimen & numerik
3 Guide Vane	Sutrisno (2009) eksperimen	Sutrisno (2009) eksperimen	Nadia (2010) eksperimen & numerik	Puspita (2010) eksperimen & numerik
5 mm Partial GV				Thoha (2012) eksperimen & numerik
10 mm Partial GV				Adhi Guna (2012) eksperimen & numerik

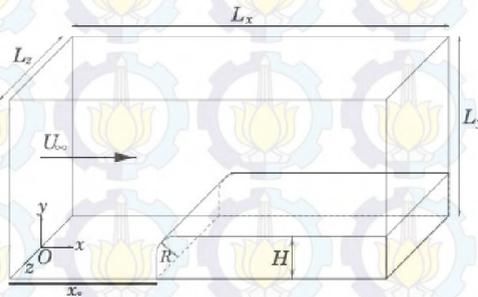
Dari table 2.1 diatas merupakan penelitian-penelitian terdahulu tentang penambahan guide vane pada rectangular elbow  $90^\circ$ . Penelitian yang dilakukan baik dengan menggunakan numerik maupun eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh penambahan jumlah guide vane dan angka reynold terhadap *pressure drop*. Hasil visualisasi aliran yang didapat pada



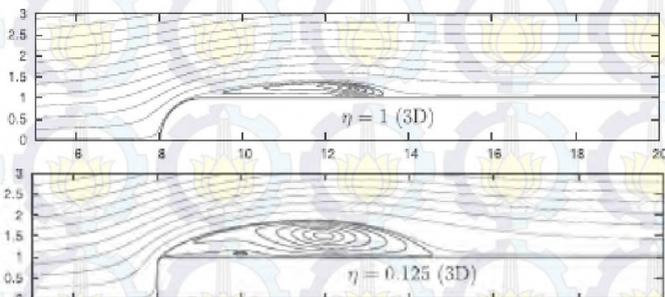
numerik untuk dibandingkan pada hasil yang didapat saat eksperimen.

### 2.7 Pengaruh besarnya $\eta = R/H$ terhadap percepatan terjadinya separasi pada bidang sisi *rounded*

Yang dan Voke (2001) melakukan studi tentang pengaruh besarnya  $\eta = R/H$  terhadap besarnya separasi yang terjadi pada bidang sisi *rounded* dengan *Reynolds number*: 1725 dengan variasi nilai  $R/H$ . Pada kasus ini dapat diambil sebuah pengertian bahwa semakin besar nilai  $\eta = R/H$  maka sisi bidang tersebut semakin *rounded*.



(a)



(b)

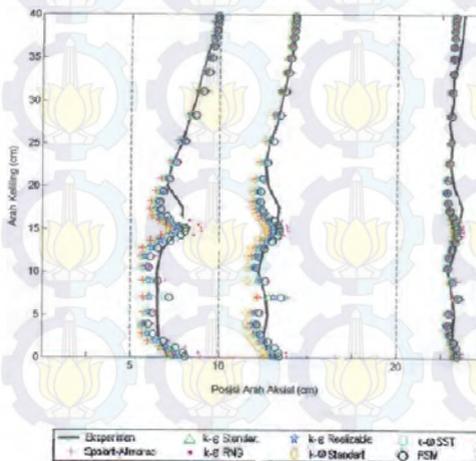


**Gambar 2.10** (a) Parameter dimensi bidang (b) Separasi pada 3D untuk  $\eta = R/H = 1, 0.125$

Dari gambar 2.10 (b) didapat diambil sebuah pengertian bahwa semakin besar nilai panjang separasi ( $L_r$ ), sudut separasi ( $\theta$ ) dan ketinggian separasi ( $h_r$ ) maka bidang tersebut cenderung menimbulkan separasi yang besar dan panjang. Jadi dapat diambil sebuah pengertian bidang dengan nilai  $\eta = R/H = 1$  (paling rounded) lebih cenderung menunda dan menghasilkan separasi paling kecil.

## 2.8 Fluent Tutorial

Selanjutnya pada fluent tutorial dari Nur Ikhwan (2009) diambil contoh tentang kasus simulasi aliran pada *rectangular bend 90°*. Perbandingan model turbulensi dijelaskan pada *Fluent* tutorial dengan mengkomparasi aliran melewati *rectangular elbow* dengan menggunakan *model turbulensi Spallart-Allamaras, k- $\omega$ , k- $\epsilon$ , dan Reynolds Stress Model (RSM)*. Berikut ini akan disajikan grafik *static pressure* dengan menggunakan berbagai model.





**Gambar 2.11** Prediksi tekanan statis dinding *outlet rectangular bend 90°* menggunakan berbagai macam permodelan (Nur Ikhwan, 2009)

Gambar 2.11 menunjukkan hasil prediksi ketujuh model turbulensi dimana prediksi tekanan statis dinding dari tujuh permodelan turbulensi yang memberikan hasil paling akurat adalah permodelan *k-ε*, *RNG* dan permodelan *RSM*. Untuk memperjelas grafik diatas, maka diberikan tabel penyimpangan dari masing –masing model yang digunakan dalam simulasi numeric pada  $x=5$  (mengacu pada tabel 2.1)

**Tabel 2.2** Error dalam memprediksi tekanan statis *rectangular bend 90°* pada masing masing permodelan turbulensi (Nur Ikhwan,2009)

No	Hasil Eksperimen/Simulasi	% Error
1	Eksperimen (Eddy,2000)	-
2	Spalart-Allamaras	7,53
3	<i>k-ε</i> Standart	4,52
4	<i>k-ε</i> RNG	4,66
5	<i>k-ε</i> Realizable	4,39
6	<i>k-ω</i> Standart	5,76
7	<i>k-ω</i> SST	4,99
8	RSM	4,44

Dari ketujuh permodelan, ermodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding adalah permodelan *k-ε Realizable*. Hal ini dikarenakan *error* yang terjadi pada model tersebut paling kecil, sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan permodelan lain untuk mendeskripsikan tekanan statis.



## 2.9 Deskripsi Tentang RANS *Turbulence Model*

- **Realizable  $k-\varepsilon$** : Variasi pemodelan dari standard  $k-\varepsilon$  model. Permodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding. Hal ini karena *error* yang terjadi pada model tersebut paling kecil. Pada jenis permodelan ini paling cocok untuk memprediksi laju penyebaran pancaran *nozzel/jet*. Model ini juga memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar, separasi dan resirkulasi
- **RNG (*Renormalization-group*)  $k-\varepsilon$** : Variasi pemodelan dari *standard  $k-\varepsilon$*  model. Model ini sangat signifikan untuk mengubah dalam persamaan  $\varepsilon$  sehingga dapat memperbaiki untuk model yang mempunyai *highly strained flows*. Dalam model ini juga dapat digunakan untuk aliran yang mempunyai  $Re$  yang rendah dan untuk memprediksi aliran yang mempunyai efek *swirling*.
- **RSM (*Reynold steress model*)**: Merupakan model turbulensi yang paling teliti pada fluent. Model RSM mendekati persamaan Navier-Stokes (*Reynolds-averaged*) dengan menyelesaikan persamaan transport. Model ini menggunakan 5 persamaan transport, lebih banyak dibanding model turbulensi yang lain.
- **Spalart–Allmaras**: Merupakan model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan *transport* untuk viskositas turbulen. Model ini didesain secara khusus untuk aplikasi *aerospace* yang melibatkan *wall-bounded flows* dan telah menunjukkan hasil yang baik untuk lapisan batas yang dipengaruhi *adverse pressure gradient*. Bentuk dasar model spalart – allmaras hanya efektif pada model dengan bilangan Reynolds yang kecil. Model ini dapat digunakan untuk simulasi yang relatif kasar dengan ukuran *mesh* yang besar, dimana perhitungan aliran turbulen yang akurat bukan merupakan hal yang kritis.
- **Standard  $k-\varepsilon$** : Pemodelan yang menggunakan persamaan transport untuk *turbulent kinetic energy (k)* dan *dissipation*



rate ( $\epsilon$ ). Model ini juga dapat menyelesaikan untuk *heating*, *buoyancy*, and *compressibility* yang dapat diselesaikan dalam  $k$ - $\epsilon$  model yang lainnya. Model tidak cocok untuk aliran kompleks yang meliputi *stong stream curvature* dan *separation*.

- **Standard  $k$ - $\omega$** : Pemodelan yang menggunakan dua persamaan transport model untuk *turbulent kinetic energy* ( $k$ ) dan *specific dissipation rate* ( $\omega$ ). Pemodelan ini juga dapat digunakan untuk aliran yang memiliki  $Re$  yang rendah. Pemodelan ini juga dapat menampilkan transisi aliran dari aliran laminar menuju aliran turbulen. Keuntungan lainnya adalah dapat menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.
- **SST (*Shear-stress transport*)  $k$ - $\omega$** : Variasi dari pemodelan standard  $k$ - $\omega$ . Mengkombinasikan pemodelan asli untuk menggunakan *near wall treatment* dan standard  $k$ - $\epsilon$  model.

### 2.10 Parameter Pada Kondisi Batas

- **Cell Zone, Fluid**: kondisi ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai fluida dan sebagai media berpori. Data yang harus dimasukkan hanya material fluida. Kondisi batas ini digunakan untuk kasus aliran periodik secara rotasional.
- **Cell Zone, Solid**: kondisi ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai padatan dan heat generation rate pada kontinum solid. Data yang harus dimasukkan hanya material padatan. Kondisi batas ini digunakan untuk kasus aliran periodik secara rotasional.
- **Dinding (Wall)**: kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.
- **Mass Flow Inlet**: pada kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperatur fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan gauge pada sisi masuk, arah aliran dan besaran turbulensi. Nilai



tekanan gauge tersebut sebenarnya hanya akan digunakan sebagai tebakan awal oleh Fluent dan akan dikoreksi sendiri sejalan dengan proses iterasi.

- **Inlet Vent dan Outlet Vent:** kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat peralatan ventilasi di sisi saluran masuk/keluar yang dapat menimbulkan kerugian tekanan pada aliran. Data yang dimasukkan sama seperti pada kondisi batas pressure outlet/pressure inlet.
- **Intake Fan dan Exhaust Fan:** kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat fan blower disisi luar saluran masuk/keluar untuk menghembuskan/menghisap fluida di dalam saluran. Data yang dimasukkan sama seperti pada kondisi batas pressure outlet/pressure inlet.
- **Kondisi Batas Internal:** yang termasuk kondisi batas internal antara lain adalah fan, radiator, porous jump, interior. Kondisi batas ini digunakan untuk bidang yang berada di tengah medan aliran dan tidak mempunyai ketebalan.
- **Outflow:** kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar. Tidak perlu memasukkan data apapun pada kondisi batas ini, namun kondisi harus inkompresible flow (Firman Tuakia, "Dasar-Dasar CFD", 2008).
- **Periodic:** kondisi batas periodik juga digunakan untuk mengurangi daya komputasi pada kasus tertentu. Kondisi batas ini hanya dapat digunakan pada kasus yang mempunyai medan aliran dan geometri yang periodik, baik secara translasi atau rotasi.
- **Pressure Inlet:** pada kondisi batas ini harus dimasukkan data tekanan total (absolut), tekanan gauge, temperatur, arah aliran dan besaran turbulen. Tekanan total yang dimaksud di sini merupakan penjumlahan dari nilai tekanan operasi dan tekanan gauge.



- **Pressure Outlet:** kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya. Pada kondisi batas pressure outlet harus memasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (backflow) dan besaran turbulen aliran balik.
- **Pressure Far Inlet:** digunakan untuk memodelkan aliran kompressibel free stream yang mempunyai dimensi yang sangat panjang (jarak antara inlet dan outlet jauh sekali). Kondisi batas ini berada pada sisi keluar aliran. Besaran yang harus dimasukkan adalah tekanan gauge, bilangan Mach, temperatur aliran (jika melibatkan temperatur/energi), arah aliran dan besaran turbulensi pada sisi keluar.
- **Porous Media:** Porous zone merupakan pemodelan khusus dari zona fluida selain padatan dan fluida. Digunakan untuk memodelkan aliran yang melewati media berpori dan tahanan terdistribusi.
- **Symmetry dan Axis:** kedua kondisi batas ini digunakan untuk mengurangi daya komputasi yang dibutuhkan pada suatu kasus. Pada panel kondisi batas untuk kedua kondisi batas ini tidak ada input data yang diperlukan.
- **Velocity Inlet:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresible.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB III

### METODA PENELITIAN

Didalam bab ini akan dijelaskan tentang analisa dimensi, instalasi penelitian, alat ukur yang digunakan, prosedur pengukuran, visualisasi aliran dengan metode numerik, diagram alir penelitian serta contoh perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini.

#### 3.1 Analisa Dimensi Parameter-parameter yang Dianalisa

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu eksperimen. Hubungan antara parameter yang saling mempengaruhi ditunjukkan dalam bentuk parameter-parameter tanpa dimensi. Metode analisa ini dikenal dengan *Buckingham Pi Theorem*. Dalam skema penelitian pada gambar 3.1, parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran di dalam *elbow 90°* yang dilengkapi dengan sudu pengarah (*guide vane*).

$\Delta p$  : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi

$\rho$  : massa jenis fluida

$\mu$  : viskositas absolut fluida

$U_{ref}$  : kecepatan *freestream* di *inlet elbow 90°*

$u$  : kecepatan lokal

$a$  : tinggi *cross section elbow 90°*

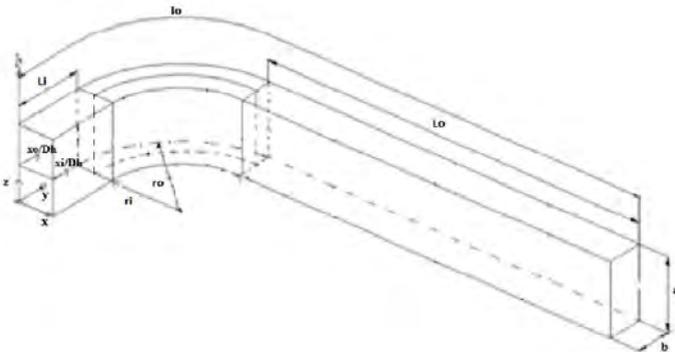
$r_i$  : *inner radius*

$r_o$  : *outer radius*

$r$  : posisi pada arah normal terhadap *streamline elbow 90°*



- $x_i$  : posisi searah *streamline* pada dinding dalam *elbow*  $90^\circ$
- $x_o$  : posisi searah *streamline* pada dinding luar *elbow*  $90^\circ$
- $l_i$  : panjang total *inner* searah *streamline* *elbow*  $90^\circ$
- $l_o$  : panjang total *outer* searah *streamline* *elbow*  $90^\circ$
- $z_h$  : sumbu vertikal saluran
- $D_h$  : diameter hidrolisk saluran
- $\theta_h$  : bilangan untuk menyatakan derajat sudut *elbow* dimulai pada  $x_i/D_h = 1,499$  yaitu pada *inlet elbow*  $90^\circ$  dan  $x_i$  dimulai dari *inlet test section*.
- $L_i$  : panjang *inlet elbow*  $90^\circ$
- $L_o$  : panjang *outlet elbow*  $90^\circ$
- $b$  : lebar *cross section* *elbow*  $90^\circ$



**Gambar 3.1** Skema penelitian



Dengan menganggap  $\Delta p$  dan  $u$  sebagai *dependent variable* maka dapat dituliskan persamaan 3.1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta p &= f_1(\rho, \mu, b, a, r_b, r_o, r, x_i, x_o, z_h, l_i, l_o, U_{ref}, D_h) \\ u &= f_2(\rho, \mu, b, a, r_b, r_o, r, x_i, x_o, z_h, l_i, l_o, U_{ref}, D_h)\end{aligned}\quad (3.1)$$

Dari persamaan 3.1 didapatkan parameter berdimensi ( $n = 15$ ) sebagai berikut :

$$\Delta p, \rho, \mu, b, a, r_b, r_o, r, x_i, x_o, z_h, l_i, l_o, U_{ref}, D_h \quad (3.2)$$

$$u, \rho, \mu, b, a, r_b, r_o, r, x_i, x_o, z_h, l_i, l_o, U_{ref}, D_h \quad (3.3)$$

Dipilih repeating parameter ( $m = r = 3$ ) yang diperoleh dari parameter berdimensi  $\rho, U_{ref}$  dan  $D_h$ . Dari analisa dimensi akan diperoleh 12 grup tak berdimensi ( $n-m = 12$ ) pada masing-masing *dependent variable*  $\Delta p$  dan  $u$  sebagai berikut:

- *Dependent variable*  $\Delta p$

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= \frac{\Delta p}{\rho \cdot U_{ref}}; \Pi_2 = \frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}; \Pi_3 = \frac{a}{D_h}; \Pi_4 = \frac{b}{D_h}; \Pi_5 = \frac{r_i}{D_h}; \\ \Pi_6 &= \frac{r_o}{D_h}; \Pi_7 = \frac{r}{D_h}; \Pi_8 = \frac{x_o}{D_h}; \Pi_9 = \frac{x_i}{D_h}; \Pi_{10} = \frac{z_h}{D_h}; \Pi_{11} \\ &= \frac{l_i}{D_h}; \Pi_{12} = \frac{l_o}{D_h}\end{aligned}\quad (3.4)$$

- *Dependent variable*  $u$

$$\begin{aligned}\Pi_{13} &= \frac{u}{U_{ref}}; \Pi_{14} = \frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}; \Pi_{15} = \frac{a}{D_h}; \Pi_{16} = \frac{b}{D_h}; \Pi_{17} = \frac{r_i}{D_h}; \\ \Pi_{18} &= \frac{r_o}{D_h}; \Pi_{19} = \frac{r}{D_h}; \Pi_{20} = \frac{x_o}{D_h}; \Pi_{21} = \frac{x_i}{D_h}; \Pi_{22} = \frac{z_h}{D_h}; \\ \Pi_{23} &= \frac{l_i}{D_h}; \Pi_{24} = \frac{l_o}{D_h}\end{aligned}\quad (3.5)$$

Sehingga dihasilkan pula fungsi persamaan tak berdimensi yaitu koefisien tekanan ( $C_p$ ) dan kecepatan tak berdimensi  $\frac{U}{U_{ref}}$  seperti pada persamaan 3.7 dan 3.9 sebagai berikut:



$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = f_1(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}) \quad (3.6)$$

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{x_i}{D_h}, \frac{z_h}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}\right) \quad (3.7)$$

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_2(\Pi_{15}, \Pi_{16}, \Pi_{17}, \Pi_{18}, \Pi_{19}, \Pi_{20}, \Pi_{21}, \Pi_{22}, \Pi_{23}, \Pi_{24}, \Pi_{25}) \quad (3.8)$$

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{x_i}{D_h}, \frac{z_h}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}\right) \quad (3.9)$$

Dari kelompok-kelompok tak berdimensi di atas, parameter-parameter yang dianggap konstan (tidak divariasikan) adalah:

$$\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{z_h}{D_h}, \frac{b}{D_h}\right) \quad (3.10)$$

Parameter yang dianggap konstan dapat dikeluarkan dari fungsi persamaan tak berdimensi. Pada penelitian ini digunakan angka *Reynolds* yang didasarkan pada  $D_h$  sehingga didapat  $Re_{D_h} = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$ , dengan analisa dimensi didapatkan parameter  $\frac{r}{b}$  yang dinyatakan dalam perhitungan sebagai berikut:

- *Dependent variable*  $\Delta p$

$$\Pi_{13} = \frac{\pi_7}{\pi_4} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{b}{D_h}} = \frac{r}{b} \quad (3.11)$$

- *Dependent variable*  $u$



$$\Pi_{25} = \frac{\Pi_{19}}{\Pi_{16}} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{b}{D_h}} = \frac{r}{b} \quad (3.12)$$

Dalam hal ini  $D_h$  dinyatakan dalam bentuk persamaan 3.13 berikut ini:

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (3.13)$$

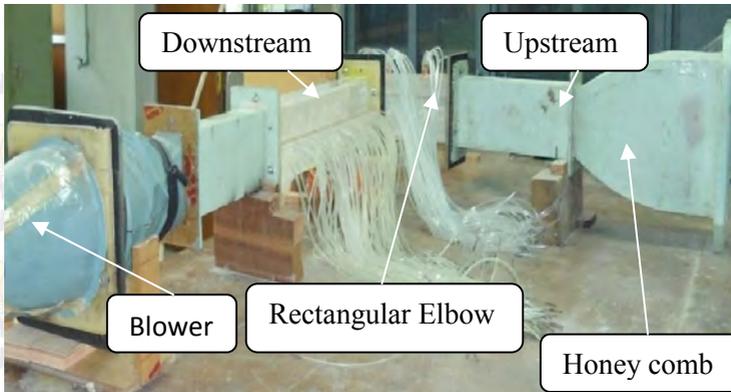
Dari beberapa pertimbangan di atas maka persamaan 3.7 dan 3.9 dapat ditulis sesuai dengan persamaan 3.14 dan 3.15 sebagai berikut:

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = f_3 \left( \frac{x_i}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{r}{b} \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_4 \left( \frac{x_i}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{r}{b} \right) \quad (3.15)$$

### 3.2 Instalansi Penelitian

Untuk mendukung penelitian maka dibuat instalasi penelitian dengan spesifikasi yang telah ditentukan sebelumnya berdasarkan perumusan masalah. Masing-masing instalasi akan dijelaskan pada gambar 3.2 dibawah ini.



**Gambar 3.2** Instalasi penelitian

**1) Blower**

Pada penelitian ini digunakan *blower* sentrifugal dengan spesifikasi sesuai pada gambar 3.3 sebagai berikut:



**Gambar 3.3** Centrifugal Blower

Merek	: CKE (model DE190)
Tipe	: <i>Direct Centrifugal Blower</i>
Kapasitas	: 4.8 m <sup>3</sup> /menit
Daya	: 1,1 KW



Putaran : 2800 RPM

## 2) *Honey Comb*

*Honey comb* berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati uniform dan menghindari terjadinya turbulensi aliran ketika memasuki instalasi pipa rectangular yang ditunjukkan pada gambar 3.4 sebagai berikut:



Gambar 3.4 *Honey Comb*

## 3) Model Uji

Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model uji, yaitu *rectangular elbow* dengan penambahan *rounded leading and trailing edges guide vane* dengan spesifikasi sebagai berikut :

- *Elbow* : *Rectangular elbow 90°*
- Bahan : Akrilik transparan,
- Tebal : 6 mm
- $L_i$  (panjang inlet *elbow*) : 100 mm
- $L_o$  (panjang outlet *elbow*): 540 mm
- $r_i$  (*inner radius*) : 100 mm
- $r_o$  (*outer radius*) : 150 mm
- $r_m$  (*mean radius*) : 100 mm
- $a$  (tinggi) : 100 mm
- $b$  (lebar) : 50 mm
- $D_h$  (diameter hidrolis) : 66,7 mm



-  $r_m/D_h$  (radius ratio) : 1,875

#### 4) *Guide vane*

- Bahan : Akrilik transparan
- tebal : 2mm
- $\theta$  (sudut rentang) :  $90^\circ$
- $r_m$  (mean radius) : 125 mm
- Tebal *guide vane* : 2 mm

### 3.3 **Peralatan pendukung**

Peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

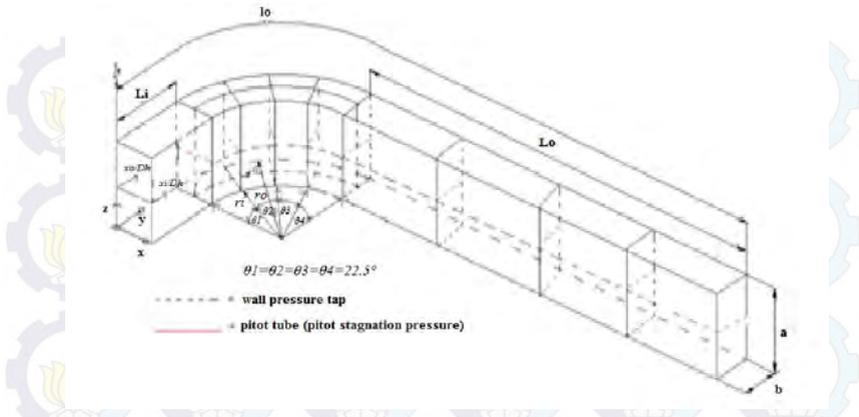
- *Stagnation pressure tube (Pitot tube)*

*Pitot tube* digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi dengan diameter luar sebesar 0,7 mm berfungsi untuk mengukur tekanan stagnasi aliran pada setiap titik yang telah ditentukan didalam model uji. Pergeseran titik pengukuran secara horizontal pada setiap cross section yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran 2,5 mm.

- *Wall pressure tap*

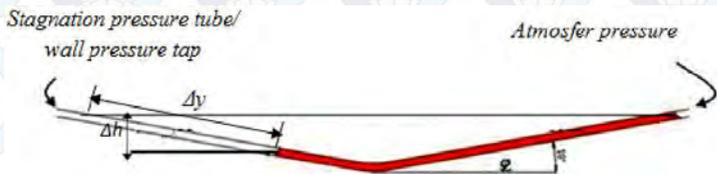
*Wall pressure tap* digunakan untuk mengukur tekanan statis, pemasangannya di sepanjang dinding lokasi pengukuran. Pressure tap berbentuk lubang-lubang kecil berdiameter 5 mm.

Skema pemasangan *wall pressure tap* dan *pitot tube* ditunjukkan sesuai pada gambar 3.5 sebagai berikut:



**Gambar 3.5** Skema Pemasangan *wall pressure tap* dan *pitot tube*

- *Inclined manometer (Manometer V)* dan *Mistar Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube*. *Manometer* yang digunakan mempunyai kemiringan sebesar  $10^\circ$  yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan  $\Delta h$ . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.6.



**Gambar 3.6** *Inclined manometer* dan *mistar*



Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Kerosin* (SG = 0,82)
- Kemiringan : 10°

- *Thermometer*

*Thermometer* digunakan untuk mengukur temperatur udara di dalam ruangan.

**Tabel 3.1** Posisi pengukuran *pressure tap* pada *rectangular elbow* 90°.

Inner Wall		Outer Wall	
Posisi Pengukuran	Jarak dari inlet ( mm )	Posisi Pengukuran	Jarak dari inlet ( mm )
Section 1	0	Section 1	0
Section 2	100	Section 2	100
Section 3	115.7	Section 3	123.55
Section 4	131.4	Section 4	147.1
Section 5	147.1	Section 5	170.65
Section 6	162.8	Section 6	194.2
Section 7	297.8	Section 7	329.2
Section 8	432.8	Section 8	464.2
Section 9	567.8	Section 9	599.2
Section 10	702.8	Section 10	734.2

### 3.4 Langkah-langkah eksperimen

Beberapa tahap yang dilakukan pada penelitian adalah sebagai berikut:

#### 3.4.1 Pengambilan data kuantitatif

Parameter yang diukur pada penelitian ini meliputi tekanan stagnasi dan tekanan statis. Sebelum melakukan



pengambilan data maka perlu dilakukan pengukuran suhu ruangan terlebih dahulu. Masing-masing pengukuran memiliki prosedur pengambilan data yang berbeda dan akan dijelaskan sebagai berikut:

1) Prosedur pengukuran tekanan dinamis

Prosedur pengukuran tekanan dinamis adalah sebagai berikut:

- a) Persiapan *test section*.
- b) Pemasangan *pitot tube* pada posisi yang ingin diukur.
- c) Penghubungan *pitot tube* dan *pressure tap* ke *inclined manometer* dengan selang kapiler.
- d) Pencatatan bacaan awal yang ditunjukkan oleh *inclined manometer*.
- e) Pengaturan bukaan *blower* sesuai keinginan ( $U_{ref} \approx 5$  m/s).
- f) Pencatatan bacaan akhir pada *inclined manometer*.
- g) Mengulangi langkah e – f sampai titik tekanan dinamis terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.

2) Prosedur pengambilan data tekanan statis.

Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:

- a) Persiapan *test section*.
- b) Penghubungan *pressure tap* yang sudah terpasang di dinding ke *inclined manometer* dengan selang kapiler.
- c) Pencatatan bacaan awal yang ditunjukkan oleh *inclined manometer*.
- d) Pengaturan bukaan *blower* sesuai kecepatan *free stream* yang akan di-set ( $U_{ref} \approx 5$  m/s).
- e) Pencatatan bacaan akhir pada *inclined manometer*.
- f) Melepaskan selang kapiler lalu menghubungkan ke *pressure tap* berikutnya ke *inclined manometer*, sampai *pressure tap* terakhir.



### 3.4.2 Pengolahan data kuantitatif

Pengolahan data dilakukan dengan membuat sebuah contoh perhitungan. Beberapa data awal yang diperlukan untuk melakukan proses perhitungan adalah:

- Diameter hidrolik *elbow* ( $D_h$ ) : 66,7 mm
- Panjang *upstream* sampai *downstream*
  - *inner wall* ( $l_i$ ) : 797 mm
  - *outer wall* ( $l_o$ ) : 875.5 mm
- Sudut *inclined manometer* ( $\theta$ ) : 10°
- *Specific Gravity red oil* ( $SG_{redoil}$ ) : 0,82
- Percepatan Gravitasi ( $g$ ) : 9,81 m/s<sup>2</sup>
- Temperatur ruangan dianggap konstan ( $T$ ) : 28°C
- Massa jenis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$  ( $\rho_{ud}$ ) : 1,182 kg/m<sup>3</sup>
- Viskositas kinematis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$  ( $\nu$ ) : 1,59 x 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s
- Massa jenis air pada  $T = 28^\circ\text{C}$  ( $\rho_{H_2O}$ ) : 996,4 kg/m<sup>3</sup>

#### 1) Perhitungan untuk bukaan blower

Pada eksperimen ini digunakan angka Reynolds sebesar 2,1 x 10<sup>4</sup>. Melalui persamaan 3.16 didapatkan kecepatan awal 5 m/s.

$$Re_{DH} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.16)$$

Dimana:

- $\rho_{ud}$  : massa jenis udara
- $\nu$  : viskositas kinematis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$
- $\mu$  : viskositas absolut udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$



- $U_{ref}$  : kecepatan freestream pada inlet elbow ( $x_i/D_h = 0$  atau  $x_o/D_h = 0$ )
- $D_h$  : diameter hidraulik elbow

Untuk mendapatkan kecepatan awal ( $U_{ref}$ ) sebesar 5 m/s dilakukan pengaturan bukaan blower secara manual melalui pengukuran nilai  $\Delta h$  menggunakan persamaan 3.17 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.17)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 = SG_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$\Delta h = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref}^2}{2 \cdot SG_{redoil} \cdot \rho_{H2O} \cdot g}$$

$$\Delta h = 2 \cdot \Delta y \cdot \sin \theta$$

$$\Delta y = \frac{\Delta h}{2 \cdot \sin \theta}$$

Blower yang digunakan pada eksperimen ini berjenis blower sentrifugal Untuk mendapatkan kecepatan referensi ( $U_{ref}$ ) sebesar 5 m/s dilakukan pengaturan bukaan blower dengan menggunakan wall pressure tap dan stagnation pressure tube. Kedua alat ukur tersebut kemudian dihubungkan pada inclined manometer secara bersamaan untuk mendapatkan tekanan dinamis. Bukaan tersebut dijadikan acuan dalam pengambilan data distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) dan profil kecepatan aliran.

## 2) Perhitungan Pressure Coefficient ( $C_p$ )

Perhitungan wall pressure coefficient ( $C_p$ ) untuk elbow 90° pada sepanjang sisi inner dan outer wall dari test section yaitu pada bagian midspan yang berjarak 50 mm dari dinding atas elbow



Wall pressure coefficient ( $C_p$ ) dirumuskan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_{s,i} - P_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot U_{ref}^2}, \quad (3.18)$$

dimana:

- $P_{s,i}$ : tekanan statis pada *inner wall* di  $x/D_h = i$
- $P_{ref}$  : tekanan statis referensi pada  $x/D_h = 0$
- $\rho_{ud}$ : massa jenis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$
- $U_{ref}$  : kecepatan referensi pada *inlet section elbow* ( $x_i/D_h = x_o/D_h = 0$ )



**Gambar 3.7** Pembacaan *wall pressure tap* pada *inclined manometer*

- a) Perhitungan  $P_{s,i}$   
 $\Delta h = \Delta y \cdot \sin \theta$   
 $P_{s,i} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h$   
 $= SG_{redoil} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta h$
- b) Perhitungan  $P_{ref}$   
 $\Delta h = \Delta y \cdot \sin \theta$   
 $P_{ref} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h$
- c) Perhitungan  $C_p$   

$$C_p = \frac{P_{s,i} - P_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot U_{ref}^2}$$



### 3) Perhitungan kecepatan lokal

Profil kecepatan diukur pada sepuluh section baik pada *elbow* dengan *guide vane* biasa dan *rounded leading and trailing edges guide vane*. Perhitungan profil kecepatan dari inner wall pada *elbow* dapat ditulis sesuai persamaan 3.19 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{ud}}} \quad (3.19)$$

Dimana

- $p_o$  : tekanan stagnasi yang diukur dengan *stagnation pressure tube*
- $p_s$  : tekanan statis sejajar dengan *stagnation pressure tube*
- $\rho_{ud}$  : massa jenis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$
- $p_s - p_o$  : tekanan dinamis

### 4) Perhitungan Pressure Drop ( $\Delta p$ )

*Pressure drop* adalah selisih tekanan *inlet* dan *outlet* pada *test section*. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hamper sama. Perhitungan  $p_{inlet}$  dan  $p_{outlet}$  sama dengan perhitungan  $p_{s,i}$ .

Dua parameter berupa tekanan statis dan stagnasi digunakan untuk menghitung *pressure coefficient* ( $C_p$ ) dan *velocity profile*, kemudian dari parameter – parameter tersebut akan diplot grafik – grafik sebagai berikut:

1. Grafik *pressure coefficient* ( $C_p$ ) fungsi sumbu  $x/D_h$  pada *inner wall* untuk masing-masing *Reynolds number*,  $C_p = f(x_i/D_h, Re_{Dh})$ .
2. Grafik *pressure coefficient* ( $C_p$ ) fungsi sumbu  $x/D_h$  pada *outer wall* untuk masing-masing *Reynolds number*,  $C_p = f(x_o/D_h, Re_{Dh})$ .

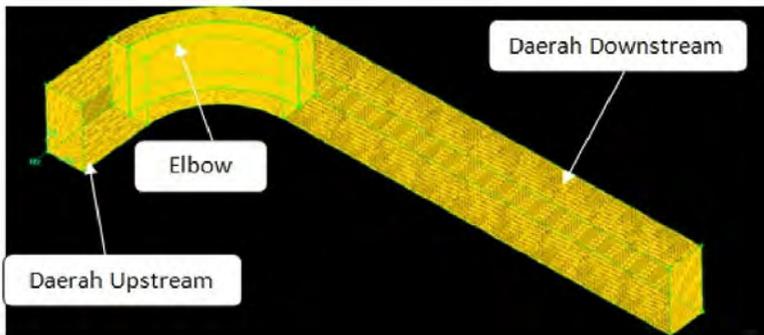


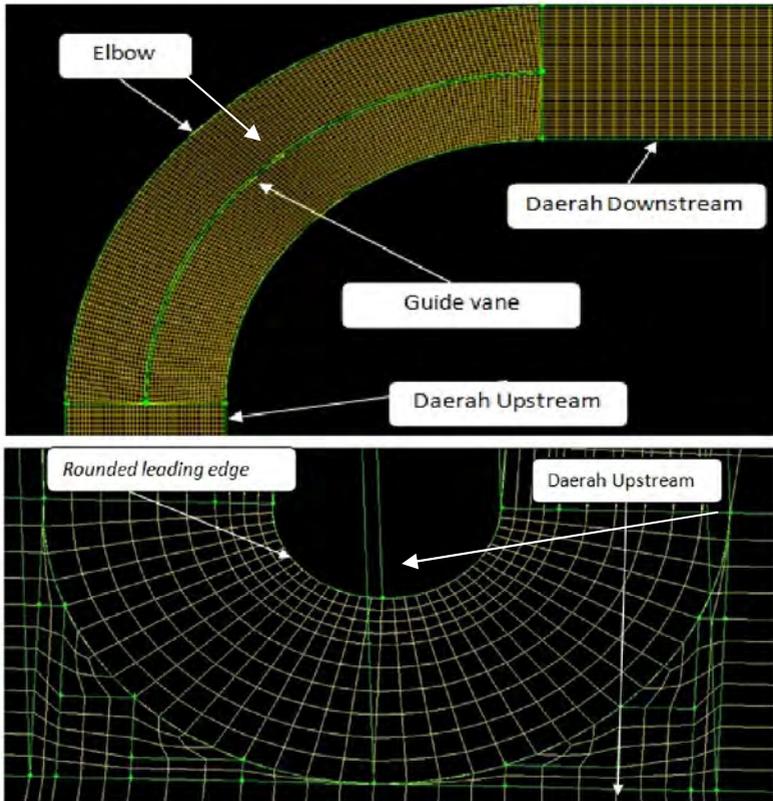
3. Grafik kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ) fungsi sumbu  $r$  pada posisi  $z_h = 0$ ,  $x_i/D_h = 0; 1,499; 1,734; 1,964; 2,205; 2,515; 4,464; 6,488; 8,512; 10,536$ ; dan pada sisi *outer wall* dan pada masing-masing *Reynold number*,  $u/U_{ref} = f(x_i/D_h, r/b, Re_{Dh})$ .

#### 1.4 Studi numerik

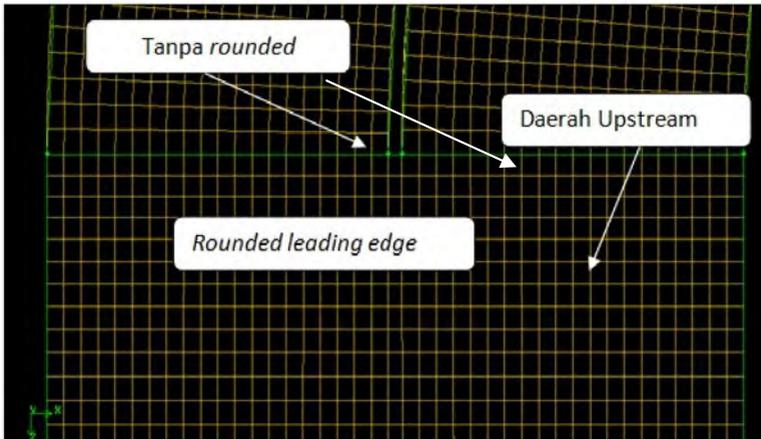
Pada penelitian ini digunakan visualisasi numerik 3-D dan digunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics(CFD)* dengan program Fluent 6.3.26 dan Gambit 2.4.6. Dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) *Grid*. Langkah ini dilakukan dengan mengimport grid yang telah dibuat pada *software* Gambit 2.4.6. Proses yang digunakan adalah menggambar model benda uji (*prototype*) berupa *rectangular elbow* serta *test section* berupa *upstream* dan *downstream*. Kemudian membuat *mesh volume* dengan model *map* karena akan menghasilkan *meshing* yang mendekati *streamline*.





**Gambar 3.8** Meshing volume pada elbow dengan rounded Leading edge guide vane



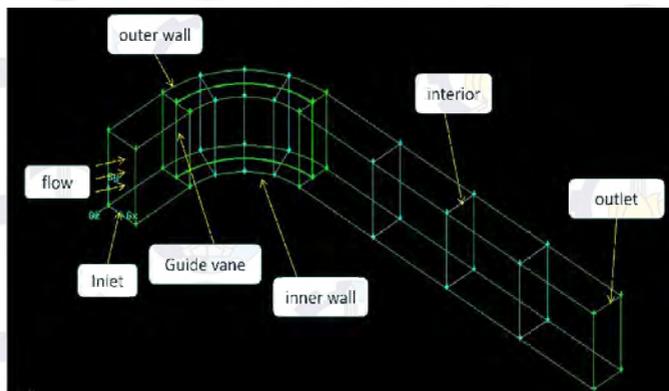
**Gambar 3.9** *Meshing volume pada elbow dengan tanpa rounded*

- 2) *Models*. Merupakan pemodelan karakteristik aliran, berupa penentuan jenis dan formula penyelesaian (*solver*), penentuan model turbulen yang akan digunakan. Model turbulen yang dipakai adalah ***k-ε Realizable***. Pemodelan bagus digunakan untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran blower. Model ini juga memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradient tekanan dan separasi.
- 3) *Materials*. Langkah yang penting dalam pemodelan di Fluent 6.2.36 untuk mendefinisikan sifat fisik material. Sifat material tersebut dapat ditentukan nilainya secara konstan dengan tidak mengaktifkan persamaan energi, maka konduktifitas thermal material tidak akan muncul dalam panel material. Penetapan jenis material yang akan digunakan yaitu udara dengan densitas  $1,182 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas  $1,59 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ .
- 4) *Operating Condition*. Merupakan perkiraan kondisi daerah operasi yang biasanya merupakan perkiraan



tekanan pada daerah operasi, yakni sebesar 101325 Pascal.

- 5) *Boundary Condition*. Merupakan penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran. Data yang diperlukan (input) pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau diasumsikan. Kondisi batas *inlet* adalah *velocity inlet* sebesar  $U_{ref} \approx 5$  m/s ( $Re_{Dh} \approx 2.1 \times 10^4$ ). Kondisi batas *outlet* adalah *outflow*, yang akan diukur pada sisi *downstream*.



**Gambar 3.10** *Boundary condition*

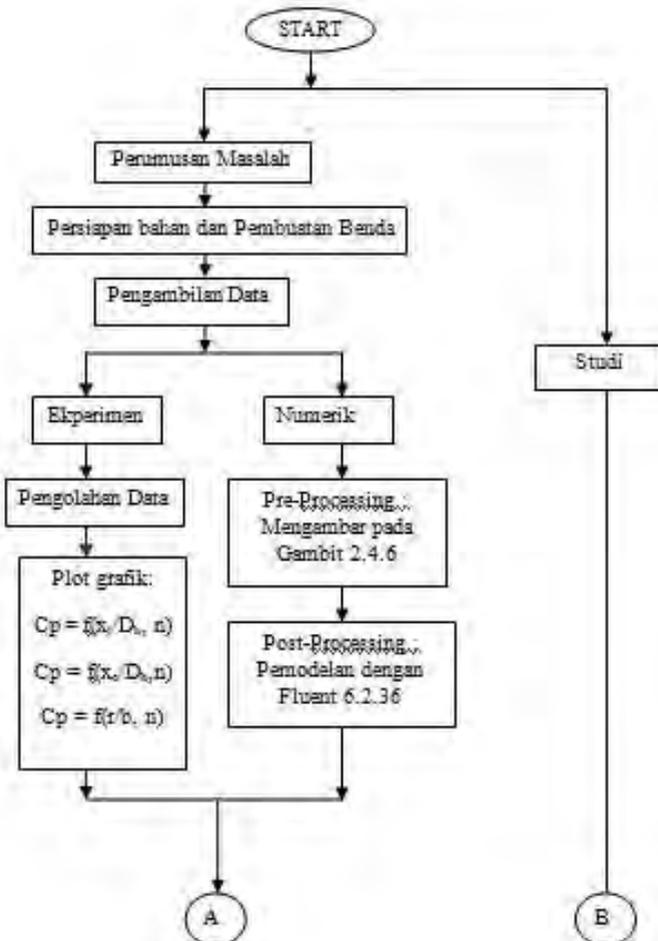
- 6) *Solution*. Merupakan tahap penyelesaian masalah berupa proses iterasi sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan, dalam pemodelan ini harganya sebesar  $10^{-6}$ .
- 7) *Initialize*. Pada tahap ini merupakan langkah perhitungan awal untuk memudahkan dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi, *Initialize* dihitung dari *velocity inlet*.
- 8) *Iterate*. Merupakan langkah kelanjutan dari monitor residual yang merupakan langkah perhitungan pada Fluent 6.2.36. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai *convergence criterion* sebesar  $10^{-6}$ .

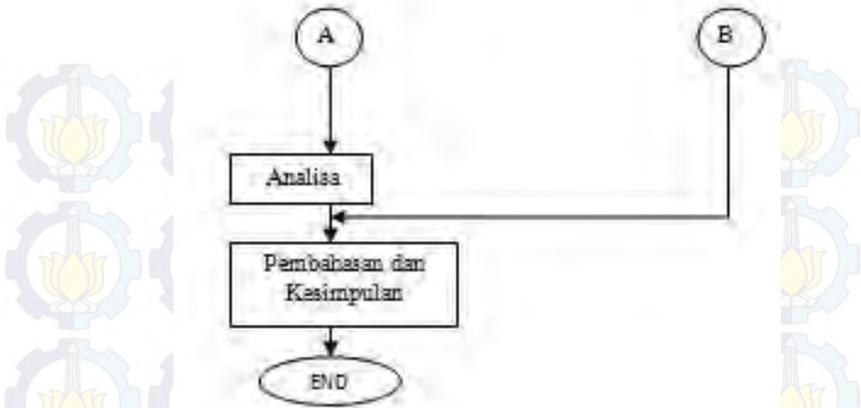


- 9) *Grid Independency*. Langkah ini diperlukan untuk mendapatkan hasil data yang tidak terpengaruh oleh jumlah *grid* sehingga data yang diperoleh lebih akurat. Pada langkah ini akan diperoleh *grid* yang paling efisien sehingga diperoleh data numerik yang dapat dibandingkan dengan data hasil eksperimen.
- 10) *Postprocessing*. Pada tahap ini merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh. Beberapa hasil yang akan didapatkan antara lain : kontur tekanan statis, kontur tekanan total, vektor kecepatan, kontur kecepatan dan *pathline*. Dihasilkan juga plot grafik koefisien tekanan statis.



Keseluruhan proses penelitian dengan metode eksperimen dan numerik dapat digambarkan dalam diagram alir pada gambar 3.11.





**Gambar 3.11** Diagram alir penelitian



## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditampilkan data, grafik dan penjelasan dari hasil studi eksperimen dan numerik. Hasil studi ditampilkan dan dibahas dalam beberapa sub bab meliputi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), kecepatan pada suatu penampang, dan *pressure drop*. Kemudian akan dilanjutkan pembahasan pada masing-masing variasi yaitu *rectangular elbow 90°* dengan tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane*.

Secara garis besar pembahasan hasil dan analisa pada penelitian ini dibagi menjadi dua variasi bagian yaitu : Pembahasan hasil eksperimen dan visualisasi aliran pada *rectangular elbow 90°* dengan penambahan tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane*. Dalam setiap bagian diuraikan dengan hasil eksperimen dan numerik pada bilangan *Reynolds*  $2.1 \times 10^4$ .

Hasil dan analisa pada *rectangular elbow 90°* dengan tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane* biasa difokuskan pada distribusi *wall pressure* ( $C_p$ ), distribusi profile kecepatan pada 8 *section* dan aliran sekunder yang terjadi pada aliran.

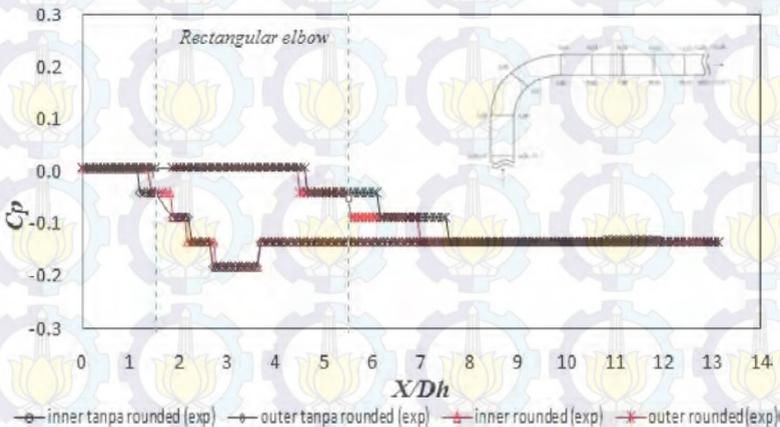
#### 4.1 Distribusi *Wall Pressure Coefficient* ( $C_p$ )

Untuk mendiskripsikan persamaan gerak pada aliran fluida disepanjang *streamline* dapat dibagi menjadi dua yaitu aliran searah *streamline* ( $s$ ) dan tegak lurus *streamline* ( $r$ ). Berikut ini akan dijelaskan distribusi koefisien tekanan searah dan tegak lurus *streamline*.



#### 4.1.1 Searah Streamline (s)

Dalam pembahasan ini daerah analisa dibagi menjadi tiga, yaitu daerah *upstream*, *elbow* dan *downstream*. Daerah *upstream* dan *downstream* berupa saluran lurus (*straight duct*). Pembahasan dilakukan dengan meninjau setiap sisi, yaitu sisi *inner* dan *outer*. Karakteristik aliran dijelaskan dengan mengacu kepada distribusi *wall pressure coefficient* ( $C_p$ ) sebagai representasi dari distribusi tekanan



**Gambar 4.1** Distribusi  $C_p$  inner dan outer wall rectangular elbow  $90^\circ$  dengan tanpa rounded dan rounded leading edge guide vane

Pada gambar 4.1 menjelaskan penelitian eksperimen distribusi *wall pressure coefficient* ( $C_p$ ) pada *rectangular elbow*  $90^\circ$  dengan tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane*. Pada tanpa *rounded* disisi *inner* mempunyai nilai minimum sebesar -0.0863 sedangkan pada sisi *outer* mempunyai nilai maksimum sebesar 0.0077 dengan selisih antara sisi *outer* dan *inner* sebesar 0.0947. Pada variasi *rounded leading edge guide vane* pada sisi *inner* mempunyai nilai minimum sebesar -0.0863 sedangkan pada sisi *outer* mempunyai nilai maksimum sebesar



0.0077 dengan selisih antara sisi *outer* dan *inner* sebesar 0.0947. Secara keseluruhan kedua variasi *guide vane* tidak menunjukkan perbedaan yang berarti yang ditunjukkan pada selisih nilai  $C_p$  pada sisi *inner* dan *outer*.

Semakin besar selisih tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer elbow* maka akan semakin memacu terjadinya *secondary flow*. Hal ini dikarenakan dengan semakin besar selisih tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer* maka aliran akan semakin mudah untuk bergerak dari tekanan yang tinggi menuju tekanan yang rendah. Distribusi nilai  $C_p$  sisi *inner* untuk semua *elbow* cenderung mengalami penurunan yang signifikan yang menandakan bahwa pada daerah tersebut terjadi penurunan tekanan atau *favorable pressure gradient* ( $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$ ) yaitu suatu kondisi daerah dengan gradien tekanan negatif akibat dari radius kelengkungan *elbow* yang kecil sehingga aliran fluida tidak bisa mengikuti kontur saat berbelok. Distribusi nilai  $C_p$  sisi *outer* untuk semua *elbow* cenderung mengalami kenaikan yang signifikan yang menandakan bahwa pada daerah tersebut terjadi kenaikan tekanan atau *adverse pressure gradient* ( $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ ) yaitu suatu kondisi daerah dengan gradien tekanan positif.

Perbedaan nilai  $C_p$  antara *inner* dengan *outer wall* secara tidak langsung menunjukkan potensi terjadinya aliran sekunder didalam *elbow* itu sendiri. Semakin besar perbedaan nilai  $C_p$  antara *inner* dengan *outer* maka semakin besar pula potensi terjadinya *secondary flow* sebaliknya semakin kecil nilai perbedaannya maka akan semakin kecil pula potensi terjadinya *secondary flow* pada *elbow*. Dengan bilangan *Reynolds* yang sama maka  $\Delta C_p$  yang paling rendah terdapat pada *elbow* dengan *rounded leading edge guide vane* dan  $\Delta C_p$  yang paling tinggi terdapat pada *elbow* dengan tanpa *rounded*. Perbedaan nilai  $C_p$  antara *inlet* dan *outlet elbow* sama saja dengan *koeffisient minor losses* ( $K$ ). Hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan matematis yang berhubungan dengan *headloss minor* pada *elbow*.



$$\Delta C_p = C_{p_{outlet}} - C_{p_{inlet}} \dots \dots \dots (4.1)$$

$$\Delta C_p = \frac{p_{outlet} - p_r}{\frac{1}{2} \rho v^2} - \frac{p_{inlet} - p_r}{\frac{1}{2} \rho v^2} \dots \dots \dots (4.2)$$

$$\Delta C_p = \left( \frac{p_{outlet} - p_{inlet}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} \right) \dots \dots \dots (4.3)$$

$$p_{inlet} - p_{outlet} = \Delta C_p \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 \dots \dots \dots (4.4)$$

$$\frac{p_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_1^2}{2} + g z_1 = \frac{p_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{v}_2^2}{2} + g z_2 + h_{lm} \dots \dots \dots (4.5)$$

Asumsi:

- luas penampang sama, maka  $v_1 = v_2$
- ketinggian sama pada posisi horizontal, maka  $z_1 = z_2$

$$\frac{p_{inlet}}{\rho} = \frac{p_{outlet}}{\rho} + h_{lm} \dots \dots \dots (4.6)$$

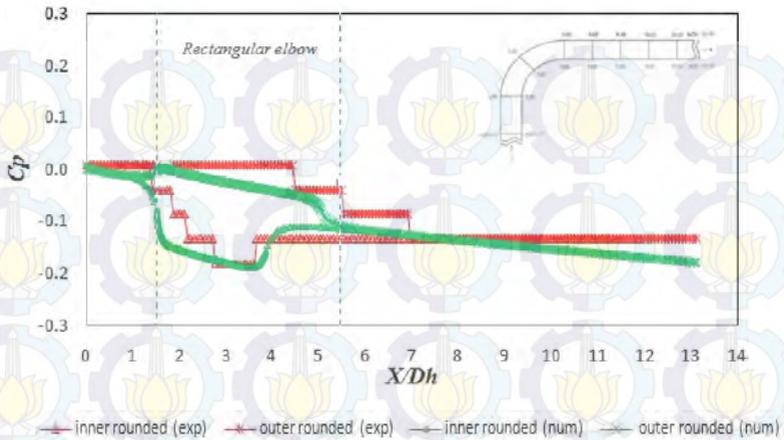
$$\frac{p_{inlet}}{\rho} = \frac{p_{outlet}}{\rho} + K \frac{U_{ref}^2}{2} \dots \dots \dots (4.7)$$

$$\frac{p_{inlet}}{\rho} - \frac{p_{outlet}}{\rho} = K \frac{U_{ref}^2}{2} \dots \dots \dots (4.8)$$

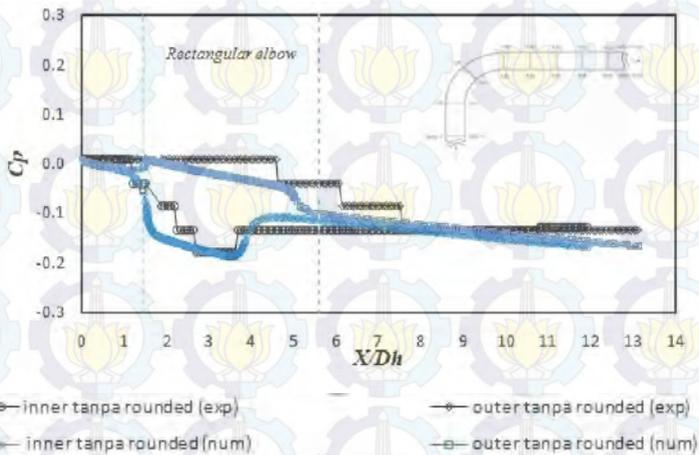
$$p_{inlet} - p_{outlet} = K \rho \frac{U_{ref}^2}{2} \dots \dots \dots (4.9)$$

Berdasarkan persamaan 4.4 dan 4.7 maka dapat direpresentasikan bahwa  $\Delta C_p$  antara *inlet* dan *outlet elbow* secara tidak langsung menunjukkan koefisien minor losses (K) pada *elbow*, dengan semakin kecilnya nilai koefisien minor maka semakin kecil juga nilai *headloss* pada *elbow* tersebut. Besarnya nilai *pressure* pada *rectangular elbow 90°* dengan penambahan tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane* menunjukkan nilai yang sama sebesar. Sehingga secara eksperimen penambahan tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane* tidak memberikan pengaruh yang berarti.

Untuk lebih detail menganalisa pengaruh variasi guide vane terhadap distribusi  $C_p$ , maka disajikan grafik perbandingan distribusi  $C_p$  dengan eksperimen dan numerik pada *elbow* tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane* pada gambar 4.2 dan 4.3.



**Gambar 4.2** Distribusi  $C_p$  inner dan outer wall rectangular elbow  $90^\circ$  dengan rounded leading edge guide vane (eksperimen dan numerik)



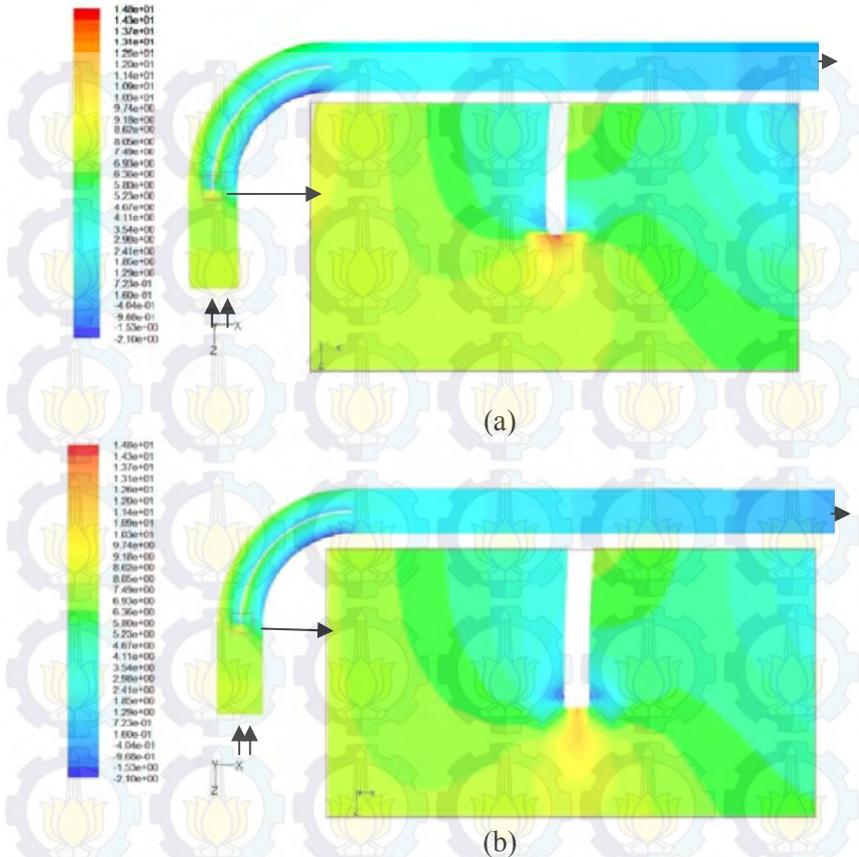
**Gambar 4.3** Distribusi  $C_p$  inner dan outer wall rectangular elbow  $90^\circ$  tanpa rounded leading edge guide vane (eksperimen dan numerik)



Gambar 4.2 dan 4.3 menunjukkan perbandingan  $C_p$  secara eksperimen dan numeric. Pada perbandingan grafik, hasil numerik cenderung menunjukkan data yang lebih kontinyu karena data yang dihasilkan lebih banyak dibanding dengan eksperimen. Namun secara keseluruhan hasil numerik sudah mendekati hasil eksperimen. Pada *rectangular elbow 90°* dengan penambahan tanpa *rounded leading edge guide vane* didapatkan nilai minimum *inner* pada eksperimen sebesar -0.1806 sedangkan numerik didapatkan nilai sebesar -0.19035. Nilai maksimum *outer* pada eksperimen sebesar 0.0077 sedangkan pada numerik didapatkan nilai sebesar 0.007987. Pada penambahan *rounded leading edge guide vane* didapatkan nilai *inner* minimum pada eksperimen sebesar -0.1806 sedangkan pada numerik sebesar -0.18739. Nilai maksimum *outer* pada eksperimen didapatkan sebesar 0.0077 sedangkan pada numerik didapatkan nilai sebesar 0.009845

Selisih nilai  $C_p$  antara *outer* dan *inner* pada tanpa *rounded leading edge guide vane* pada eksperimen sebesar 0.1883 sedangkan pada numerik sebesar 0.1983. Pada penambahan *rounded leading edge guide vane* didapatkan selisih  $C_p$  antar *inner* dan *outer* pada eksperimen sebesar 0.1883 sedangkan pada numerik sebesar 0.1972. Dari perbandingan grafik eksperimen dan numerik penambahan satu *guide vane* cenderung memiliki selisih nilai  $C_p$  cenderung lebih besar yang terlihat pada selisih nilai  $C_p$  *inner* dan *outer* pada numerik tetapi tidak signifikan. Semakin besar selisih  $C_p$  antar *inner* dan *outer* maka cenderung menimbulkan terjadinya aliran sekunder.

Kondisi ini dipertegas dengan hasil simulasi numerik pada gambar 4.4 dengan menyajikan kontur tekanan statis pada *midspan*. Nilai  $C_p$  minimum dimiliki oleh sisi *inner* karena sisi *inner* merupakan area bertekanan rendah dan nilai  $C_p$  maksimum dimiliki oleh sisi *outer* karena sisi *outer* merupakan area bertekanan tinggi.

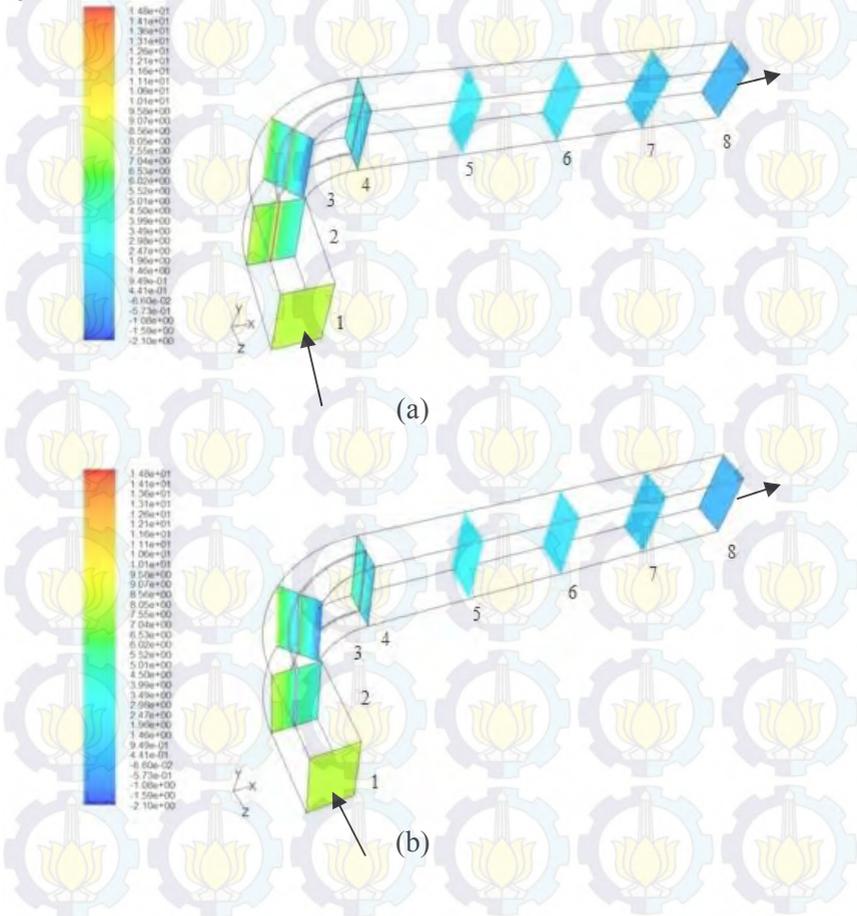


**Gambar 4.4** Kontur tekanan statis di midspan *elbow* dengan bilangan *Reynolds* 21000; a). *rounded leading edge guide vane*; b). tanpa *rounded* (numerik)

Pada gambar 4.4 kontur tekanan statis di daerah *upstream* aliran mempunyai tekanan yang cenderung *uniform*. Saat memasuki *elbow* aliran mulai mendapatkan pengaruh dari kontur saluran yang berbelok 90°. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pada daerah *elbow*, tekanan minimum terjadi pada sisi

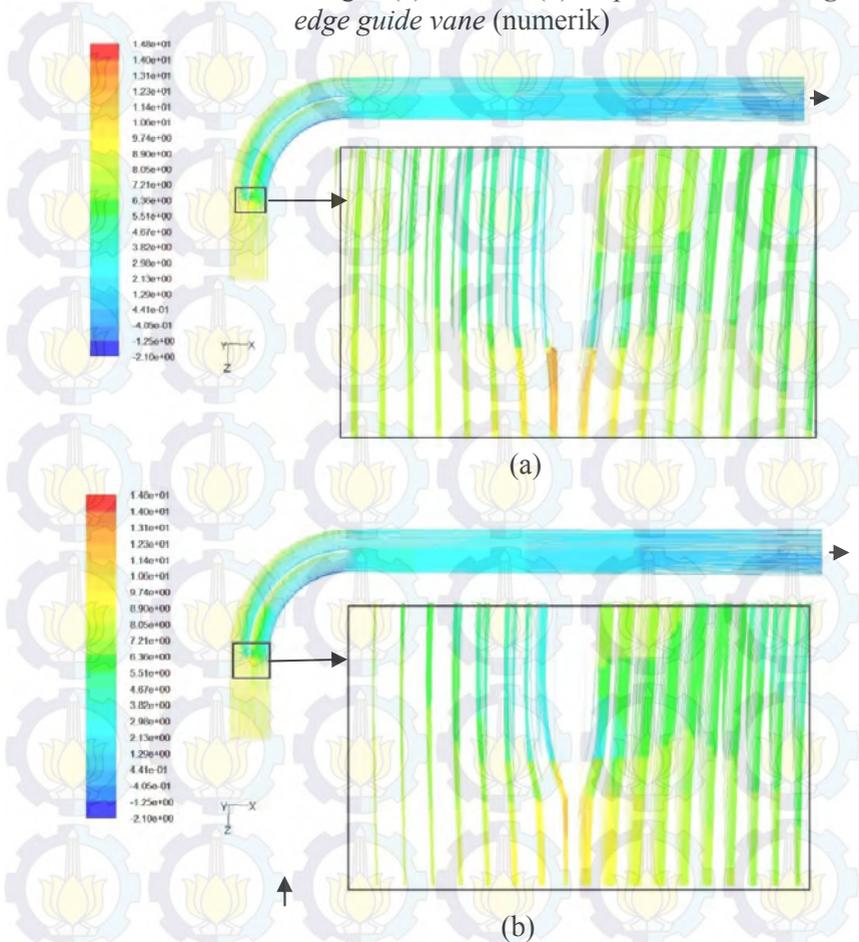


*inner* dan tekan maksimum pada sisi *outer*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.5 bahwa nilai kuantitatif tekanan statis minimum ditunjukkan dengan kontur biru tua berada disisi *inner*, sedangkan untuk tekanan statis maksimum ditunjukkan dengan kontur berwarna hijau pada sisi *outer*. Perbedaan tekanan yang besar antara sisi *outer* dengan sisi *inner* akan menyebabkan *secondary flow*





**Gambar 4.5** Kontur tekanan statis ( $N/m^2$ ) pada delapan *cross section* untuk *elbow* dengan (a) *rounded* (b) tanpa *rounded leading edge guide vane* (numerik)



**Gambar 4.6** *Pathline* di midspan *elbow* (a) *rounded* (b) tanpa *rounded leading edge guide vane*

Dari gambar 4.5 terlihat bahwa pada saat aliran berada di *upstream* mempunyai tekanan statis yang masih *uniform*. Semakin mendekati *elbow* (dapat dilihat pada *section 2*, tekanan



aliran fluida mulai mendapatkan pengaruh dari adanya radius kelengkungan *elbow*. Penurunan tekanan statis mulai terjadi pada sisi *inner* yang ditunjukkan dengan kontur warna biru muda sedangkan sisi *outer* dengan kontur warna kuning tua. Pada *section 2* terjadi perbedaan tekanan yang mencolok yang ditunjukkan oleh kontur warna biru tua pada sisi *inner* sedangkan tekanan tinggi pada sisi *outer* ditunjukkan oleh kontur warna hijau. Ini menandakan terdapat perbedaan tekanan yang besar antara sisi *inner* dan *outer*. Mendekati *section 4* selisih tekanan yang terjadi semakin rendah. Hal ini terlihat dari kontur warna biru tua pada *inner* dan warna biru muda pada sisi *outer*. Pada *section 5-8* perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer* semakin kecil dan *uniform* terlihat pada kontur biru pada sisi *inner* dan *outer*.

Berdasarkan gambar 4.6 penambahan *rounded leading edge guide vane* menyebabkan aliran lebih mampu mengikuti kontur *solid surface* dibandingkan dengan tanpa *rounded*. Ketika aliran tidak mampu menyesuaikan kontur *solid surface* dapat mengakibatkan akumulasi *adverse pressure gradient* sehingga dapat mengikis momentum aliran. Hal ini mengakibatkan lapisan batas yang terjadi lebih berkembang pada dinding *guide vane*. *Boundary layer* terangkat dan *shear layer laminar* yang terseparasi akan berinteraksi dengan *free stream*. Aliran mendapatkan dorongan energi dari *free stream* yang kemudian memaksa *shear layer* untuk *attach* kembali ke *solid body* sehingga akan menyebabkan terjadinya separasi *bubble*.

#### 4.1.2 Distribusi $C_p$ pada kelengkungan *elbow*

Distribusi  $C_p$  searah radial atau tegak lurus *streamline* menjadi pembahasan tersendiri karena berhubungan erat dan saling melengkapi pembahasan distribusi  $C_p$  searah *streamline*. Persamaan *Euler* (persamaan 4.5) menyatakan bahwa apabila suatu aliran fluida melintasi saluran yang mempunyai radius atau kelengkungan, maka tekanan fluida akan sebanding dengan jari-



jari kelengkungan. Semakin besar jari-jari kelengkungan, tekanan yang dimiliki juga semakin besar, begitu juga sebaliknya.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{v^2}{r}, \quad (4.10)$$

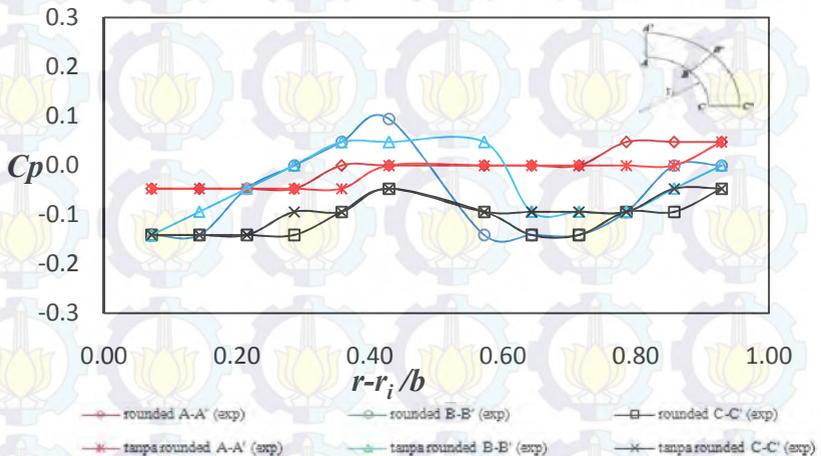
$\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\frac{\partial p}{\partial r}$  : gradien tekanan searah radial/searah jari-jari ( $\text{N/m}^3$ )

$v$  : kecepatan fluida ( $\text{m/s}$ )

$r$  : jari-jari kelengkungan ( $\text{m}$ ).

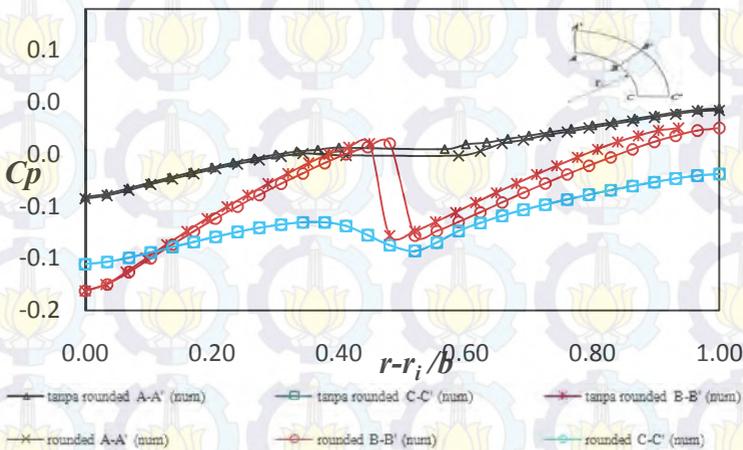
Gambar 4.7 menyatakan grafik distribusi  $C_p$  searah radial sebagai fungsi posisi  $r-r_i/b$ , dimana  $r$  menunjukkan posisi pengukuran searah radial dan  $b$  merupakan lebar penampang saluran sebesar 50 mm. Pengukuran dimulai dari sisi *inner* ( $A$ ) sampai *outer* ( $A'$ ) untuk tiga posisi yaitu *inlet elbow* sebagai potongan 1 ( $A-A'$ ),  $45^\circ$  *elbow* sebagai potongan 2 ( $B-B'$ ), dan *outlet elbow* sebagai potongan 3 ( $C-C'$ ).



**Gambar 4.7** Distribusi  $C_p$  tegak lurus *streamline* untuk tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane* (eksperimen)



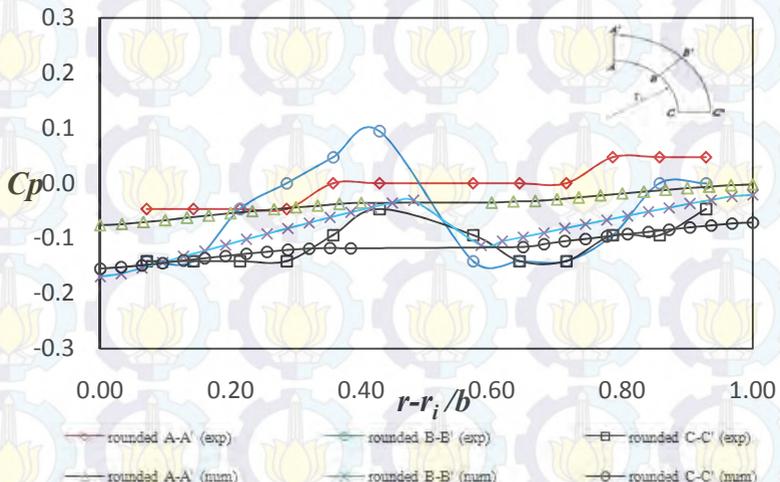
Pada gambar 4.7 terlihat bahwa tekanan di potongan 1 ( $A-A'$ ) untuk *elbow* dengan penambahan *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane* bisa dikatakan cenderung *uniform* dari *inner* menuju ke *outer*. Sedangkan pada potongan 2 ( $B-B'$ ) untuk *elbow* mempunyai nilai selisih  $C_p$  yang lebih besar akan tetapi dengan penambahan antara *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane* tidak menunjukkan perbedaan yang berarti dengan nilai sama sebesar 0.1413. Hal ini dikarenakan ketika aliran berada pada daerah *elbow*, aliran akan mengalami peningkatan tekanan sesuai dengan besarnya radius kelengkungannya. Pada *elbow* dengan penambahan tanpa *rounded leading edge guide vane*, ketika terjadi kontak antara aliran dengan *leading guide vane* separasi yang timbulkan cenderung lebih besar sehingga perbedaan  $C_p$  antara *inner* dan *outer* cenderung lebih besar. Pada potongan 3 ( $C-C'$ ) yang berada pada daerah *downstream*, distribusi tekanan statis tidak begitu besar baik pada *elbow* satu *guide vanes* sebesar 0.0942 maupun *rounded leading edge guide vane* sebesar 0.0942 namun tidak sebesar pada potongan 2.



**Gambar 4.8** Distribusi  $C_p$  tegak lurus *streamline* untuk tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane* (numerik)



Grafik numerik yang ditunjukkan pada gambar 4.8 memberikan informasi bahwa dalam keadaan ideal antara penambahan *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane* cenderung menunjukkan pola yang sama. Pada potongan A-A' pada tanpa *rounded leading edge guide vane* didapatkan selisih  $C_p$  sebesar 0.0738 sedangkan pada *rounded leading edge guide vane* didapatkan selisih  $C_p$  yang lebih kecil sebesar 0.0729. Pada potongan B-B' didapatkan selisih  $C_p$  pada tanpa *rounded leading edge guide vane* sebesar 0.1485 sedangkan pada *rounded leading edge guide vane* didapatkan selisih  $C_p$  yang lebih kecil sebesar 0.1465. Pada potongan C-C' didapatkan selisih  $C_p$  pada penambahan satu *guide vane* sebesar 0.0837 sedangkan pada penambahan *rounded leading edge guide vane* sebesar 0.082301. Dari perbandingan numerik pada tanpa *rounded leading edge guide vane* memiliki selisih nilai  $C_p$  yang lebih besar. Semakin besar selisih  $C_p$  antar *inner* dan *outer* maka cenderung menimbulkan terjadinya aliran sekunder.



Gambar 4.9 Distribusi  $C_p$  tegak lurus *streamline* untuk *rounded leading edge guide vane* (eksperimen dan numerik)



Grafik pada gambar 4.9 menunjukkan distribusi  $C_p$  ke arah radial di dalam *elbow* dengan penambahan *rounded leading edge guide vane* secara numerik didapatkan distribusi  $C_p$  dari ketiga potongan baik potongan1 ( $A-A'$ ), potongan 2 ( $B-B'$ ) dan potongan 3 ( $C-C'$ ) mengalami kenaikan dari sisi *inner* menuju *outer*. Selisih  $C_p$  yang paling besar adalah pada potongan 2 ( $B-B'$ ) pada numerik sebesar 0.1466. Hal ini sesuai dengan persamaan *Euler* yang menyatakan dengan semakin besarnya radius kelengkungan maka tekanan yang terjadi semakin besar. Hasil eksperimen menunjukkan distribusi  $C_p$  yang meningkat baik pada potongan1 dengan selisih nilai  $C_p$  pada inner dengan outer sebesar 0.0942, potongan 2 sebesar 0.1413 dan potongan3 sebesar 0.0942. Selisih nilai  $C_p$  yang paling besar terdapat pada potongan 2 ( $B-B'$ ).

Adanya perbedaan nilai  $C_p$  antara hasil numerik dengan hasil eksperimen disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya perbedaan titik pengambilan data dimana pada metode numerik lebih banyak sehingga hasil numerik lebih detail dibanding dengan hasil eksperimen. Selain itu alat ukur yang digunakan pada eksperimen kurang memiliki akurasi yang bagus. Namun hasil numerik juga memiliki ketidakmampuan dalam memprediksi aliran yang mengandung *adverse pressure gradient* dan aliran sekunder. Hasil dari numerik ini telah sesuai dengan hasil yang didapatkan secara eksperimen.



**Tabel 4.1** Data eksperimen perbandingan *elbow* satu *guide vane* dengan *rounded leading edge guide vane*

Peneliti	Bilangan Reynolds	Variasi <i>guide vane</i>	$\Delta C_p$ (inlet-outlet)	$\Delta C_p$ (inner-outer)	efek penambahan <i>guide vane</i>	
					(inlet-outlet)	(inner-outer)
Sutrisno, 2009	2.1x10 <sup>4</sup>	0	0.2731	0.892	-	-
		3	0.1808	0.1809	-33.00%	79.00%
Adityas, 2014	2.1x10 <sup>4</sup>	1	0.1412	0.1883	-48.29%	78.89%
		rounded	0.1412	0.1883	-48.29%	78.89%

**Tabel 4.2** Data eksperimen perbandingan *elbow* tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide vane*

Komponen Pembeda	Bilangan Reynolds	tanpa rounded	rounded	efek
$\Delta C_p$ (inlet-outlet)	2.1x10 <sup>4</sup>	numerik		0.0564%
		0.1771	0.1770	
$\Delta C_p$ (inner-outer)		0.1983	0.1972	0.5547%

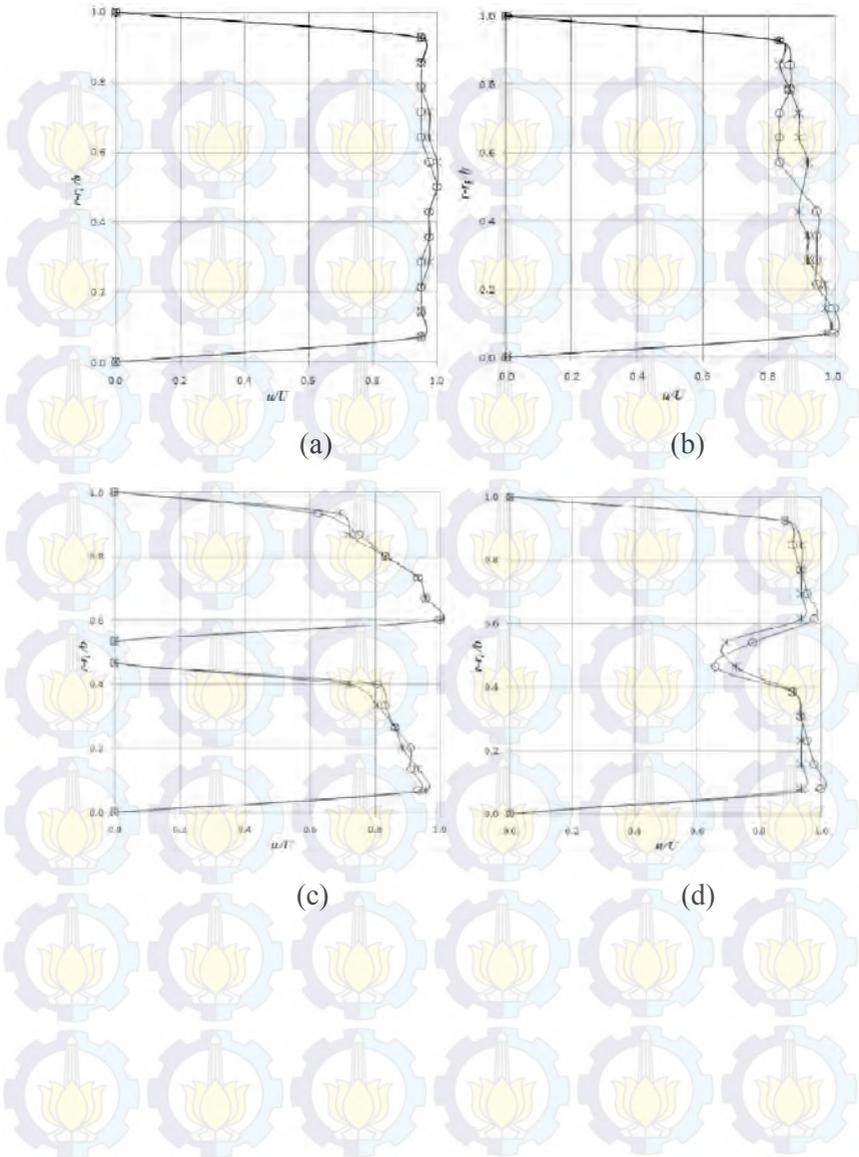
#### 4.2 Distribusi Profil Kecepatan

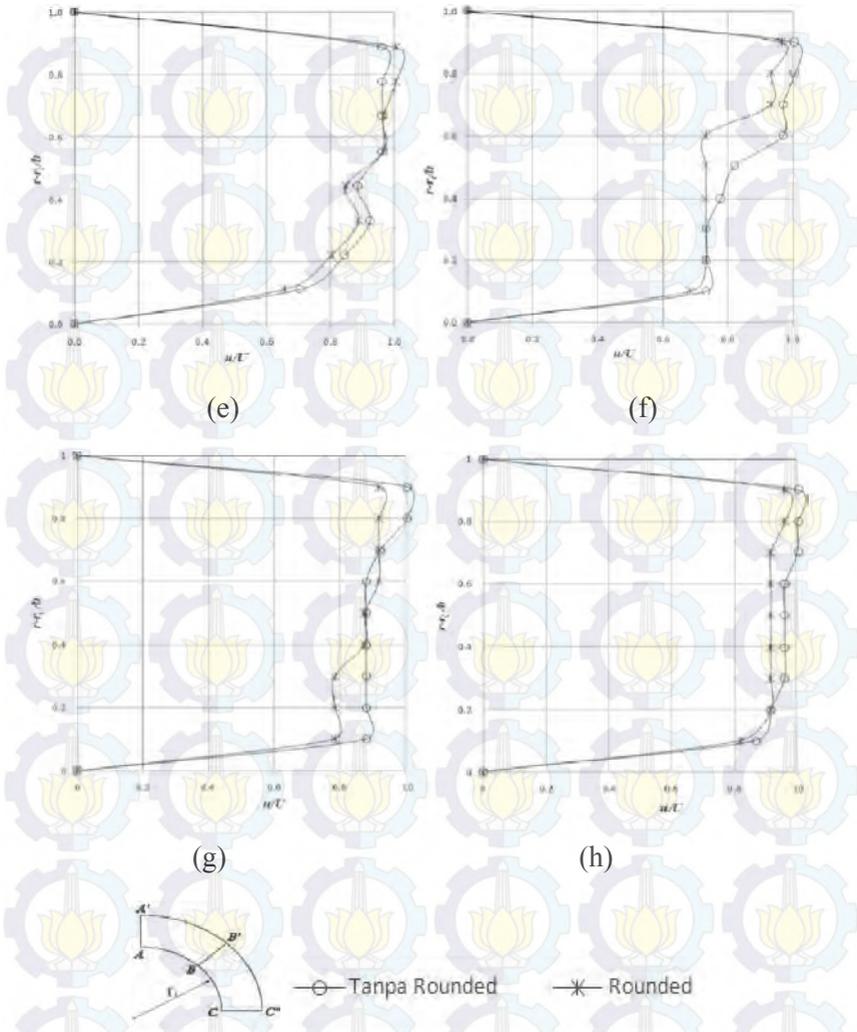
Distribusi tekanan aliran yang melintasi setiap posisi di dalam *rectangular elbow 90°* akan mempengaruhi profil kecepatan yang terjadi pada posisi tersebut. Gambar 4.10 memperlihatkan kondisi profil kecepatan searah radial *elbow* untuk *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane*. Distribusi kecepatan disajikan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U$ ) fungsi posisi horizontal tak berdimensi ( $(r-r')/b$ ),



dimana  $u$  adalah kecepatan lokal dan  $U$  merupakan kecepatan maksimum pada *section* yang sama. Selanjutnya  $r$  merupakan radius kelengkungan outer sedangkan  $r'$  merupakan radius kelengkungan inner dimana  $r-r'/b = 0$  adalah sisi *inner* dan  $r-r'/b = 1$  adalah sisi *outer*,  $b$  didefinisikan sebagai lebar penampang *elbow*. Berikut ini akan dibahas perkembangan *velocity profile* setiap *section*. Posisi pengukuran setiap *section* dijelaskan sebagai berikut:

- *Section 1* : *inlet straight duct*, posisi  $x/D_h = 0$ ,  $x/D_h = 0$ , atau 100 mm dari *inlet elbow*.
- *Section 2* : *inlet elbow*, posisi  $x/D_h = 1.5$ ,  $x/D_h = 1.5$ .
- *Section 3* : *45° elbow*, posisi  $x/D_h = 2.67$ ,  $x/D_h = 3.26$ .
- *Section 4* : *outlet elbow 1*, posisi  $x/D_h = 3.85$ ,  $x/D_h = 5.02$ .
- *Section 5* : *outlet straight duct*, posisi  $x/D_h = 5.87$ ,  $x/D_h = 7.05$  atau 135 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 6* : *outlet straight duct*, pada posisi  $x/D_h = 7.90$ ,  $x/D_h = 9.07$  atau 270 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 7* : *outlet straight duct*, pada posisi  $x/D_h = 9.92$ ,  $x/D_h = 11.1$  atau 405 mm dari *outlet elbow*.
- *Section 8* : *outlet straight duct*, pada posisi  $x/D_h = 11.94$ ,  $x/D_h = 13.12$  atau 540 mm dari *outlet elbow*.





**Gambar 4.10** Distribusi profil kecepatan masing-masing section *rectangular elbow 90°* untuk *elbow* dengan tanpa rounded dan



*rounded guide vane section* 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6; g) 7; h) 8 (eksperimen)

Pada gambar 4.10 secara umum profil kecepatan di sepanjang sisi *upstream* sampai *downstream* dijelaskan sebagai berikut: saat masuk *test section*, profil kecepatan masih dalam kondisi *uniform*, tepat masuk daerah *elbow*, profil kecepatan cenderung mengalami defleksi ke sisi *inner*, ditunjukkan dengan adanya ketidaksimetrisan pada profil kecepatannya, hal ini mengindikasikan bahwa pada posisi ini sudah tampak adanya pengaruh dari keberadaan *elbow* terhadap karakteristik aliran. Pada posisi  $45^\circ$  *elbow* profil kecepatan secara jelas mengalami defleksi, dimana kecepatan maksimum mulai bergeser menuju sisi *inner*. Tepat keluar *elbow*, profil kecepatan di sisi *inner* dan *outer* secara signifikan menunjukkan perbedaan harga, meskipun kecepatan maksimum mulai bergeser menuju ke tengah. Semakin menjahui *elbow*, kecepatan maksimum kembali terdefleksi menuju sisi *outer*. Selanjutnya profil kecepatan mengalami proses *recovery* (*recovery process*) untuk mencapai kondisi normal, sebagaimana profil kecepatan pada *straight duct*. Proses *recovery* dilakukan untuk mencapai kestabilan profil pada sisi *inner* dan *outer*. Secara berangsur-angsur profil kecepatan di sisi *inner* mengalami *developing* dengan mendesak profil kecepatan pada sisi *outer*. Untuk lebih jelasnya akan dilakukan pembahasan profil kecepatan pada masing-masing *section* diuraikan pada paragraf berikut.

### Section 1 dan 2

Profil kecepatan pada *section* 1 untuk *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane* menunjukkan profil yang masih *uniform*. Pada kondisi profil kecepatan *uniform*, pengaruh dari *wall shear stress* sebagai akibat adanya gesekan antara fluida dengan *solid surface* masih sangat kecil. Akibatnya momentum aliran di dekat dinding masih cukup besar sehingga aliran fluida lebih mampu menghadapi hambatan berupa akumulasi gesekan dan gradien tekanan balik. Pada *section* 2 profil kecepatan mulai menunjukkan adanya pengaruh dari radius kelengkungan *elbow*.



Pada *section 2* terlihat kecepatan aliran maksimum berada di sisi *inner* baik untuk *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane*. Pada saat aliran berada pada sisi *inner* mendekati *inlet elbow* maka aliran akan memasuki daerah *favorable pressure gradient* yaitu daerah bertekanan rendah. Berbeda dengan kondisi aliran pada sisi *outer* yang merupakan daerah *adverse pressure gradient* yaitu daerah bertekanan tinggi.

### *Section 3*

Pada *section 3* semakin jelas terlihat bahwa kecepatan maksimum aliran berada pada sisi *inner* terutama pada tanpa *rounded guide vane* dibanding dengan *rounded leading edge guide vane*, hal ini dikarenakan aliran pada *elbow* dengan tanpa *rounded leading edge guide vane* masih berada pada daerah *favorable pressure gradient*. Aliran pada daerah ini akan mengalami penurunan tekanan sepanjang aliran dan aliran fluida akan mengalami percepatan yang ditunjukkan kecepatan maksimum berada pada sisi *inner*. Kecepatan maksimumnya berada disekitar *centerline* nya karena pada sisi *inner* terdapat tekanan minimum dan kecepatan rata-rata paling besar terdapat pada ruang 1.

### *Section 4*

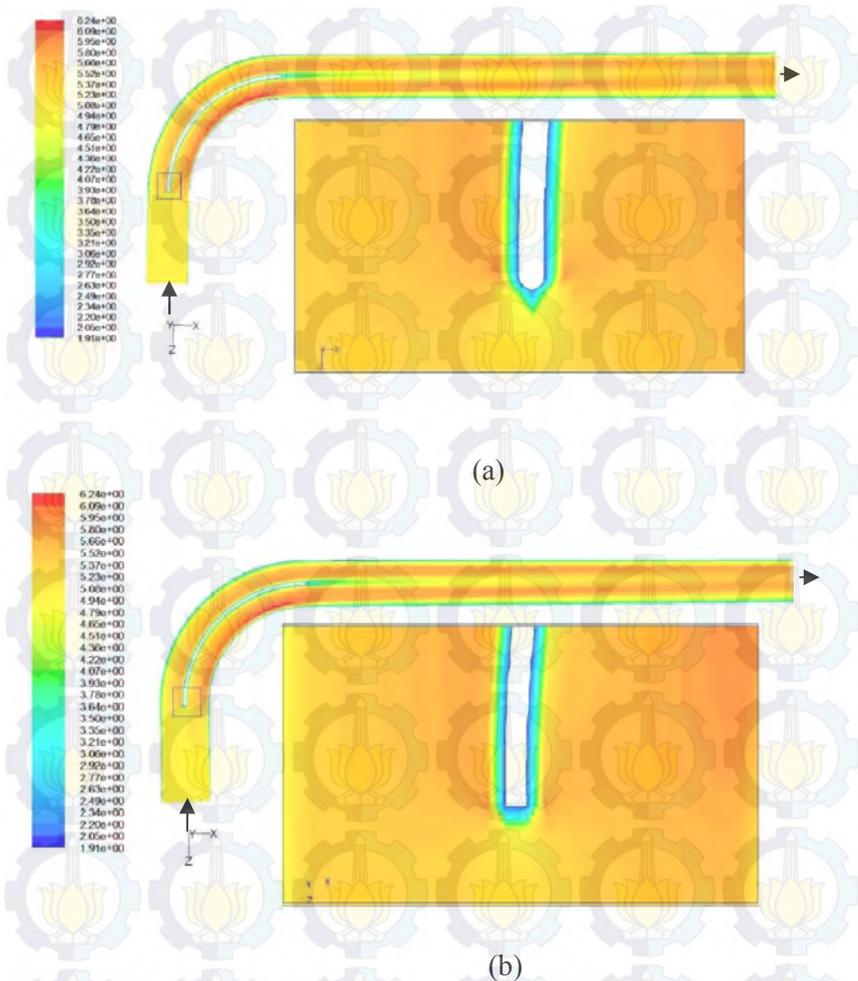
Pada *section 4* terlihat kecepatan pada sisi *inner* mulai menurun. Pada *elbow* tanpa *rounded leading edge guide vane* kecepatan maksimal masih pada daerah *inner* namun sudah agak bergeser ke *centerline* nya. Disini terdapat sedikit pergeseran kecepatan yang ditunjukkan dengan berkurangnya kecepatan pada dinding *inner* dan bertambahnya kecepatan pada dinding *outer*. Dari hasil eksperimen dapat dilihat bahwa perubahan kecepatan tidak secara tiba-tiba namun secara bertahap. Sedangkan pada *elbow* dengan *rounded leading edge guide vane* menunjukkan perubahan yang hampir sama tetapi dengan kecepatan yang sedikit lebih kecil dan daerah ini berkecepatan rendah atau dikenal dengan *wake*. Pada sisi *outlet elbow* secara jelas posisi kecepatan maksimumnya mulai bergeser ke sisi *outer*.

### *Section 5-8*



Pada *section 5*, profil kecepatan *elbow* tanpa *rounded leading edge guide vane* menunjukkan transisi bergesernya kecepatan maksimum dari sisi *inner* ke sisi *outer* karena pada sisi *outer* berada pada daerah *favorable pressure gradient* dan pada daerah *inner* berada pada *adverse pressure gradient*. Ini menunjukkan bahwa keberadaan *elbow* masih membawa pengaruh terhadap karakteristik aliran di sepanjang *straight duct* pada *downstream* profil kecepatan mengalami proses *recovery* untuk menyeimbangkan aliran setelah melewati *wake*. Proses ini ditandai dengan bergesernya kecepatan minimum yang semula di *centerline* menuju ke *inner*. Proses *recovery* masih berlanjut dari *section 6* sampai *section 8*. Ini disebabkan oleh aliran masih terpengaruh dengan adanya defleksi kecepatan maksimum pada sisi *outer*. Sedangkan untuk pada penambahan *rounded leading edge guide vane* sama-sama belum uniform pada *section* ke delapan dan membutuhkan jarak yang lebih panjang lagi supaya kecepatannya *uniform*.

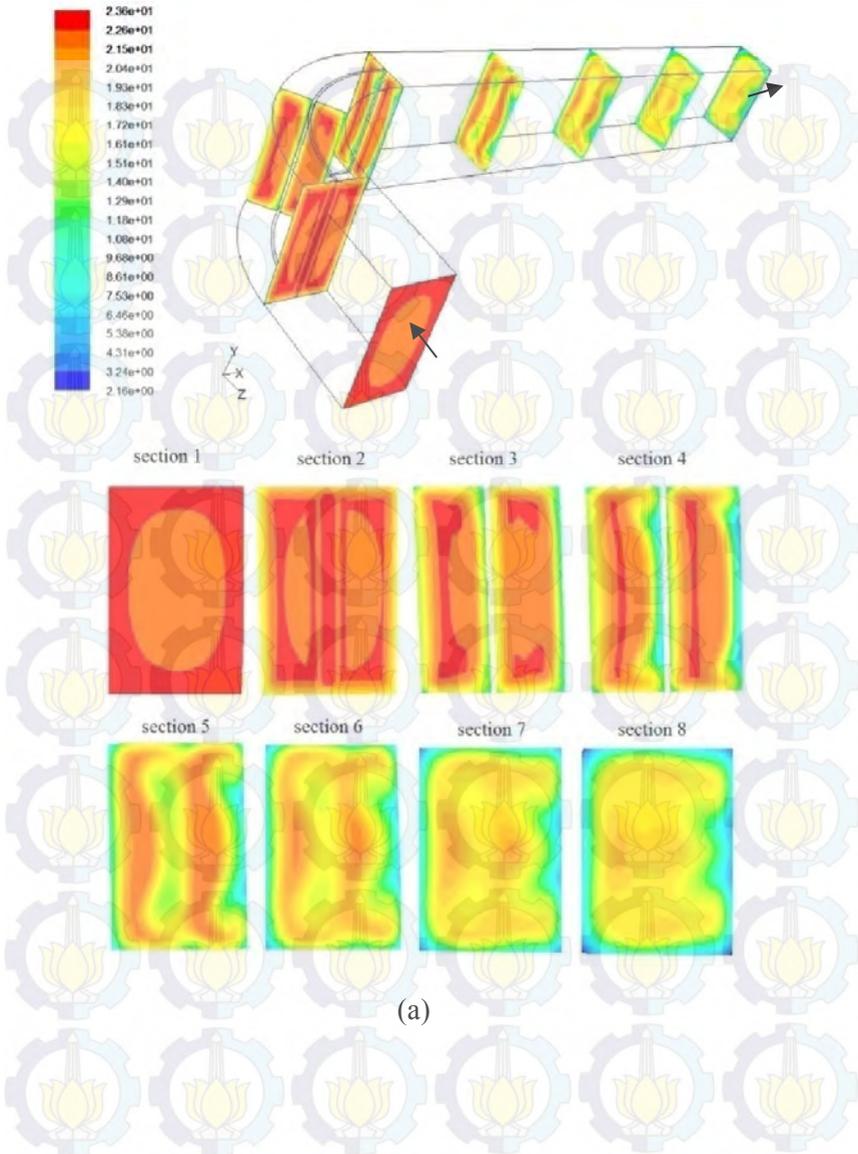
Profil kecepatan *midspan* pada setiap *section*. Pada *upstream* kecepatan cenderung *uniform* hal ini dikarenakan fluida masih memiliki momentum yang cukup besar untuk melawan gaya gesek yang terjadi pada dinding *elbow*. Secara visualisasi dapat dilihat bahwa area kontur warna antara sisi *inner* dan sisi *outer* adalah sama. Pada *section 2* kecepatan maksimum terjadi di sisi *inner* ditunjukkan dengan warna kuning tua sedangkan pada daerah *outer* kecepatan rendah ditunjukkan dengan kuning muda. Pada *section 3* kecepatan maksimum terjadi di sisi *inner* ditunjukkan dengan warna merah sedangkan pada daerah *outer* kecepatan rendah ditunjukkan dengan warna hijau dengan perbedaan nilai kecepatan yang lebih tinggi. Pada *section 4* sampai *section 8* terjadi pergeseran kecepatan maksimum dari sisi *inner* menuju sisi *outer*. Profil kecepatan yang dihasilkan di sepanjang *straight duct downstream* belum *uniform*. Hal tersebut dikarenakan aliran di dalam *elbow* masih dipengaruhi adanya *secondary flow*. Profil kecepatan akan *uniform* dengan semakin panjangnya *downstream*.



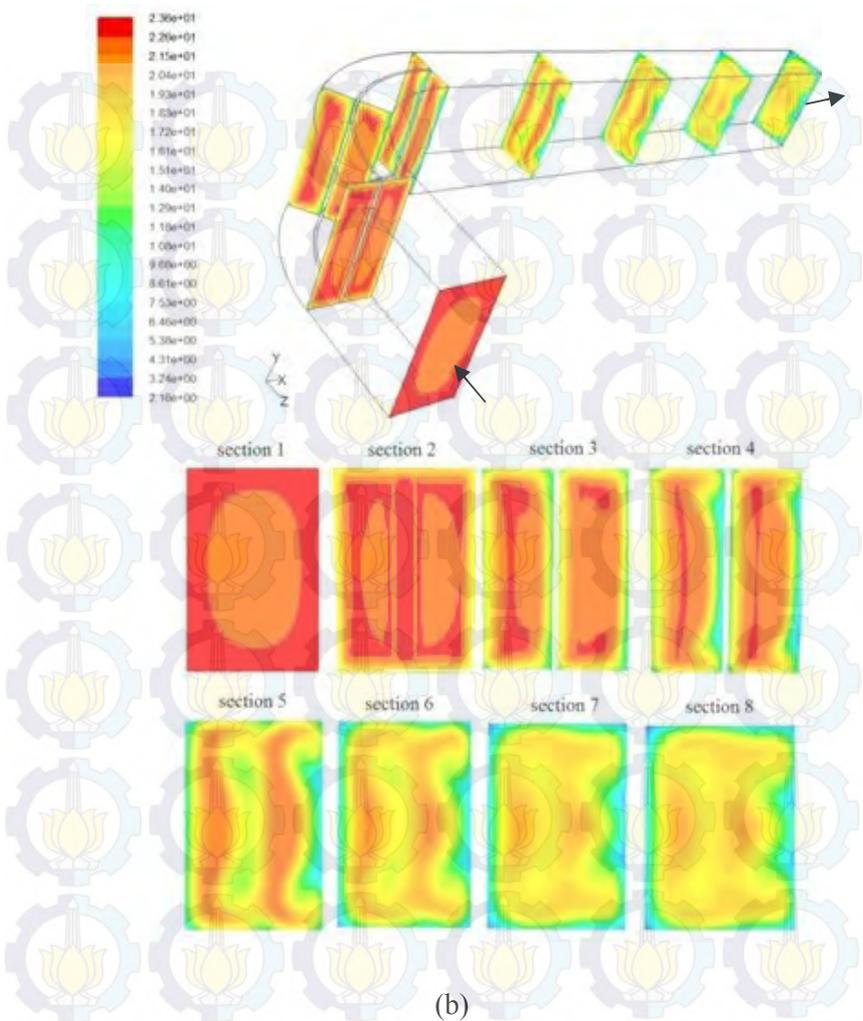
**Gambar 4.11** Kontur kecepatan (m/s) di *midspan elbow 90°* untuk (a) *rounded* (b) *tanpa rounded leading edge guide vane* (numerik)



Dari gambar 4.11 dibandingkan antara *elbow rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane*, aliran sekunder sama-sama diprediksi terbentuk dari *section 3* karena hal ini ditunjukkan ketidakseimbangan aliran energi antara sisi *inner* dan *outer*. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat selisih tekanan yang besar antara *inner* dengan *outer* yang akan mengakibatkan selisih nilai  $C_p$  yang besar pula. Dengan  $\Delta C_p$  yang besar maka secara tidak langsung akan menunjukkan nilai *koefisien minor losses* ( $K$ ) sesuai dengan perumusan 4.1 sampai 4.6. Aliran sekunder untuk *rounded leading edge vane* pada *section 5* lebih kecil dibanding pada tanpa *guide vane*. Dari *section 5* sampai 8 aliran sekunder menjadi semakin lemah karena area bertekanan rendah menjadi semakin sempit sehingga perbedaan energinya cukup kecil. Namun terdapat tidak terdapat perbedaan yang jelas antara *rounded* dan tanpa *rounded leading edge guide vane*.



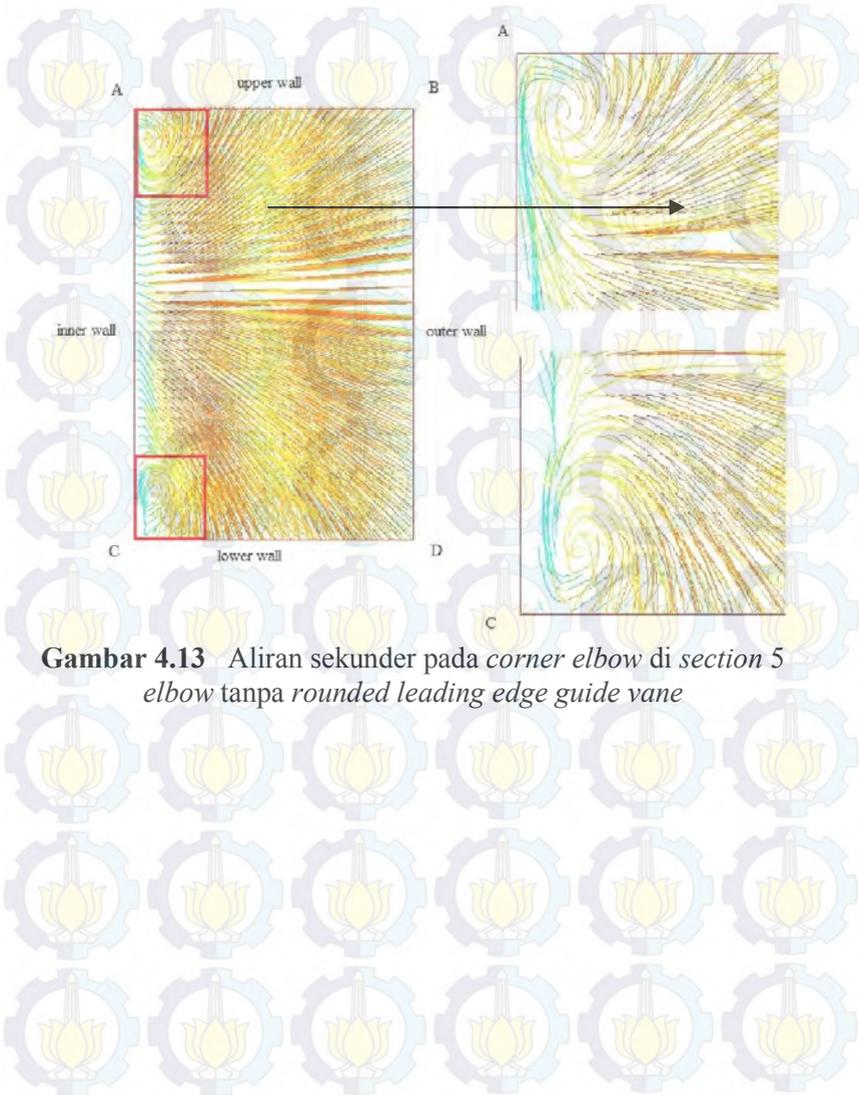
(a)



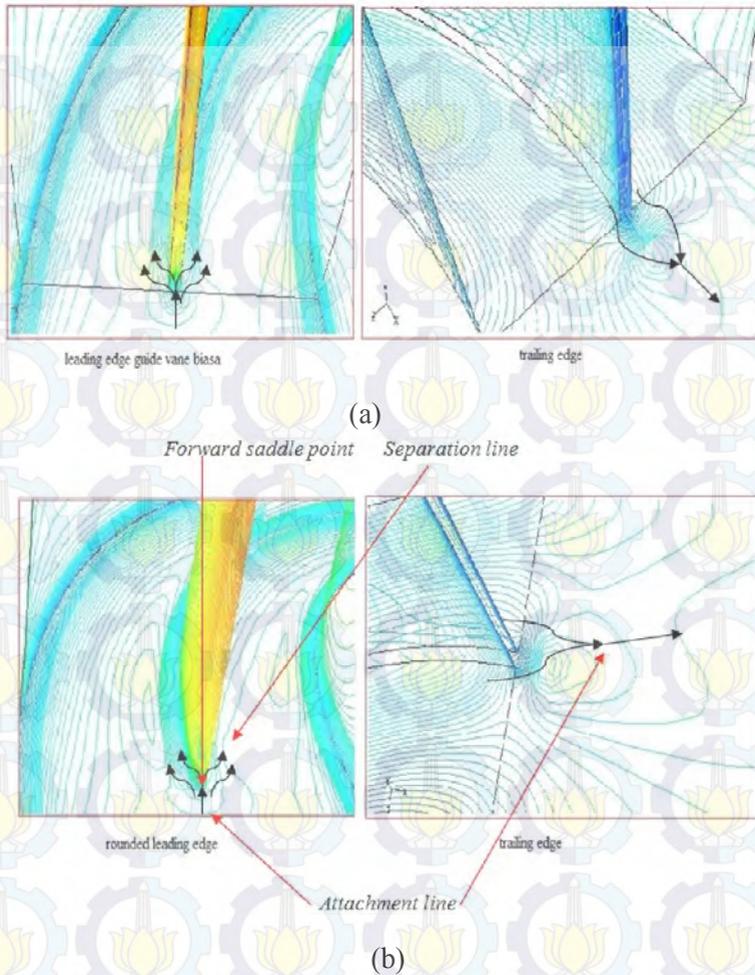
**Gambar 4.12** Total pressure di 8 cross section elbow untuk (a) rounded (b) tanpa rounded leading edge guide vane (numerik)



4.3 Aliran sekunder



**Gambar 4.13** Aliran sekunder pada *corner elbow* di *section 5 elbow* tanpa *rounded leading edge guide vane*



**Gambar 4.14** Aliran sekunder di *section 3* pada *elbow* (a) tanpa *rounded* (b) *rounded leading edge guide vane*

Gambar 4.13 dan 4.14 menunjukkan adanya aliran sekunder pada sisi *corner*, *leading edge* dan *trailing edge* pada *elbow* dengan tanpa *rounded* dan *rounded leading edge guide*



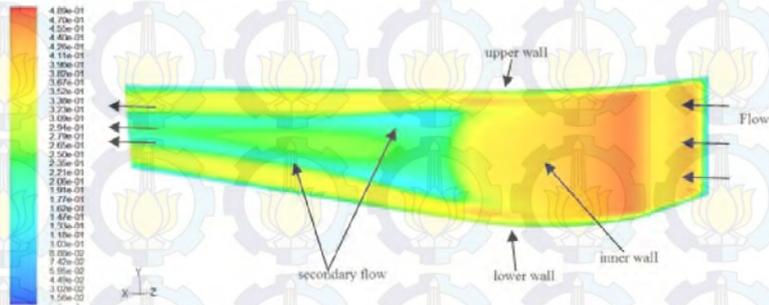
*vane*. Selain memberikan peran positif yaitu memecah keberadaan aliran sekunder sebagai akibat dari perbedaan distribusi energi di sisi *inner* dan *outer*, *guide vane* juga memberikan efek negatif yaitu memperbanyak aliran sekunder di sisi *corner*. Titik separasi pada fenomena tersebut dikenal dengan istilah *saddle point*, seperti terlihat pada gambar 4.14 sebagian energi akan hilang digunakan oleh elemen fluida untuk melakukan gerak *rolling*. Gerakan *rolling* ini ditempuh lebih panjang sehingga aliran akan mengalami gesekan lebih besar. Berdasarkan hal tersebut keterkaitan antara aliran sekunder sebagai penyebab terjadinya *pressure drop*, dimana aliran sekunder dipresentasikan dari kerugian tekanan statis aliran.

Distribusi aliran sekunder pada gambar 4.13 menunjukkan adanya *vortex flow*. Pada section 5 (*outlet elbow*) terdapat pada sisi *upper* pada daerah *inner*. Pusat *vortex* yang pertama terletak didekat pertemuan antara dinding radius dalam dengan dinding *upper* dengan arah berlawanan dengan arah jarum jam. Inilah karakter terpenting pada setiap aliran sekunder. Daerah midspan merupakan daerah yang jauh dari pusat *vortex* sehingga menunjukkan bahwa pada daerah midspan tidak begitu terpengaruh oleh lapisan batas dinding dengan lapisan batas radius luar dan lapisan batas dinding radius dalam. Pada daerah sudut pertemuan antara *upper* dan dinding radius dalam, dapat dilihat adanya aliran sekunder yang begitu kuat yang ditandai dengan adanya vektor kecepatan yang secara tiba-tiba berputar menuju dinding radius dalam dan kemudian ke midspan.

Terbentuknya aliran sekunder ini ditimbulkan oleh gerak kombinasi elemen fluida yang berada didalam *boundary layer*. Elemen fluida didalam *boundary layer* selain melakukan gerak translasi juga melakukan gerak rotasi. Gerakan rotasi disebabkan karena adanya efek viskositas dan gradient kecepatan. Tepat di dinding kecepatan elemen fluida adalah nol, semakin menjauhi dinding nilai kecepatannya semakin besar. Kondisi ini memungkinkan seolah-olah aliran berotasi di dalam



pengembangan dua *boundary layer* pada arah yang berbeda akan menghasilkan *vortex* yang terpilin. Dengan adanya *vortex* terpilin dari aliran sekunder maka akan mengakibatkan *pressure drop* aliran. *Vortex* terpilin ini dapat mengurangi *effective flow area* dan menyebabkan terjadinya *blockage effect*.



Gambar 4.15 *Pathline* di sisi dinding (simulasi numerik)

Pada gambar 4.15 terdapat *pathline* menyimpang dari dinding inner. Elemen fluida tidak dapat bergerak langsung menuju kesisi tengah karena dibagian tengah terdapat *mainstream flow* yang tidak dapat ditembus aliran. Adanya ketidaksimetrisan distribusi tekanan di sisi upper akan menyusuri dinding *upper* dan begitu pula pada sisi *lower*. Setelah sampai pada sisi inner, elemen fluida yang semula telah berada di sisi inner akan bergeser menuju *centerline* karena posisinya segera ditempa oleh elemen fluida yang berasal dari sisi *outer*. Elemen fluida yang berada di *centerline* akan bergeser menuju sisi *outer* untuk mengisi kekosongan tempat disisi *outer* karena sebagian telah menuju *inner*. Setelah berada di sisi *inner*, elemen fluida segera bergabung bersama *mainstream*.





## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Pembahasan studi eksperimen dan numerik pengaruh penambahan *rounded leading edge guide* terhadap *pressure drop* aliran di dalam *horizontal rectangular elbow 90°* telah menghasilkan data-data kuantitatif dan kualitatif. Untuk memperkuat hasil eksperimen, pada penelitian ini dilakukan studi numerik yang kemudian dibandingkan dengan data hasil eksperimen. Data-data kuantitatif didapatkan melalui eksperimen sedangkan data-data kualitatif didapatkan melalui visualisasi numerik. *Test section* yang digunakan pada penelitian ini adalah *horizontal rectangular elbow 90°* menggunakan tanpa *rounded* maupun dengan penambahan *rounded leading edge guide vane*.

Penelitian ini menggunakan bilangan *Reynolds*,  $Re_{Dh} = 2.1 \times 10^4$ . *Stagnation pressure tube* dan *wall pressure tap* dihubungkan dengan *inclined* manometer  $10^\circ$  digunakan sebagai alat ukur dalam pengambilan data eksperimen yang menghasilkan tekanan statis dan tekanan dinamsi. Data kuantitatif yang didapatkan berupa distribusi  $C_p$  pada midspan dinding inner dan outer searah streamline, distribusi  $C_p$  searah *radial* pada *upper elbow* untuk posisi  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$  serta profile kecepatan pada 8 *section* yang telah ditentukan. Data tersebut kemudian diolah menjadi bilangan tidak berdimensi yaitu  $C_p$  dan  $u/U$ .

Visualisasi numerik yang menggunakan *software Gambit 2.4.6* dan *Fluent 6.3.26*, menghasilkan kontur-kontur tekanan statik dan kecepatan pada daerah-daerah yang sama dengan eksperimen selain itu visualisasi numerik juga menghasilkan gambaran aliran sekunder. Berdasarkan analisa kuantitatif dan kualitatif dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh penambahan *rounded leading edge guide vane* tidak memberikan pengaruh terhadap *pressure drop* jika dibandingkan dengan *elbow* dengan satu *guide vane*. Hal



ini dapat diketahui dari dari perbandingan nilai  $\Delta C_p$  (*inlet-outlet*) dan  $\Delta C_p$  (*inner-outer*)

Tabel 5.1 Data eksperimen perbandingan *elbow* tanpa, satu, tiga *guide vane* dan rounded *leading edge guide vane*

Peneliti	Bilangan Reynolds	Variasi <i>guide vane</i>	$\Delta C_p$ ( <i>inlet-outlet</i> )	$\Delta C_p$ ( <i>inner-outer</i> )	efek penambahan <i>guide vane</i>	
					( <i>inlet-outlet</i> )	( <i>inner-outer</i> )
<b>Sutrisno, 2009</b>	2.1x10 <sup>4</sup>	0	0.2731	0.892	-	-
		3	0.1808	0.1809	-33.00%	-79.00%
<b>Adityas, 2014</b>	2.1x10 <sup>4</sup>	1	0.1412	0.1883	-48.29%	-78.89%
		rounded	0.1412	0.1883	-48.29%	-78.89%

Tabel 5.2 Hasil perbandingan numerik *elbow* tanpa rounded dan rounded *leading edge guide vane*

Komponen Pembeda	Bilangan Reynolds	tanpa rounded	rounded	efek
$\Delta C_p$ ( <i>inlet-outlet</i> )	2.1x10 <sup>4</sup>	numerik		0.0564%
		0.1771	0.1770	
$\Delta C_p$ ( <i>inner-outer</i> )		0.1983	0.1972	0.5547%

2. Pada studi eksperimen dan numerik didapatkan profile kecepatan maksimum *elbow* berada pada sisi *inner* yang kemudian bergeser menuju *outer* siring dengan semakin besarnya  $x/D_h$  baik rounded dan tanpa rounded *leading edge guide vane*
3.  $\Delta C_p$  antara *inlet* dan *outlet elbow* secara tidak langsung menunjukkan koefisien minor losses (K) pada *elbow*, dengan semakin kecilnya nilai koefisien minor maka semakin kecil juga nilai headloss pada *elbow* tersebut.
4. Pada *elbow* dengan penambahan rounded *leading edge guide vane* dan tanpa rounded distribusi wall pressure coefficient ( $C_p$ ) searah radial di posisi  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$  dan  $90^\circ$



*elbow* mempunyai tren naik seiring dengan jari-jari kelengkungan. Hal ini sesuai dengan hasil eksperimen dan numerik yang didapatkan

5. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa aliran sekunder didalam *rectangular elbow 90°* diidentifikasi pada sisi *cross section elbow* yang diakibatkan perbedaan energi pada sisi *inner* dan *outer elbow*.

6. Perbedaan antara hasil eksperimen dengan hasil pemodelan numerik ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah jumlah pengambilan data pada eksperimen lebih sedikit dibandingkan dengan pemodelan numerik. Selain itu pada eksperimen kekasaran permukaan dinding tidak diperhitungkan sedangkan pemodelan numerik diperhitungkan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan baik dari hasil eksperimen dan numerik, terdapat beberapa hal yang masih perlu diperbaiki untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih baik pada penelitian selanjutnya. Beberapa saran yang dapat digunakan sebagai pertimbangan antara lain:

- 1) Dalam pengambilan data tekanan sebaiknya digunakan alat yang lebih akurat seperti *hot wire* dan untuk mengukur tekanan digunakan *pressure transducer*
- 2) Dalam simulasi numerik sebaiknya digunakan *intensitas turbulensi* dan faktor koreksi yang lain. Hal ini dilakukan supaya hasil numerik dapat mendekati hasil eksperimen dengan baik



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

Affan, Ibnu., “*Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penambahan Satu Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Horizontal Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds  $2,1 \times 10^5$* ” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2009.

Amalina, Retna., “*Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penambahan Satu Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Horizontal Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds  $1,4 \times 10^5$* ” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2010.

Cheng, D.Y.,”Laminar Flow Elbow System and Method”,U.S. Patent Documents, No. 5,323,661, 1994.

Farida, Rahmawati., ”*Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Satu Buah Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran di Dalam Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds  $2,1 \times 10^4$  dan  $8,4 \times 10^4$*  “, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2008.

Fox, R.W. & McDonald, A. T., “*Introduction to Fluid Mechanics, 5<sup>th</sup> edition*”, John Wiley and Son, Inc, 1998.



Hakim, Amir, “*Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Dua Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds  $2,1 \times 10^4$  dan  $8,4 \times 10^4$* ” *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2008.

Iswati, “*Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penambahan Dua Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Horizontal Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds  $2,1 \times 10^5$* ” *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2009.

Liou, T.M. Lee, H.L. & Liao, C.C., “*Effect of Inlet Guide-Vane Number in a Side-Dump Combuster Inlet*”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24 11-3, 2001.

Miller, D.S., “*Internal Flow System*”, 2<sup>nd</sup> edition, BHRA (Information Service), 1990.

Nadia, N. “*Studi Eksperimen dan Numerik Pengaruh Penambahan Tiga Guide Vanes Terhadap Pressure Drop Aliran Di Dalam Horizontal Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds  $2,1 \times 10^5$* ” *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, 2010

Puti, Sapurahmi., “*Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penambahan Dua Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran didalam Horizontal Rectangular Elbow 90° studi kasus untuk angka Reynolds  $1,4 \times 10^5$* ”



” *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2010.

Sutrisno, M.D., ”*Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Tiga Buah Guide Vanes terhadap Pressure Drop Aliran di Dalam Rectangular Elbow 90°* “, *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2008.

Tuakia, Firman., ”*Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT*”, Informatika Bandung, 2008.



## BIODATA PENULIS



Adityas Wibowo Kusumo lahir pada tanggal 29 Juni 1991 di Sragen, Jawa Tengah. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar di SDN Puro 02, SMP MTA GEMOLONG dan SMA MTA SURAKARTA. Kemudian tahun 2009 melalui jalur Seleksi Penerimaan Mahasiswa Baru (SPMB) diterima di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

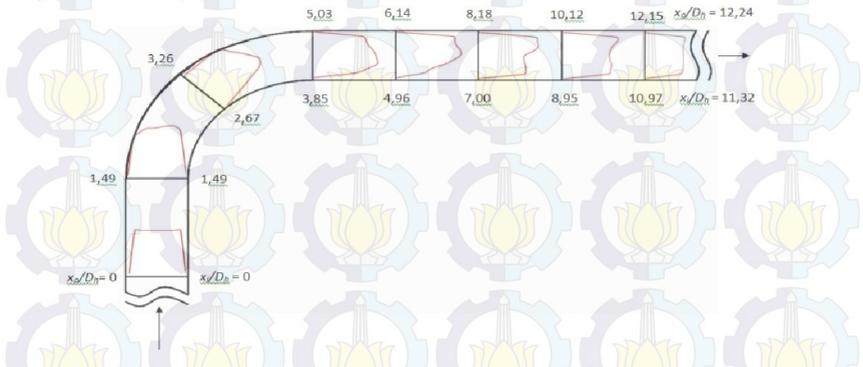
Ketika menempuh pendidikan sekolah menengah atas masuk kedalam kelas model mulai dari kelas X sampai XII . Semasa kuliah pernah menjabat sebagai KOMTING angkatan M52 dan aktif di berbagai kegiatan kemahasiswaan, diantaranya adalah Robotika sebagai Wakil divisi Pelatihan.

Kerja keras sebagai modal prinsip dalam menjalani proses kehidupan. Kerasnya hidup yang pernah dilalui akan membentuk menjadi seorang pria yang tangguh, kuat, mantap dan pantang menyerah. Aura yang terpancar dari seorang pria yang sudah lebih dari 10 tahun terpisah dari keluarga menjadikan pribadi yang mandiri dan optimis. Cepat atau lambat ALLAH akan menakdirkan saya menjadi seorang pemimpin yang tidak hanya berorientasi duniawi tetapi keutamaan kehidupan di akherat nanti. “ JANGAN BERPUTUS ASA DARI RAHMAT ALLAH, KETIKA ALLAH SUDAH BERKATA : “ IYA” SEMUANYA AKAN TERJADI DAN JADIKANLAH ANDA SAKSI BAGAIMANA SAYA 10 TAHUN NANTI”



LAMPIRAN

Profil kecepatan  $u/U_{max} = f\left(\frac{x_i}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{r}{w}\right)$  untuk *elbow* dengan *rounded leading edge guide vane*



udara standar Surabaya

Properti Udara pada udara standar Surabaya

	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
1	20	998	6	20	1.21	0.0000181	0.000015
2	21	997.8	7	21	1.206	0.00001816	0.00001508
3	22	997.6	8	22	1.202	0.00001822	0.00001516
4	23	997.4	9	23	1.198	0.00001828	0.00001524
5	24	997.2	10	24	1.194	0.00001834	0.00001532
6	25	997	11	25	1.19	0.0000184	0.0000154
7	26	996.8	12	26	1.186	0.00001844	0.0000155
8	27	996.6	13	27	1.182	0.00001848	0.0000156
9	28	996.4	14	28	1.178	0.00001852	0.0000157
10	29	996.2	15	29	1.174	0.00001856	0.0000158
11	30	996	16	30	1.17	0.0000186	0.0000159
12	31	995.6	17	31	1.166	0.00001864	0.000016
13	32	995.2	18	32	1.162	0.00001868	0.0000161
14	33	994.8	19	33	1.158	0.00001872	0.0000162
15	34	994.4	20	34	1.154	0.00001876	0.0000163
16	35	994	21	35	1.15	0.0000188	0.0000164
17	36	993.6	22	36	1.146	0.00001886	0.0000165
18	37	993.2	23	37	1.142	0.00001892	0.0000166
19	38	992.8	24	38	1.138	0.00001898	0.0000167
20	39	992.4	25	39	1.134	0.00001904	0.0000168
21	40	992	26	40	1.13	0.0000191	0.0000169

