



TUGAS AKHIR – TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN
FLUIDA MELALUI *LARGE OCTAGONAL ELBOW 90°*
PADA *CLOSED-LOOP SUBSONIC WIND TUNNEL***

Ahmad Khairul Faizin
NRP 2115 105 020

Pembimbing:
Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT – TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF
FLUID FLOW THROUGH LARGE OCTAGONAL ELBOW
IN CLOSED-LOOP SUBSONIC WIND TUNNEL**

Ahmad Khairul Faizin
NRP 2115 105 020

Supervisor :
Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN
FLUIDA MELALUI LARGE OCTAGONAL ELBOW
PADA CLOSED-LOOP SUBSONIC WIND TUNNEL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AHMAD KHAIRUL FAIZIN

NRP. 2115 105 020

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D (Pembimbing)
NIP. 196412281990031002
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., M.P. (Penguji I)
NIP. 197104051997021003
3. Nur Ikhwan, ST., M.Eng. (Penguji II)
NIP. 196709151995121001
4. Vivien Suphandani, ST., M.Eng., Ph.D (Penguji III)
NIP. 198105292003122001

SURABAYA

JULI, 2017

Studi Eksperimen Karakteristik Aliran Fluida Melalui Large Octagonal Elbow Pada Closed-Loop Subsonic Wind Tunnel

Nama Mahasiswa : Ahmad Khairul Faizin
NRP : 2115105020
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D

Abstrak

Penggunaan *elbow* pada instalasi *closed-loop wind tunnel* akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran, besarnya *pressure drop* pada aliran yang melalui *elbow* tersebut dipengaruhi oleh besarnya jari-jari kelengkungan, *friction* dan sudut belok dari *elbow*. Hal ini menyebabkan terjadinya separasi dan *secondary flow* pada *elbow* dan menyebabkan kerugian energi aliran (*headloss*) yang lebih besar.

Test section yang digunakan di dalam studi ini berupa dua *large octagonal elbow* 90° dengan radius ratio (r_m/D_h) = 0.6. Diameter *hydraulic elbow* sebesar 806 mm. Pada penelitian ini digunakan bilangan Reynolds $Re_{D_h} = 2,57 \times 10^5$ dan $4,63 \times 10^5$ berdasarkan *inlet freestream velocity* (U_∞).

Hasil eksperimen menunjukkan nilai ΔC_p pada $Re = 2,57 \times 10^5$ di *elbow* 1 sebesar 0,683 dan *elbow* 2 sebesar 1,055. Besarnya perbedaan tekanan *outer* dan *inner wall* berpotensi terjadinya aliran sekunder. Pada $x_i/D_h = 1.35$, aliran fluida mengalami percepatan pada sisi *inner* dan aliran fluida mengalami perlambatan sisi *outer*. Antara $x_i/D_h = 1.63$ sampai $x_i/D_h = 2.01$ terjadi pergeseran kecepatan maksimum dari sisi *inner* ke sisi *outer*. Intensitas turbulensi pada *outlet octagonal elbow* 2 ($x_i/D_h = 2.54$) dan $Re = 4,63 \times 10^5$ sebesar 1,83 %, profil intensitas turbulensi di pusat profil [$(r-r_i)/b = 0,5$] sebesar 1,8 % dan berkisar 4 % di daerah *inner* dan *outer wall*. Rendahnya nilai intensitas turbulensi ini karena pengaruh dari instalasi *honeycomb*.

Kata kunci : *Large octagonal elbow 90°, pressure drop, secondary flow, head loss.*

Experimental Study On Characteristics Of Fluid Flow Through Large Octagonal Elbow In Closed-Loop Subsonic Wind Tunnel

Name of Student : Ahmad Khairul Faizin
NRP : 2115105020
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Supervisor : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D

Abstract

The use of elbow in closed-loop wind tunnel installation will cause pressure loss at flow, the amount of pressure drop in flow through the elbow is influenced by the magnitude of the radius of curvature, friction and the angle of the elbow. This leads to separation and secondary flow in the elbow and leads to greater loss of energy flow (headloss).

The test section used in this study was two large octagonal elbow 90° with radius ratio $(r_m/D_h) = 0.6$. Diameter hydraulic elbow of 806 mm. In this study used Reynolds $Re_{D_h} = 2.57 \times 10^5$ and 4.63×10^5 based on freestream velocity (U_∞) inlet.

The experimental results show the value of ΔC_p at $Re = 2.57 \times 10^5$ in elbow 1 of 0.683 and elbow 2 of 1.055. The magnitude of the difference in outer and inner wall pressures has the potential for secondary flow. At $x_i / D_h = 1.35$, the fluid flow accelerates on the inner side and the fluid flow decelerates the outer side. Between $x_i / D_h = 1.63$ to $x_i / D_h = 2.01$ there is a maximum velocity shift from the inner side to the outer side. The intensity of turbulence at outlet octagonal elbow 2 ($x_i / D_h = 2.54$) and $Re = 4.63 \times 10^5$ of 1.83%, turbulence intensity profile at center of profile $[(r-ri) / b = 0,5]$ of 1, 8% and around 4% in inner and outer wall areas. The low value of this turbulence intensity is due to the influence of the honeycomb installation.

Keywords: Large octagonal elbow 90° , pressure drop, secondary flow, head loss

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak.

Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. **Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D** selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
2. **Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc. Eng. Ph.D** selaku Kepala Departemen Teknik Mesin yang telah memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
3. **Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT, Bapak Nur Ikhwan, ST., M.Eng,** serta **Ibu Vivien Suphandani ST., M.Eng, Ph.D** selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
4. **Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.** selaku Dosen wali penulis, terima kasih atas kebaikan dan kesabaran serta motivasi bapak selama ini.
5. **Bapak Sutrisno** selaku pembimbing di lab. Mekanika Fluida yang telah membimbing dan memberikan saran-saran selama dalam pembuatan alat dan pengambilan data eksperimen.
6. Seluruh Dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.
7. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.
8. Ayah dan ibu, atas segala cinta dan tetesan air mata di setiap doa yang dipanjatkan untukku senantiasa menemani, mengiringi dan menguatkan saya dalam menjalani setiap masa perkuliahan

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

Surabaya, 20 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Definisi <i>Wind Tunnel</i>	5
2.2. Klasifikasi <i>Wind Tunnels</i>	5
2.1.1. Kriteria berdasarkan salurannya.....	5
2.1.2. Kriteria berdasarkan kecepatan maksimum dicapai	6
2.3. Persamaan Euler Pada Koordinat <i>Streamline</i>	7
2.4. Static, Stagnation, and Dynamics Pressures.....	8
2.5. Elbow / Turning Corner	10
2.6. Coefficient of Pressure (C_p).....	12
2.7. Proses Terjadinya Separasi Pada <i>Elbow</i>	13
2.8. Proses Terjadinya Aliran Sekunder Pada <i>Elbow</i>	14
2.9. Distribusi Tekanan Sepanjang <i>Inner</i> dan <i>Outer Wall Elbow</i>	15
2.10. Profil Kecepatan Aliran Didalam <i>Elbow</i>	18
2.11. Intensitas Turbulensi	21
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Instalasi Penelitian.....	23
3.2. Peralatan Pendukung	26
3.3. Analisa Dimensi Parameter yang Dianalisa	29
3.4. Langkah-Langkah Eksperimen.....	32

3.4.1. Prosedur Validasi Data	32
3.4.2. Pengambilan Data Kuantitatif	33
3.4.3 Pengolahan Data Kuantitatif.....	35
3.5. Ringkasan Langkah-Langkah Penelitian	38
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Distribusi Wall Pressure Coefficient (C_p).....	39
4.2 Distribusi Profil Kecepatan	44
4.2.1 Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$	44
4.2.2 Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$	47
4.3 Intensitas Turbulensi dan Profil Intensitas Turbulensi.....	50
4.3.1 Intensitas Turbulensi	50
4.3.2 Profil Intensitas Turbulensi	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA	55

DAFTAR GAMBAR

BAB II

Gambar 2.1 Diagram <i>open circuit wind tunnel</i>	6
Gambar 2.2 <i>Top view closed circuit wind tunnel</i>	6
Gambar 2.3 Partikel fluida yang mengalir sepanjang <i>streamline</i>	7
Gambar 2.4 Pengukuran tekanan statis	9
Gambar 2.5 Pengukuran tekanan stagnasi.....	9
Gambar 2.6 Pengukuran tekanan stagnasi dan tekanan statis ...	10
Gambar 2.7 Efek bentuk penampang pada distribusi kecepatan	11
Gambar 2.8 <i>Rectangular cross-section bend geometries</i>	12
Gambar 2.9 <i>Separation region</i> pada <i>circular elbow</i>	13
Gambar 2.10 <i>Secondary flow</i> pada <i>circular elbow</i>	14
Gambar 2.11 <i>Secondary flow</i> pada <i>rectangular elbow</i>	15
Gambar 2.12 Distribusi tekanan pada <i>circular elbow</i>	16
Gambar 2.13 Distribusi tekanan pada <i>rectangular elbow</i> tanpa <i>guide vane</i>	17
Gambar 2.14 Distribusi <i>C_p</i> <i>inner</i> dan <i>outer wall</i> <i>rectangular elbow 90°</i> tanpa <i>guide vane</i> <i>Re = 3,8 x 10⁵</i>	18
Gambar 2.15 Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada <i>downstream circular elbow</i>	19
Gambar 2.16 Distribusi profil kecepatan <i>rectangular</i> <i>elbow 90°</i> dengan dan tanpa <i>guide vane</i>	19
Gambar 2.17 Distribusi kecepatan pada <i>octagonal elbow 90°</i> tanpa <i>guide vane</i> bidang horizontal.....	20

BAB III

Gambar 3.1 Skema Instalasi Wind Tunnel.....	23
Gambar 3.2 Skema penelitian <i>octagonal elbow</i> besar 1.....	24
Gambar 3.3 Skema penelitian <i>octagonal elbow</i> besar 2.....	25
Gambar 3.4 Lokasi Perhitungan untuk Profil Kecepatan	27
Gambar 3.5 <i>Inclined manometer</i>	28

BAB IV

Gambar 4.1 Grafik distribusi C_p inner - outer wall octagonal elbow 1 (a) dan octagonal elbow 2 (b) pada $Re = 2,57 \times 10^5$ dan $Re = 4,63 \times 10^5$	41
Gambar 4.2 Grafik distribusi (a) $C_p = f(x/S)$ test section (b) $C_p = f(\varphi)$ octagonal elbow 1 (c) $C_p = f(\varphi)$ octagonal elbow 2.....	43
Gambar 4.3 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal setiap section pada octagonal elbow 90° dengan $Re = 4,63 \times 10^5$	45
Gambar 4.4 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal setiap section pada octagonal elbow 90° dengan $Re = 4,63 \times 10^5$	49
Gambar 4.5 Sinyal fluktuasi kecepatan aliran udara pada (a) $Re_{Dh} = 2,57 \times 10^5$ (b) $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$ pada centerline elbow	51
Gambar 4.6 Profil intensitas turbulensi bidang horizontal pada $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$ (a) posisi $x_i/D_h = 0.25$ (b) posisi $x_i/D_h = 2.54$	52

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Posisi pengukuran pressure tap pada octagonal elbow 90°	26
Tabel 3.2 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan	27
Tabel 4.1 Persentase peningkatan wall pressure coefficient octagonal elbow 90° besar 1 dan 2 pada $Re = 2,57 \times 10^5$ dan $Re = 4,63 \times 10^5$	42
Tabel 4.2. Perbandingan intensitas turbulensi pada setiap variasi Re	50

DAFTAR SIMBOL

Simbol geometri *octagonal elbow 90°*

- a : tinggi *cross section elbow 90°*, (m)
 - b : lebar *cross section elbow 90°*, (m)
 - r : posisi arah normal terhadap *streamline elbow 90°*, (m)
 - r_i : *inner radius*, (m)
 - r_o : *outer radius*, (m)
 - x_i : posisi searah *streamline* dinding dalam *elbow 90°*, (m)
 - x_o : posisi searah *streamline* pada dinding luar *elbow 90°*, (m)
 - l_i : panjang total *inner* searah *streamline elbow 90°*, (m)
 - l_o : panjang total *outer* searah *streamline elbow 90°*, (m)
 - D_h : diameter hidrolik saluran, (m)
 - L_i : panjang *inlet elbow 90°*, (m)
 - L_o : panjang *outlet elbow 90°*, (m)
- Δp : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi, (N/m²)
- U_{ref} : kecepatan *freestream* di *inlet elbow 90°*, (m/s)
- u : kecepatan lokal, (m/s)
- 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, (kg/m²)
- $p_{s,i}$: tekanan statis dinding pada $x/D_h = i$, (Pa)
- p_{ref} : tekanan statis referensi pada $x/D_h = 0$, (Pa)
- p_o : tekanan stagnasi, (Pa)
- p_s : tekanan statis sejajar dengan *stagnasi pressure tube*, (Pa)
- Re_{D_h} : bilangan *Reynolds* = $\frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}$, tak berdimensi
- SG : *specific gravity*, tak berdimensi
- T : temperatur ruangan, (°C)
- x/D_h : koordinat sepanjang *streamline* berdasar panjang sisi *inner*, tak berdimensi
- x_o/D_h : koordinat sepanjang *streamline* berdasar panjang sisi *outer*, tak berdimensi
- z/a : koordinat vertikal, tak berdimensi
- r/b : koordinat normal *streamline*, tak berdimensi

- ΔC_p : selisih C_p maksimum di sisi *outer* dan C_p minimum di sisi *inner*, tak berdimensi
- $\frac{\partial p}{\partial x}$: gradient tekanan, (N/m³)
- $\frac{du}{dy}$: *gradient* kecepatan aliran (s⁻¹)
- Δh : selisih bacaan awal dan akhir manometer, (mm)
- ν : viskositas kinematis udara, (m²/s)
- ρ_{H_2O} : massa jenis air, (kg/m³)
- ρ_{ud} : massa jenis udara, (kg/m³)
- φ : sudut *inclined manometer*, derajat
- π : grup bilangan tak berdimensi



BAB I **PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang

Wind tunnel pertama kali dibuat pada tahun 1871 oleh Francis Wenham dan John Browning dari Inggris, berdasarkan keinginan untuk simulasi penerbangan di dalam atmosfer. *Wind tunnel* atau terowongan angin adalah salah satu teknologi yang digunakan sebagai alat riset untuk membantu dalam menganalisa efek angin yang bergerak di sekitar objek.

Saat ini teknologi terowongan angin mengalami perkembangan yang sangat pesat dengan berbagai jenis sesuai kebutuhan. Adapun kategori bentuk terowongan angin ada dua jenis, saluran terbuka (*open circuit*) dan saluran tertutup (*closed circuit*). Tipe saluran terbuka (*open circuit*) memiliki komponen seperti *fan*, *test section*, *diffuser*, dan *contraction*. Tipe saluran tertutup (*closed circuit*) mempunyai beberapa komponen seperti *nozzle*, *test section*, *diffuser*, *fan*, *corner*, *honeycomb*, dan *settling chambers* (Njock Libii, 2011). Dalam tingkat efisiensinya, *wind tunnel* pada saluran tertutup (*closed circuit*) memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan saluran terbuka (*open circuit*) karena konsumsi *power* yang besar pada *open circuit*. Pada *closed circuit* udara akan terus bersirkulasi sepanjang saluran tertutup. Selain efisiensi yang lebih besar, keuntungan lain yang didapat dari *closed circuit* adalah kontrol yang unggul atas kualitas aliran dengan adanya *corner turning* dan *screens* (Kulkami et al., 2012).

Pada desain *wind tunnel* saluran tertutup (*closed circuit*) terdapat *corner turning* atau *elbow 90⁰* yang fungsinya untuk membelokkan aliran udara agar terus bersirkulasi didalam saluran *wind tunnel*. *Elbow 90⁰* pada *wind tunnel* menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran fluida. Kerugian tekanan disebabkan oleh perubahan arah aliran yang menyebabkan gesekan antara fluida dengan dinding *elbow* dan separasi aliran serta aliran sekunder memberikan kontribusi yang besar terhadap *pressure drop*. Empat *elbow 90⁰* pada *wind tunnel closed circuit*



menyumbang lebih dari 50% terhadap total *pressure drop* yang dihasilkan (Hernandez, 2013).

Sutardi et al. (2010) melakukan eksperimen pada 90° *rectangular elbow* dengan empat variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane*, satu *guide vane*, dua *guide vane*, dan tiga *guide vane*. Jarak pada setiap jumlah *guide vanes* yang digunakan sama atau linier terhadap sisi dekat *inner wall* sampai *outer wall*. Bilangan Reynolds aliran yang melalui *elbow* divariasikan menjadi 2.1×10^4 , 8.4×10^4 dan 12×10^4 . Hasil yang didapat dari eksperimen adalah, pada nilai *Re* terkecil sebesar 2.1×10^4 , penambahan *guide vane* mengurangi *pressure drop*. Pada variasi *Re* aliran sebesar 8.4×10^4 dan 12×10^4 terjadi fenomena peningkatan *pressure drop* pada setiap penambahan *guide vane*, hal ini diakibatkan oleh peningkatan *skin friction drag*. Peningkatan *skin friction drag* sendiri terjadi karena luasan kontak *solid-surface* membesar seiring penambahan *guide vane*.

Naibaho (2015) melakukan penelitian tentang *octagonal elbow* pada *subsonic closed circuit wind tunnel* dengan dua variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane* dan dua *guide vane* pada *Re* sebesar 1.9×10^5 dan 3.8×10^5 . Didapatkan kesimpulan ialah penambahan bilangan Reynolds sebanding dengan kenaikan C_p searah aliran dan pada saat dilakukan pemasangan dua *guide vane* berhasil meminimalisasi adanya aliran sekunder dan *pressure drop* dibanding tanpa *guide vane* pada *octagonal elbow* 90° .

Dari penelitian Naibaho tentang *octagonal elbow* pada *subsonic closed circuit wind tunnel*, yang fokusnya pada *large elbow* dapat dilanjutkan dan disempurnakan karena pada penelitian tersebut mengasumsikan karakteristik aliran fluida pada kedua *larger octagonal elbow* 90° adalah identik padahal sesungguhnya berbeda. Oleh sebab itu pada penelitian lanjutan ini berfokus pada pengukuran profil kecepatan, distribusi tekanan dan intensitas turbulensi pada kedua *large elbow* dan tidak dilakukan pemasangan *guide vane* karena menghindari terjadinya *skin friction drag* yang berimplikasi pada peningkatan *pressure*



drop, Sutardi dkk menampilkan fenomena ini dalam penelitiannya.

1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang diatas dapat ditarik rumusan permasalahan terkait aliran didalam *large octagonal elbow 90°* sebagai berikut:

1. Berapa besar penurunan tekanan (*pressure drop*) ketika aliran melalui *large octagonal elbow 90°* pada *subsonic closed circuit wind tunnel* ?
2. Bagaimana distribusi profil kecepatan pada bidang *vertical* dan *horizontal* pada *large octagonal elbow 90°* ?
3. Bagaimana intensitas turbulensi pada *outlet downstream large octagonal elbow 90°*?

1.3 Tujuan

Penelitian dilakukan untuk menjelaskan karakteristik aliran fluida didalam dua *large octagonal elbow 90°* pada *subsonic closed circuit wind tunnel*. Instalasi *large elbow* pertama didahului komponen diffuser besar sebagai *upstream flow* dan *large elbow* kedua diawali *straight ducting* sebagai *upstream flow* sedangkan sisi *downstream flow* pada komponen *nozzle*. Secara umum dua *large octagonal elbow 90°* terletak jauh dari posisi fan sebagai penyuplai debit aliran. Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengukur distribusi tekanan statik aliran melalui *large octagonal elbow 90°* pada *subsonic closed-loop wind tunnel*.
2. Mengetahui distribusi profil kecepatan pada bidang *vertical* dan *horizontal octagonal elbow 90°*.
3. Mengetahui intensitas turbulensi pada *outlet downstream octagonal elbow 90°*.



1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini batasan masalah yang diambil adalah sebagai berikut:

1. Fluida yang digunakan adalah udara. Temperatur fluida konstan.
2. Aliran fluida bersifat *incompressible*, *viscous*, dan *steady*.
3. Efek perpindahan panas antara fluida dengan sistem diabaikan.
4. Kekasaran pada permukaan saluran udara diabaikan.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Definisi *Wind Tunnel*

Terowongan angin adalah ruang yang dirancang khusus dan dilindungi di mana udara dihisap, atau ditiup, secara mekanik untuk mencapai kecepatan tertentu dan pola aliran pada suatu saat tertentu. Pola aliran dapat diamati dari luar terowongan angin melalui jendela transparan yang melingkupi *test section* dan karakteristik aliran fluida dapat diukur menggunakan peralatan khusus. Sebuah objek yang akan diamati dibenamkan pada bagian *test section*, tujuannya mencakup simulasi, visualisasi, mengamati, dan / atau mengukur bagaimana aliran di sekitar objek mempengaruhi objek terendam (Njock Libii, 2011).

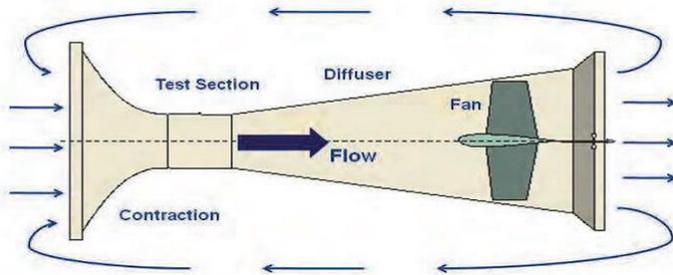
Kriteria aliran didalam *wind tunnel* yang diinginkan meliputi kecepatan maksimum yang dideteksi pada *test section*, keseragaman aliran serta tingkat intensitas turbulensinya. Hal ini untuk menunjang hasil eksperimen yang akurat saat dilakukan pengujian pada objek uji.

2.2 Klasifikasi *Wind Tunnels*

Wind tunnels dapat diklasifikasi dalam dua kriteria. Berikut dua kriteria tersebut.

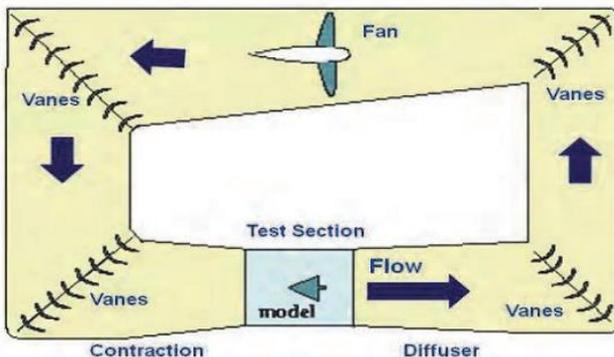
2.2.1 Kriteria berdasarkan salurannya: *open and closed circuit wind tunnels*

Open-circuit (open-return) wind tunnel. Jika udara diambil langsung dari lingkungan ke dalam terowongan angin dan dilepas kembali ke lingkungan, terowongan angin dikatakan memiliki sirkuit terbuka.



Gambar 2.1 Diagram *open circuit wind tunnel*
(Njock Libii, 2011)

Closed-circuit (closed-return) wind tunnel. Jika udara yang sama ini sedang beredar di terowongan dimana tidak mengalirkan udara baru dari sekitarnya, atau kembali ke lingkungan, terowongan angin dikatakan memiliki sirkuit tertutup udara. Gambar 2.2 mengilustrasikan konfigurasi ini.



Gambar 2.2 Top view *closed circuit wind tunnel*
(Njock Libii, 2011).

2.2.2 Kriteria berdasarkan kecepatan maksimum dicapai: *subsonic vs supersonic wind tunnel.*

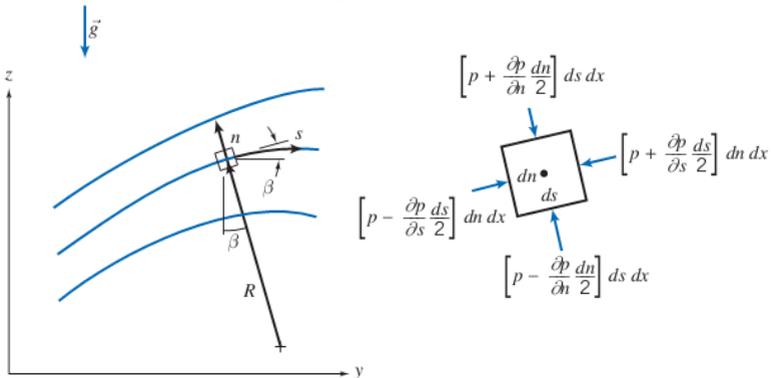
Dalam kriteria *subsonic* atau *supersonic wind tunnel* digunakan bilangan Mach, dimana bilangan tak berdimensi ini merupakan rasio antara kecepatan alir fluida di *wind tunnel* dengan



kecepatan suara di udara. Kriteria *subsonic wind tunnel* untuk kecepatan maksimum yang dicapai kurang dari kecepatan suara di udara atau Mach *number* kurang dari satu ($M < 1$). Kriteria *supersonic wind tunnel* untuk kecepatan maksimum yang dicapai lebih besar dari kecepatan suara di udara atau Mach *number* lebih besar dari satu ($M > 1$) (Njock Libii, 2011).

2.3 Persamaan Euler Pada Koordinat *Streamline*

Streamline merupakan sembarang garis yang dilukiskan dalam medan aliran, dimana garis singgung pada setiap titik dalam garis tersebut menyatakan arah kecepatan aliran. Persamaan Euler digunakan untuk menggambarkan sebuah aliran dalam kondisi stabil sepanjang *streamwise* (s) dimana untuk mempermudah pembacaan persamaan Euler ini dapat diperhatikan gambar 2.3 dengan yz sebagai koordinat arah aliran.



Gambar 2.3 Partikel fluida yang mengalir sepanjang *streamline* (Pritchard, 2011)

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

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.1)$$



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

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

Persamaan 2.2 menunjukkan bahwa tekanan meningkat ke arah keluar dari pusat kelengkungan dari *streamline*.

Dari persamaan 2.2 diatas untuk daerah dimana streamlinenya lurus dengan kata lain jari-jari kelengkungan R adalah infinite maka berikut penurunan persamaanya.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R}$$

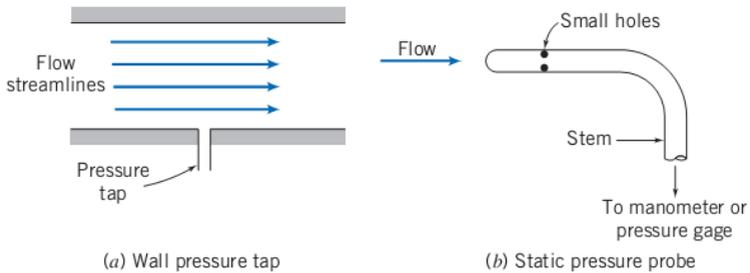
Pada kondisi geometri saluran lurus atau dimana $R = \infty$ maka,

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 menunjukkan bahwa tidak ada variasi tekanan pada arah penampang tegak lurus aliran.

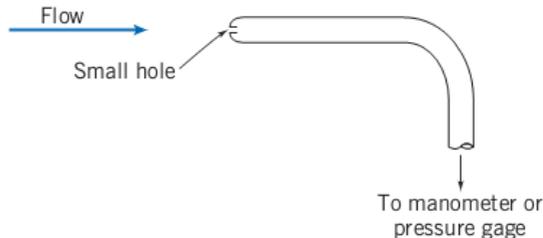
2.4 Static, Stagnation, and Dynamics Pressures

Tekanan statis atau tekanan thermodinamika pada persamaan Bernoulli adalah tekanan fluida yang diukur oleh alat yang bergerak bersama dengan fluida. Kondisi ini sangat sulit diwujudkan, namun dengan kenyataan bahwa tidak ada variasi tekanan pada arah penampang tegak lurus aliran, maka tekanan statis dapat diukur dengan membuat lubang kecil pada dinding aliran sedemikian rupa sehingga sumbunya tegak lurus dinding aliran (*wall pressure tap*) seperti diperlihatkan gambar 2.4 (a). Gambar 2.4 (b) adalah cara lain dalam pengukuran tekanan statis dengan memasang *probe* atau tabung pitot pada aliran fluida jauh dari dinding aliran.



Gambar 2.4 Pengukuran tekanan statis (Pritchard, 2011).

Tekanan Stagnasi adalah tekanan fluida yang diukur pada aliran fluida yang diperlambat sampai diam, $V = 0$ dengan kondisi aliran tanpa gesekan. Pengukuran tekanan stagnasi pada tabung pitot diukur oleh lubang kecil di mulut tabung yang akan tepat tegak lurus terhadap garis arus dari aliran seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Pengukuran tekanan stagnasi (Pritchard, 2011).

Jika tekanan statis adalah p di titik tertentu (lokal) pada aliran dimana kecepatannya adalah V , kemudian tekanan stagnasi, p_0 dimana kecepatan stagnasi, V_0 adalah nol, maka dari persamaan Bernoulli dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} &= 0 \\ \frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} &= \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2.4) \\ p_0 &= p + \frac{1}{2}\rho V^2 \end{aligned}$$



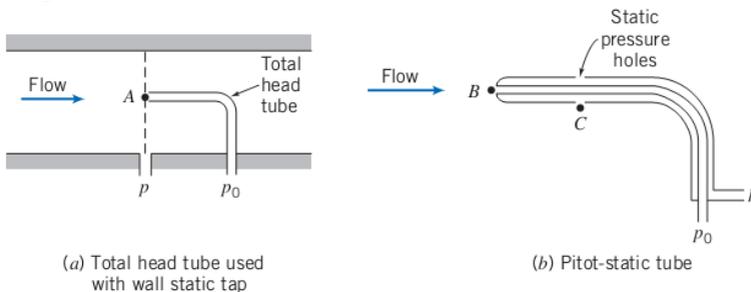
Dari persamaan 2.4 dapat ditulis sebagai berikut persamaannya.

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (2.5)$$

Kecepatan dari hasil pengukuran tekanan sangat penting digunakan pada *wind tunnels* untuk visualisasi pola aliran sepanjang *circuit*.

Tekanan dinamik ($\frac{1}{2}\rho V^2$) yaitu tekanan akibat kecepatan fluida, yakni selisih antara tekanan statis dengan tekanan stagnasi. maka pengukuran tekanan statis dan tekanan stagnasi dengan tabung pitot dapat juga sekaligus mengukur tekanannya.

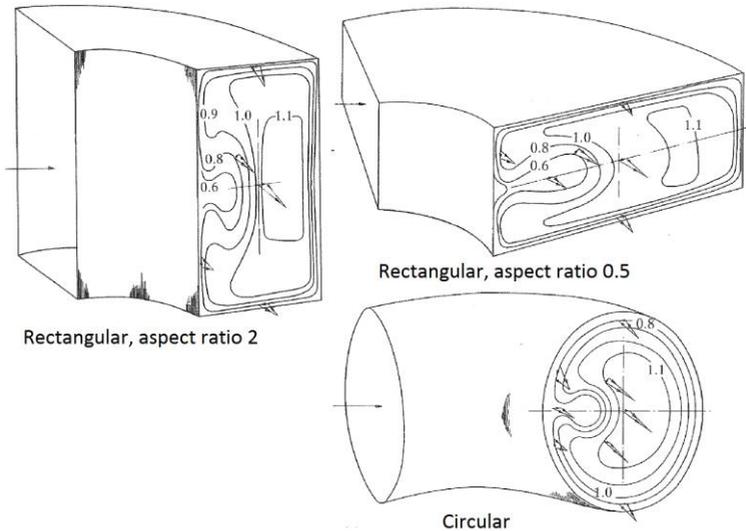
Secara umum ada dua cara untuk mengukur tekanan total (stagnasi) dan tekanan statis pada *test section*, gambar 2.6 menggambarkan dua cara tersebut.



Gambar 2.6 Pengukuran tekanan stagnasi dan tekanan statis (Pritchard, 2011).

2.5 *Elbow / Turning Corner*

Distribusi kecepatan pada *outlet* dari 90° elbow dengan penampang *circular* dan *rectangular* ditunjukkan pada gambar 2.7. Pada *elbow* penampang *rectangular* memiliki aspek rasio 0.5 dan 2.

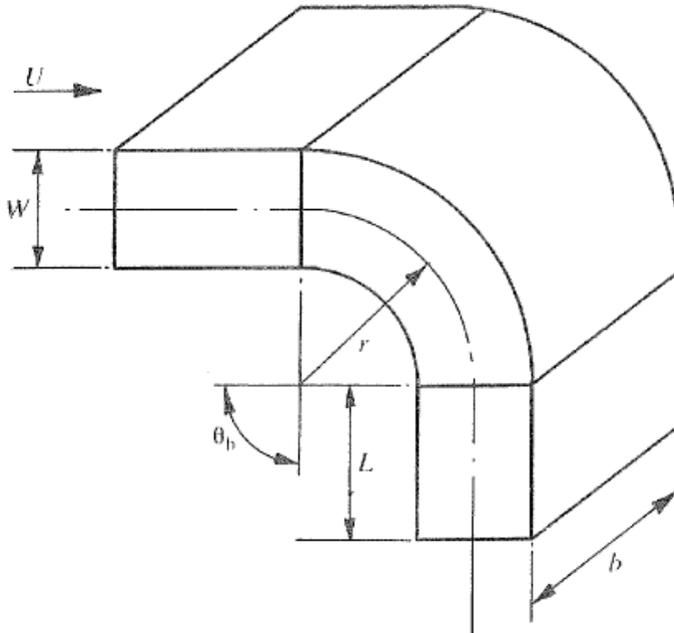


Gambar 2.7 Efek bentuk penampang pada distribusi kecepatan (Miller, 1990)

Pada *elbow* penampang *rectangular* dengan aspek rasio 0.5 memiliki luas permukaan yang besar untuk dilalui aliran fluida namun *headloss*nya pada bagian inner lebih sedikit dibanding pada aspek rasio 2. *Elbow* penampang *rectangular* dengan aspek rasio yang rendah memiliki luasan permukaan besar sehingga *friction losses*nya lebih tinggi dibanding dengan penampang *circular* pada aspek rasio tinggi (Miller, 1990).

Parameter geometrik untuk *elbow* penampang *rectangular* ditunjukkan pada gambar 2.8. Parameter geometrik meliputi rasio radius r/W , sudut bengkok *elbow* dan aspek rasio (b/W). Panjang sisi *inlet* dan *outlet* selalu didefinisikan dengan diameter hidraulik D_h , dimana persamaanya sebagai berikut.

$$D_h = \frac{4 \times \text{Cross-sectional area}}{\text{Perimeter}} = \frac{4 \times b \times W}{2(b+W)} \quad (2.6)$$



Gambar 2.8 Rectangular cross-section bend geometries
(Miller, 1990)

Bilangan Reynolds dinyatakan pada persamaan berikut

$$Re = \frac{U \cdot D_h}{\nu} \quad (2.7)$$

2.6 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



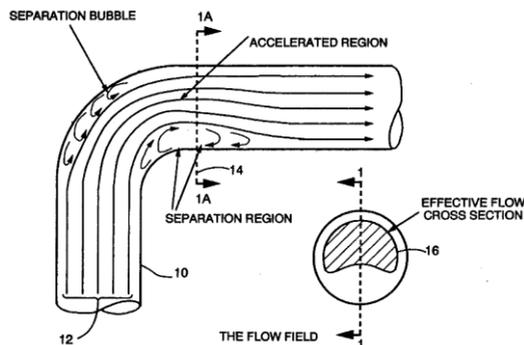
akan semakin besar seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_s - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (2.8)$$

2.7 Proses Terjadinya Separasi Pada *Elbow*

Separasi merupakan fenomena aliran dua dimensi yang penting untuk dikaji pada *elbow* yang dapat menimbulkan terjadinya kerugian *pressure*. Gesekan 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, maka akan terjadi tekanan balik (*adverse pressure gradient*) sehingga sebagian aliran akan terseparasi dan berbalik arah (*back flow*) dari aliran utama dan energi aliran akan berkurang.

Cheng (1993) menganalisa separasi aliran pada *circular elbow*. Hasil yang didapatkan adalah daerah yang mengalami separasi berada pada sisi *inner* dan sisi *outer elbow*. Besarnya daerah *separation* menurunkan momentum aliran dimana luas penampang aliran utama akan semakin kecil yang menyebabkan aliran mengalami percepatan dan menyebabkan terjadinya *pressure drop*. Gambar 2.9 menggambarkan hasil penelitiannya.

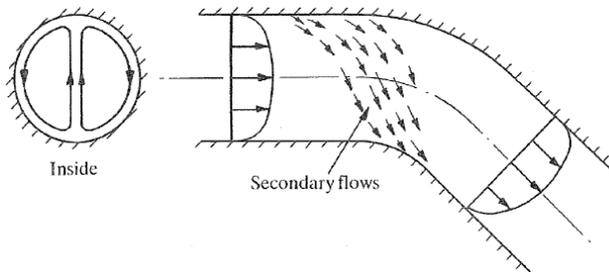


Gambar 2.9 Separation region pada *circular elbow*
(Cheng, 1993)



2.8 Proses Terjadinya Aliran Sekunder Pada *Elbow*

Aliran sekunder didalam *elbow* merupakan fenomena aliran tiga dimensi, fenomena ini terjadi akibat perbedaan distribusi tekanan disepanjang sisi *inner* dan *outer wall*. Ini mengakibatkan aliran akan bergerak dari sisi *outer wall* ke sisi *inner 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 *boundary 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 2.10.



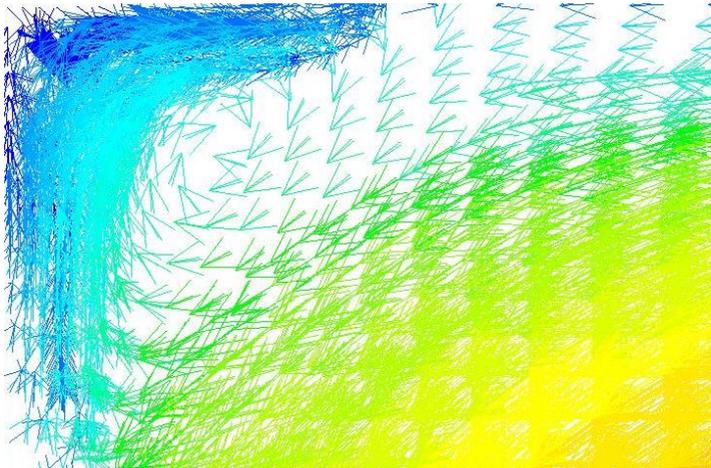
Gambar 2.10 *Secondary flow* pada *circular elbow* (Miller, 1990)

Secondary flow pada *rectangular elbow* mempunyai karakter khusus jika dibandingkan *circular elbow*. Pada *rectangular elbow* juga terjadi pada sisi *corner* akibat interaksi *boundary layer* dan *endwall flow* yang akan menghasilkan penyumbatan aliran (*blockage effect*) dan mengurangi *effective flow area*.

Penelitian *secondary flow* pada *rectangular elbow 90°* dilakukan oleh Hakim (2008) dengan menambah dua *guide vane* yang ditunjukkan pada gambar 2.11. Pada dasarnya penambahan



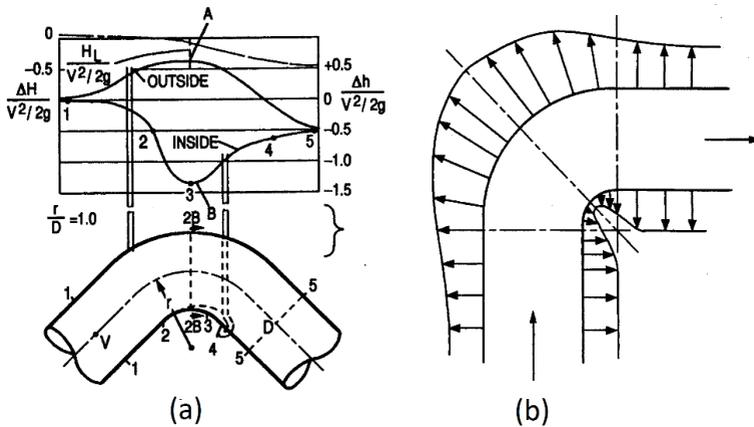
guide vane dapat memecah aliran sekunder pada sisi *inner* dan *outer* akan tetapi dengan bertambah *guide vane* cenderung akan memperbesar terjadinya aliran sekunder pada sisi *corner* dan mengikis momentum karena akumulasi *adverse pressure gradient* dan gesekan pada dinding atas dan bawah sehingga partikel aliran pada *leading edge end wall guide vane* akan terseparasi sebelum menumbuk dinding *guide vane*.



Gambar 2.11 *Secondary flow* pada *rectangular elbow 90°*
(Hakim, 2008)

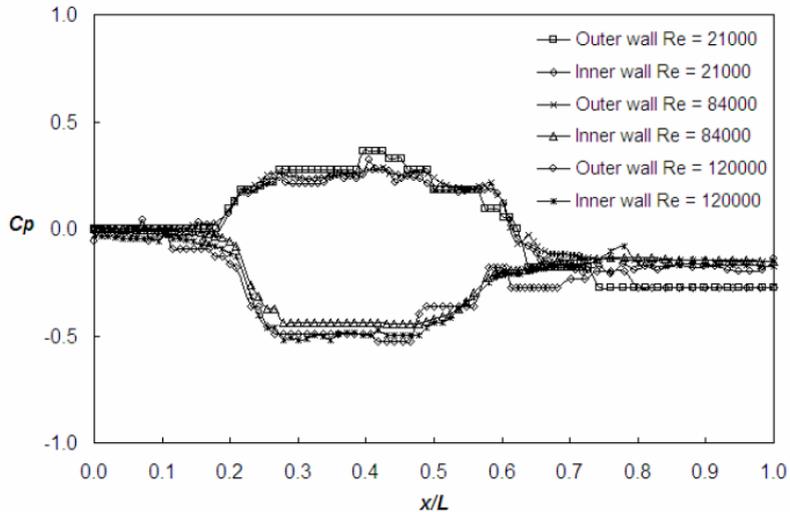
2.9 Distribusi Tekanan di Sepanjang *Inner* dan *Outer Wall Elbow 90°*

Cheng (1993) melakukan penelitian tentang distribusi tekanan di sepanjang sisi *inner wall* dan *outer wall* pada *circular 90° elbow*. Pada gambar 2.12 (b) terlihat tekanan meningkat pada *outer wall* dan hampir menciptakan *suction* di *inner wall*. Sedangkan gambar 2.12 (a) menampilkan distribusi tekanan disepanjang *outer* dan *inner wall*.



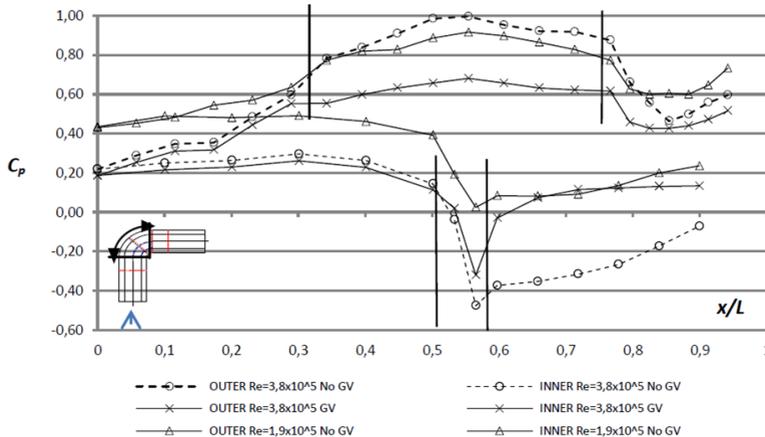
Gambar 2.12 Distribusi tekanan pada *circular elbow*
(Cheng, 1993)

Pada penelitian yang dilakukan Sutardi et al (2010) mendapatkan distribusi tekanan disepanjang *inner* dan *outer wall* pada 90° *rectangular elbow*. Menjelaskan disepanjang sisi *outer wall* distribusi tekanan yang mula-mula terjadi peningkatan tekanan kemudian secara perlahan terjadi penurunan seiring aliran melewati *outlet elbow*. Sedangkan pada sisi *inner wall* mula-mula distribusi tekanan mengalami penurunan tekanan kemudian seiring aliran melewati *outlet elbow* mengalami kenaikan secara perlahan. Pada gambar 2.13 teramati perbedaan yang signifikan pada tekanan statis antara *inner* dan *outer* dinding *elbow* hal ini memungkinkan partikel fluida bergerak dari dinding luar ke dinding dalam *elbow*.



Gambar 2.13 Distribusi tekanan pada *rectangular elbow* tanpa *guide vane* (Sutardi et al., 2010)

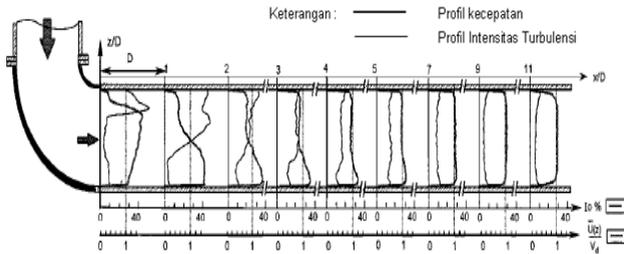
Naibaho (2015) melakukan studi eksperimen distribusi tekanan disepanjang *inner* dan *outer wall* pada *octagonal elbow* 90° dengan dan tanpa 2 *guide vane* di *wind tunnel*. Kesimpulan yang didapat ialah secara keseluruhan grafik menunjukkan tren yang serupa dengan penelitian yang dilakukan sutardi el al dan cheng yaitu peningkatan nilai C_p pada kelengkungan sisi *outer* dan penurunan nilai C_p pada kelengkungan sisi *inner*. Gambar 2.14 menunjukkan grafiknya.



Gambar 2.14 Distribusi C_p inner dan outer wall rectangular elbow 90° tanpa guide vane $Re = 3,8 \times 10^5$ (Naibaho, 2015)

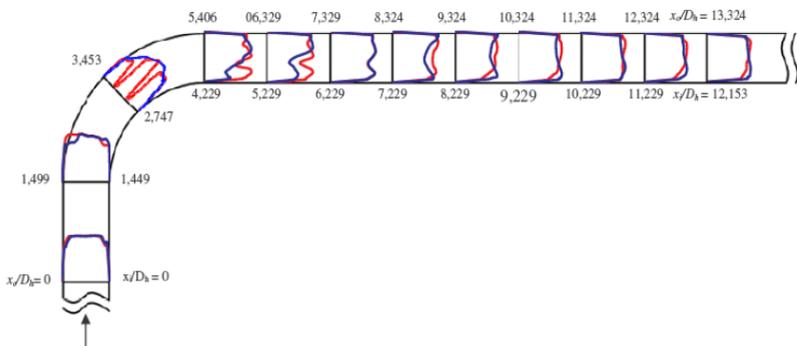
2.10 Profil Kecepatan Aliran Didalam Elbow

Danbon dan Sollicc (2000) melakukan penelitian 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 yang bergerak dari *outer wall* ke *inner wall* dapat menghambat laju aliran fluida. Hal ini menyebabkan terjadinya aliran sekunder (*secondary flow*) yang dapat menyebabkan penurunan tekanan (*pressure drop*). Profil kecepatan aliran setelah melewati *circular elbow* dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada *downstream circular elbow* (Danbon dan Sollic, 2000)

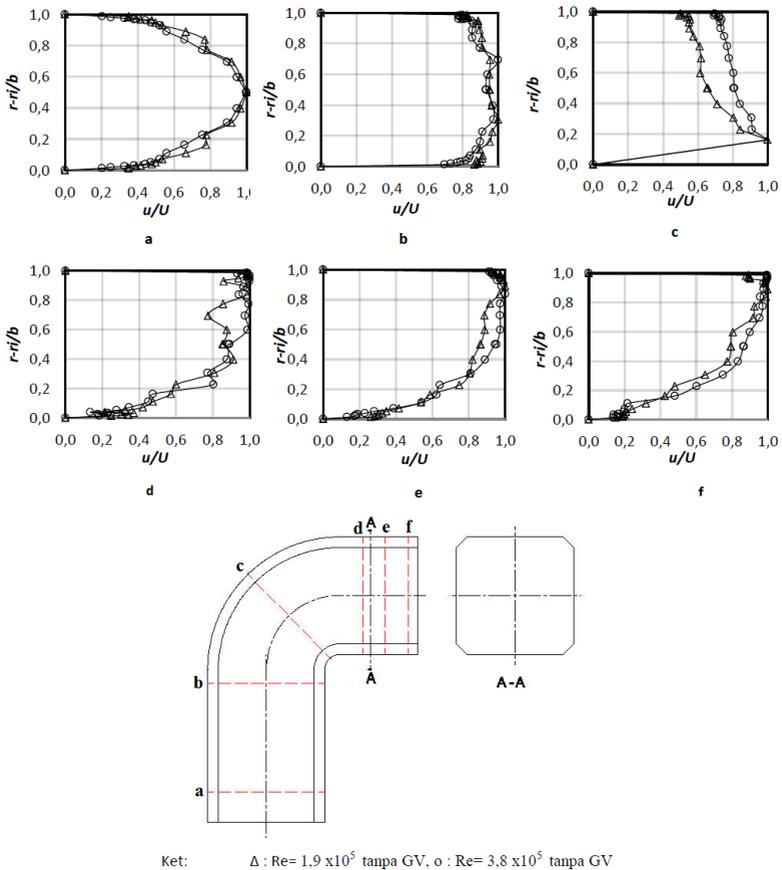
Sutardi dan Puti (2012) melakukan studi eksperimen mengenai profil kecepatan pada daerah *downstream rectangular elbow 90°*. Gambar 2.16 menunjukkan hasil studi eksperimen profil kecepatan dimana pada section 3 kecepatan maksimum aliran berada pada sisi *inner elbow* hal ini disebabkan aliran berada di daerah *favorable pressure gradient* sehingga seolah-olah terbentuk *streamtube* yang konvergen. Pada section 4 terjadi defleksi lokasi kecepatan maksimum dari sisi *inner* menuju sisi *outer elbow*. Semakin menjauhi *elbow*, kecepatan maksimum kembali terdefleksi menuju sisi *outer*. Selanjutnya profil kecepatan mengalami proses *recovery* (*recovery process*) untuk mencapai kondisi normal pada *straight duct*.



Gambar 2.16 Distribusi profil kecepatan *rectangular elbow 90°* dengan dan tanpa *guide vane* (Sutardi dan Puti, 2012)



Naibaho (2015) melakukan studi eksperimen profil kecepatan disepanjang inlet dan outlet pada *large octagonal elbow 90°* dengan dan tanpa 2 *guide vane* di *wind tunnel*. Gambar 2.17 menunjukkan hasil studi eksperimennya.



Gambar 2.17 Distribusi kecepatan pada *octagonal elbow 90°* tanpa *guide vane* bidang horizontal (Naibaho, 2015)



Pada gambar 2.17 (d) teramati pada *section 4* terjadi defleksi lokasi kecepatan maksimum dari sisi *inner* menuju sisi *outer elbow*. Disini terdapat pergeseran kecepatan yang ditunjukkan dengan berkurangnya kecepatan pada dinding *inner* dan bertambahnya kecepatan pada dinding *outer*. Sutardi dan Puti juga mendapati fenomena yang serupa dalam studi eksperimen profil kecepatan pada *rectangular elbow 90°*.

2.11 Intensitas Turbulensi

Turbulensi adalah perubahan kecepatan aliran udara yang sering terjadi pada skala kecil, jangka waktu yang pendek, serta acak. Dengan kata lain, ketika kecepatan aliran udara dan/atau arah pergerakannya berubah dengan cepat, maka pada saat itu dapat dikatakan telah terjadi turbulensi (Wagtendonk, 2003). Pada *wind tunnel* sumber turbulensi secara ringkas dapat dibagi dalam dua faktor; yaitu, turbulensi disebabkan eddies (*vortex shedding, boundary layer, tegangan geser, secondary flow*) dan kebisingan/*noise* (mekanik, getaran dan aerodinamis).

Intensitas turbulensi merupakan derajat keturbulensian aliran di dalam suatu alat uji. Secara matematis intensitas turbulensi adalah akar dari rata-rata kecepatan fluktuatif dibagi dengan kecepatan rata-rata menurut waktu. Semakin besar intensitas turbulensi, maka semakin besar fluktuasi kecepatan. Pada *wind tunnel* yang didesain dengan baik mempunyai nilai intensitas turbulensi sebesar 0,01 (Munson et al., 2005).

Persamaan untuk mengukur intensitas turbulensi ialah :

$$IT = \frac{u'}{\bar{U}} \times 100\% \quad (2.9)$$

$$u' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{U} - U_i)^2}{n-1}} \quad (2.10)$$

dimana:

- IT : Intensitas turbulensi
- U_i : Kecepatan pada waktu tertentu (m/s)
- \bar{U} : Kecepatan rata-rata (m/s)
- u' : Standar deviasi fluktuasi kecepatan (m/s)



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

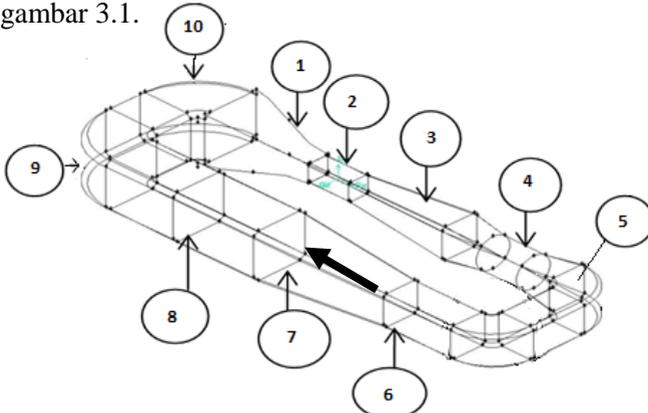


BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini membahas metode penelitian yang digunakan, yaitu metode penelitian secara eksperimen. Pembahasan meliputi instalasi dan *test section* penelitian, peralatan pendukung penelitian, analisa dimensi, prosedur pengambilan data, serta langkah-langkah dalam pengelolaan data.

3.1 Instalasi Penelitian

Instansi penelitian berupa benda uji (*test section*) dan peralatan pendukung seperti *nozzle*, *elbow*, *difuser*, *fan* dan *connector*. Instalasi penelitian memiliki spesifikasi umum dengan dimensi total panjang 6490 mm, lebar 2250 mm dan tinggi 770 mm. Skema instalasi *wind tunnel* secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Instalasi Wind Tunnel

Keterangan gambar :

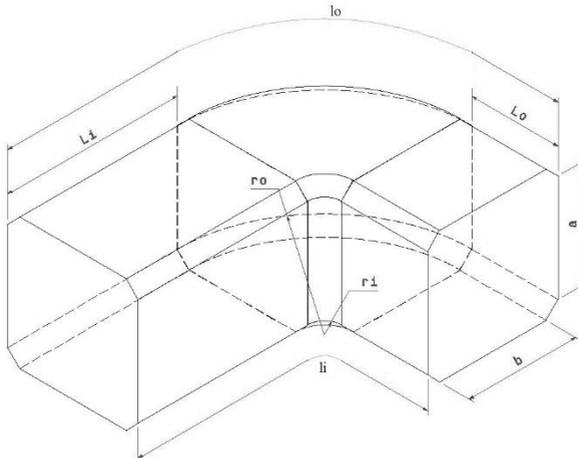
- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| 1. Nozel, honey comb dan screens | 6. Connector |
| 2. Test section 1 | 7. Difuser 2 |
| 3. Difuser 1 | 8. Test Section 2 |
| 4. Fan | 9. Elbow Besar 1 |
| 5. Elbow kecil | 10. Elbow Besar 2 |



Adapun fokus penelitian pada dua model uji, *octagonal elbow* besar 1 dan *octagonal elbow* besar 2. Berikut spesifikasi masing-masing model uji tersebut.

1. *Octagonal elbow* besar 1 (No. 9 pada skema instalasi *wind tunnel* gambar 3.1). Model uji ditunjukkan pada gambar 3.2 dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Bahan : Akrilik dan triplek
- Tebal : 6 mm
- L_i (panjang inlet *elbow*) : 1000 mm
- L_o (panjang outlet *elbow*) : 509 mm
- r_i (inner radius) : 100 mm
- r_o (outer radius) : 870.5 mm
- r_m (mean radius) : 485.2 mm
- a (tinggi) : 770.5 mm
- b (lebar) : 770.5 mm
- D_h (diameter hidrolis) : 806 mm
- r_m/D_h : 0.6
- l_i : 1666 mm
- l_o : 2876 mm

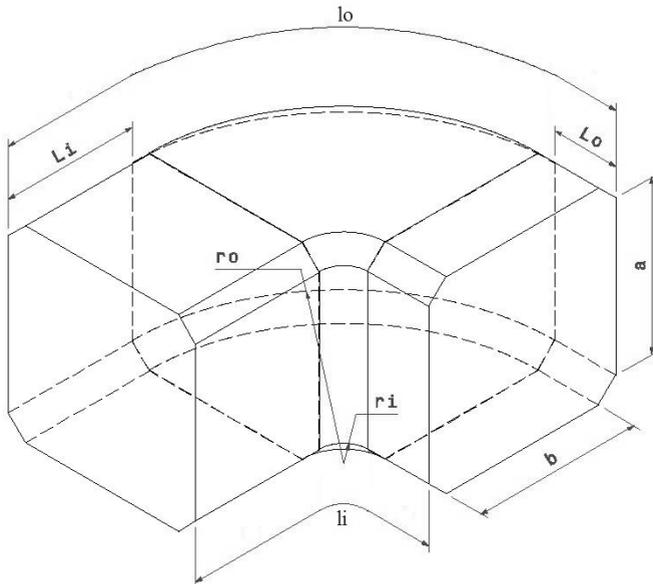


Gambar 3.2 Skema penelitian *octagonal elbow* besar 1



2. *Octagonal elbow* besar 2 (No. 10 pada skema instalasi *wind tunnel* gambar 3.1). Model uji ditunjukkan pada gambar 3.3 dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Bahan : Akrilik dan triplek
- Tebal : 6 mm
- L_i (panjang inlet *elbow*) : 509 mm
- L_o (panjang outlet *elbow*) : 250 mm
- r_i (*inner radius*) : 100 mm
- r_o (*outer radius*) : 870.5 mm
- rm (*mean radius*) : 485.2 mm
- a (tinggi) : 770.5 mm
- b (lebar) : 770.5 mm
- D_h (diameter hidrolik) : 806 mm
- l_i : 871 mm
- l_o : 2081 mm



Gambar 3.3 Skema penelitian *octagonal elbow* besar 2



3.2 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 tertentu. .

- *Wall pressure tap*

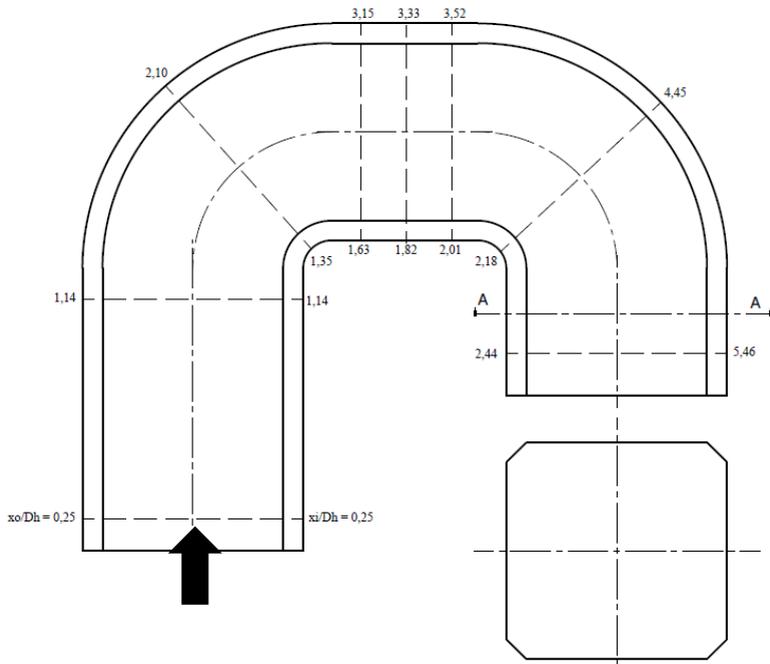
Wall pressure tap digunakan untuk mengukur tekanan statis, pemasangannya di sepanjang dinding lokasi pengukuran. *Pressure tap* berbentuk lubang-lubang kecil berdiameter 5 mm. Selain itu, *pressure tap*, juga dipasang pada sisi dinding atas *elbow*.

Jumlah *wall pressure tap* disesuaikan dengan kondisi tekanan pada setiap *section*. Posisi pengukuran *pressure tap* dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Posisi *pressure tap* pada *octagonal elbow 90°*

Section	Jarak tiap Pressure Tap (mm)		
	Inlet (upstream)	Elbow 90°	Outlet (downstream)
Inner Wall	150	50	100
Outer Wall	150	100	100

Untuk mengetahui profil kecepatan aliran, maka *test section (elbow)* dibagi menjadi 8 *section* yang akan dijadikan posisi peletakan *pitot tube*. Pada tabel 3.2 dan gambar 3.4 ditunjukkan beberapa lokasi yang akan diteliti untuk mendapatkan profil kecepatan.



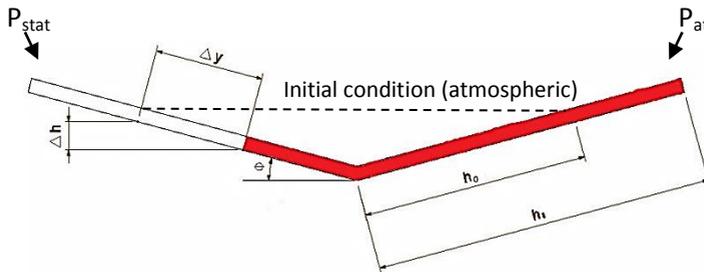
Gambar 3.4 Lokasi Perhitungan untuk Profil Kecepatan (No. 9 dan No. 10 pada skema instalasi *wind tunnel* gambar 3.1)

Tabel 3.2 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan

Section	x_i (mm)	x_o (mm)	x_i/D_h	x_o/D_h
1	200	200	0,25	0,25
2	910	910	1,14	1,14
3	1079	1684	1,35	2,10
4	1307	2517	1,63	3,15
5	1457	2667	1,82	3,33
6	1607	2817	2,01	3,52
7	1745	3560	2,18	4,45
8	1948	4369	2,44	5,46



- *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° yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan Δh . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Inclined manometer*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Red Oil* (SG = 0,82)
- Kemiringan : 10°
- *Thermometer*
Thermometer digunakan untuk mengukur temperatur udara di dalam ruangan.
- *Transducer* tekanan dan data akuisisi
Pressure transducer ini merupakan alat ukur digital, dimana alat ini mengukur arus untuk mengetahui tekanan. *Wall pressure tap* dan *Pitot tube* dihubungkan ke alat ini dan hasilnya berupa arus atau tegangan yang dibaca melalui data akuisisi. Oleh karena itu diperlukan validasi agar dapat diketahui tekanan. Berikut spesifikasinya :



1. Untuk mengukur intensitas turbulensi

Model	: PX65-05BDI
Range	: $\pm 3''$ WC = $\pm 746,52$ Pa
Akurasi	: 0.25 % FS (<i>Fullscale</i>)
Output	: 4 – 20 mA
Excitation	: 13 – 36 Vdc
Ser.no.	: 3030238423

2. Untuk mengukur C_p dan U/U_{max}

Model	: PX653-0.5O5V
Range	: $\pm 1''$ WC = $\pm 248,84$ Pa
Akurasi	: 0.25 % FS (<i>Fullscale</i>)
Output	: 1-5 VDC
Supply	: 13 – 36 Vdc
Ser.no.	: X13290059

3.3 Analisa Dimensi Parameter-Parameter yang Dianalisa

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu eksperimen. Metode analisa ini dikenal dengan *Buckingham Pi Theorem*. Berdasar gambar 3.2 dan gambar 3.3, parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran di dalam *elbow 90°* adalah sebagai berikut :

- Δp : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m^2)
- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- μ : viskositas absolut fluida ($kg/(m.s)$)
- U_{ref} : kecepatan *freestream* di *inlet elbow 90°* (m/s)
- u : kecepatan local (m/s)
- a : tinggi *cross section elbow 90°* (m)
- b : lebar *cross section elbow 90°* (m)
- r : posisi arah normal terhadap *streamline elbow 90°* (m)
- r_i : *inner radius* (m)



- r_o : outer radius (m)
 x_i : posisi searah *streamline* dinding dalam *elbow* 90° (m)
 x_o : posisi searah *streamline* dinding luar *elbow* 90° (m)
 l_i : panjang total *inner* searah *streamline* *elbow* 90° (m)
 l_o : panjang total *outer* searah *streamline* *elbow* 90° (m)
 D_h : diameter hidrolis saluran (m)
 L_i : panjang *inlet* *elbow* 90° (m)
 L_o : panjang *outlet* *elbow* 90° (m)

Dengan menganggap Δp dan u sebagai *dependent variable* maka dapat dituliskan persamaan 3.1 sebagai berikut:

$$\Delta p = f_1(\rho, \mu, b, a, r, r_i, r_o, x_i, x_o, l_i, l_o, L_i, L_o, U_{ref}, D_h) \quad (3.1)$$

$$u = f_2(\rho, \mu, b, a, r, r_i, r_o, x_i, x_o, l_i, l_o, L_i, L_o, U_{ref}, D_h)$$

Dari persamaan 3.1 didapatkan parameter berdimensi ($n = 16$) sebagai berikut :

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

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

Dipilih repeating parameter ($m = r = 3$) yang diperoleh dari parameter berdimensi ρ , U_{ref} dan D_h . Dari analisa dimensi akan diperoleh 13 grup tak berdimensi ($n-m = 16-3 = 13$) pada masing-masing *dependent variable* Δp dan u sebagai berikut:

- *Dependent variable* Δp

$$\begin{aligned}
 \Pi_1 &= \frac{\Delta p}{\rho \cdot U_{ref}^2}; \Pi_2 = \frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}; \Pi_3 = \frac{a}{D_h}; \Pi_4 = \frac{b}{D_h}; \Pi_5 = \frac{r}{D_h}; \\
 \Pi_6 &= \frac{r_i}{D_h}; \Pi_7 = \frac{r_o}{D_h}; \Pi_8 = \frac{x_o}{D_h}; \Pi_9 = \frac{x_i}{D_h}; \Pi_{10} = \frac{l_i}{D_h}; \Pi_{11} = \frac{l_o}{D_h}; \\
 \Pi_{12} &= \frac{L_i}{D_h}; \Pi_{13} = \frac{L_o}{D_h}
 \end{aligned} \quad (3.4)$$

- *Dependent variable* u

$$\begin{aligned}
 \Pi_{14} &= \frac{u}{U_{ref}}; \Pi_{15} = \frac{\mu}{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}; \Pi_{16} = \frac{a}{D_h}; \Pi_{17} = \frac{b}{D_h}; \Pi_{18} = \frac{r}{D_h}; \\
 \Pi_{19} &= \frac{r_i}{D_h}; \Pi_{20} = \frac{r_o}{D_h}; \Pi_{21} = \frac{x_o}{D_h}; \Pi_{22} = \frac{x_i}{D_h}; \Pi_{23} = \frac{l_i}{D_h}; \Pi_{24} = \\
 \frac{l_o}{D_h}; \Pi_{25} &= \frac{L_i}{D_h}; \Pi_{26} = \frac{L_o}{D_h}
 \end{aligned} \quad (3.5)$$



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:

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = f_1(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}) \quad (3.6)$$

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

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_2(\Pi_{15}, \Pi_{16}, \Pi_{17}, \Pi_{18}, \Pi_{19}, \Pi_{20}, \Pi_{21}, \Pi_{22}, \Pi_{23}, \Pi_{24}, \Pi_{25}, \Pi_{26}) \quad (3.8)$$

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

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

$$\left(\frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}\right) \quad (3.10)$$

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

- *Dependent variable* Δp

$$\Pi_{14} = \frac{\pi_6}{\pi_5} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{b}{D_h}} = \frac{r}{b} \quad (3.11)$$



$$\Pi_{15} = \frac{n_6}{n_5} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{r}{a}} = \frac{r}{a} \quad (3.12)$$

- *Dependent variable u*

$$\Pi_{27} = \frac{n_{20}}{n_{19}} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{r}{b}} = \frac{r}{b} \quad (3.13)$$

$$\Pi_{28} = \frac{n_{20}}{n_{19}} = \frac{\frac{r}{D_h}}{\frac{r}{a}} = \frac{r}{a} \quad (3.14)$$

Dari beberapa pertimbangan di atas maka persamaan 3.7 dan 3.9 dapat ditulis sesuai dengan persamaan 3.15 dan 3.16 sebagai berikut:

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = f_3 \left(\frac{x_i}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{r}{b}, \frac{r}{a}, R_{eD_h} \right) \quad (3.15)$$

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_4 \left(\frac{x_i}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{r}{b}, \frac{r}{a}, R_{eD_h} \right) \quad (3.16)$$

3.4 Langkah-langkah eksperimen

Beberapa tahap yang dilakukan pada penelitian adalah sebagai berikut:

3.4.1 Prosedur Validasi Data

Ada beberapa langkah validasi yang perlu dilakukan sebelum pengambilan data, yaitu

- Validasi tekanan dinamis

Berikut langkah kerja validasi data tekanan dinamis :

1. *Pitot static* dipasang pada manometer dan *transducer*
2. Fan diatur dari frekuensi 0-40 Hz dengan interval 5 Hz
3. Data diambil dari manometer dan *pressure transducer* untuk tekanan dinamik



4. Data manometer didapat Δh (mm) dan dari *transducer* didapatkan *voltage* (Volt)
 5. Data tersebut dibuat grafik Δh vs arus sehingga diketahui hubungan sebagai sebuah formula.
- Validasi tekanan statis di dinding
- Berikut langkah kerja validasi data tekanan statis pada dinding :

1. *Wall pressure tap* dipasang sepanjang dinding *elbow*
2. *Wall pressure tap* disambungkan pada manometer dan *transducer*
3. Fan diatur dari frekuensi 0-40 Hz dengan interval 5 Hz
4. Data diambil dari manometer dan *pressure transducer* untuk tekanan statis
5. Dari manometer didapatkan Δh (mm) dan dari *transducer* didapatkan *voltage* (Volt)
6. Data tersebut dibuat grafik Δh vs arus sehingga dapat diketahui hubungan sebagai sebuah formula.

3.4.2 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 telah ditentukan pada tabel 3.2.
 - c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan menggunakan selang kapiler.
-



- d) Posisi *pitot tube* diatur pada titik awal pengukuran pada jarak $x_o/l_o = 0,07$ dan pada jarak $r/b \approx 1$ artinya ujung *pitot tube* sebisa mungkin di dekatkan pada dinding *outer inlet*.
- e) *Blower* dimatikan
- f) Pengaturan bukaan *blower* sesuai kebutuhan.
- g) Arus dari *pressure transducer* pada tekanan stagnasi dicatat.
- h) *Pitot tube* digeser searah horisontal ke sisi dinding *inner ducting*.
- i) Mengulangi langkah e sampai f pada titik tekanan stagnasi yang telah ditentukan pada tabel 3.2.
- j) Posisi *pitot tube* diatur pada titik awal pengukuran pada jarak $x_o/l_o = 0,07$ dan pada jarak $r/a \approx 1$ artinya ujung *pitot tube* sebisa mungkin di dekatkan pada dinding *lower inlet*.
- k) *Pitot tube* digeser searah vertikal ke sisi dinding *upper ducting*.
- l) Mengulangi langkah e sampai f titik tekanan stagnasi yang telah ditentukan pada tabel 3.2.

Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:

- a) Persiapan *test section*.
- b) Penghubungan *pressure tap* yang sudah terpasang di dinding ke *pressure transducer* dengan selang kapiler.
- c) Pengaturan bukaan *blower* sesuai kecepatan *free stream* yang di-*set*.
- d) Data arus dari *pressure transducer* dicatat.
- e) Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* selanjutnya.
- f) Langkah c sampai f diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir di ujung *outlet elbow*.



3.4.3 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) : 806 mm
- Panjang *upstream* sampai *downstream*
 - a) Elbow besar 1
 - inner wall* (l_i) : 1666 mm
 - outer wall* (l_o) : 2876 mm
 - b) Elbow Besar 2
 - inner wall* (l_i) : 871 mm
 - outer wall* (l_o) : 2081 mm
- Sudut *inclined manometer* (φ) : 10°
- *Specific Gravity Red Oil* (SG_{redoil}) : 0,82
- Percepatan Gravitasi (g) : $9,81 \text{ m/s}^2$
- Temperatur ruangan (T) : 28°C
- Massa jenis udara $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{ud}) : $1,182 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas kinematis udara $T = 28^\circ\text{C}$ (ν): $1,59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Massa jenis air pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{H_2O}) : $996,4 \text{ kg/m}^3$

1) Perhitungan untuk bukaan *blower*

Pada eksperimen ini digunakan bilangan Reynolds yang didapat melalui persamaan 3.17 didapatkan kecepatan awal 5 m/s dan 9 m/s.

$$Re_{D_h} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.17)$$

dimana:

- ρ_{ud} : massa jenis udara
- ν : viskositas kinematis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$
- μ : 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 dan 9 m/s dilakukan pengaturan bukaan *blower* secara manual melalui pengukuran nilai Δh menggunakan persamaan 3.18 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 = SG_{redoil} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta h$$

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

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

$$\Delta y = \frac{\Delta h}{2 \cdot \sin \varphi} \quad (3.19)$$

Fan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *axial fan*, untuk mendapatkan kecepatan referensi (U_{ref}) sebesar 5 m/s dan 9 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:

$$C_p = \frac{P_{s,i} - P_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot U_{ref}^2} \quad (3.20)$$

dimana:

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



Perhitungan $P_{s,i}$ dan P_{ref} dilakukan sebagai berikut :

a) Perhitungan $P_{s,i}$

$$\Delta h = \Delta y \cdot \sin \varphi$$

$$P_{s,i} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h = SG_{redoil} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin \varphi$$

b) Perhitungan P_{ref}

$$\Delta h = \Delta y \cdot \sin \varphi$$

$$P_{ref} = \rho_{redoil} \cdot g \cdot \Delta h$$

Nilai Δh , Δy , dan sudut φ mengacu pada gambar 3.5

3) Perhitungan kecepatan lokal

Perhitungan profil kecepatan dari *inner wall* pada *elbow* dapat ditulis sesuai persamaan 3.21 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{ud}}} \quad (3.21)$$

dimana

- p_o : tekanan stagnasi
- p_s : tekanan statis
- ρ_{ud} : massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$
- $p_o - p_s$: tekanan dinamis

4) Perhitungan Pressure Drop (Δp)

Pressure drop adalah selisih tekanan *inlet* dan *outlet* pada *test section*. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir 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}) untuk *horizontal plane* pada masing-masing *Reynolds number*, $u/U_{ref} = f(x_i/D_h, r/b, Re_{Dh})$.
4. Grafik kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}) untuk *vertical plane* pada masing-masing *Reynolds number*, $u/U_{ref} = f(x_i/D_h, z/a, Re_{Dh})$.

3.5 Ringkasan langkah-langkah penelitian

Secara singkat prosedur penelitian eksperimen pada *octagonal elbow* dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Perumusan masalah dan studi pustaka
2. Perencanaan dan pembuatan instalasi
3. Pengambilan data
4. Pengolahan data yang meliputi :
 - a. $C_p = f(x_i/D_h, x_o/D_h, Re_{Dh})$
 - b. $u/U_{ref} = f(x_i/D_h, (r-r_i)/b, x_i/D_h, z/a, Re_{Dh})$
 - c. Intensitas turbulensi
5. Analisa data dan kesimpulan



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditampilkan data, grafik dan penjelasan dari hasil studi eksperimen. Hasil studi ditampilkan dan dibahas dalam beberapa sub bab meliputi *pressure coefficient* (C_p), profil kecepatan pada suatu penampang dan intensitas turbulensi. Studi eksperimen dilakukan pada bilangan *Reynolds* sebesar $2,57 \times 10^5$ dan $4,63 \times 10^5$ berdasar pada kecepatan *freestream* pada *inlet elbow* sebesar 5 m/s dan 9 m/s.

Hasil analisa pada *octagonal elbow 90°* difokuskan pada distribusi *wall pressure* (C_p), distribusi profil kecepatan pada delapan *section* dan derajat turbulensi.

4.1 Distribusi *Wall Pressure Coefficient* (C_p)

Tekanan statis pada dinding saluran dijelaskan dengan *pressure coefficient*, didefinisikan sebagai $C_p = (p - p_{ref}) / (\rho U^2 / 2)$, p_{ref} diambil pada $x_i / D_h = 0$. Pada gambar 4.1 dan 4.2 ditunjukkan hasil pengukuran *pressure coefficient* (C_p) pada *octagonal elbow 90°*. Pengukuran dilakukan pada *midspan*. Variabel x menyatakan posisi pengukuran searah *streamline* dan l adalah panjang total *inner/outer* searah *streamline elbow*.

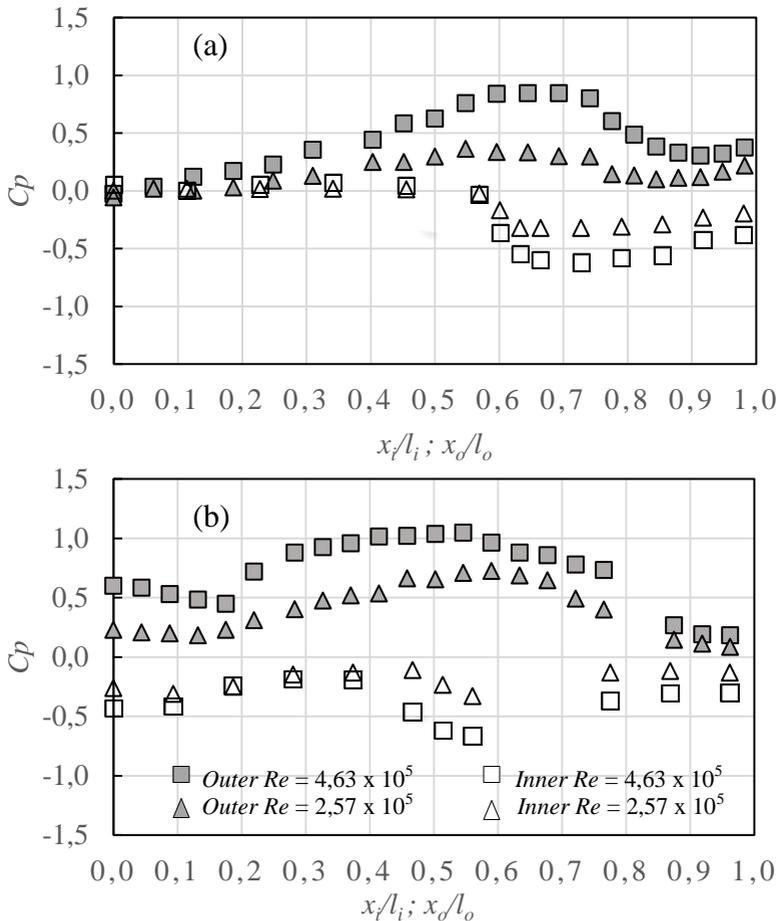
Gambar 4.1 (a) menunjukkan grafik distribusi C_p dari *octagonal elbow 90°* besar 1. Pada $x/l = 0$ sampai $x/l = 0,4$ nilai C_p antara sisi outer dan inner wall cenderung berhimpit dengan kata lain tidak ada perbedaan tekanan yang signifikan, hal ini mengindikasikan aliran udara pada sisi ini masih *uniform*. Pada sekitar $x/l = 0,5$ sampai $x/l = 0,75$ nilai C_p pada sisi outer bernilai positif dan nilai pada sisi inner negatif, menunjukkan perbedaan tekanan signifikan. Hal ini menunjukkan pada posisi ini aliran melewati *elbow* maka aliran tersebut akan mengalami fenomena seperti ketika aliran melewati *diffuser* dan *nozzle*. Aliran pada sisi *inner elbow* telah terjadi fenomena seperti pada *nozzle* dimana terjadi penurunan tekanan yang menandakan terjadinya kenaikan kecepatan. Pada sisi *outer* terjadi kenaikan



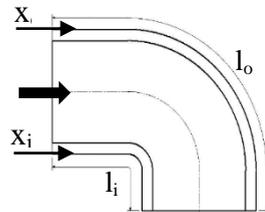
tekanan, dengan kata lain pada sudut tersebut terjadi penurunan kecepatan. Perbedaan tekanan inilah yang mengakibatkan terjadinya *secondary flow* dimana partikel fluida *outer wall* bergerak menuju *inner wall*. Fenomena inilah yang dapat menghambat laju aliran fluida.

Pada sekitar $x/l = 0,8$ sampai $x/l = 0,9$ di sisi *inner wall* terjadi kenaikan tekanan diikuti dengan penurunan kecepatan seperti yang terjadi pada *diffuser*. Sedangkan di sisi *outer wall* terjadi penurunan tekanan dimana pada kondisi tersebut juga terjadi kenaikan kecepatan. Pada posisi *outlet elbow* 1 profil aliran udara belum *recovery* hal ini bisa teramati pada $x/l = 1$ terjadi perbedaan nilai C_p *inner* dan *outer wall* yang lumayan signifikan yaitu sebesar 0,42 untuk $Re = 2,57 \times 10^5$ dan 0,75 untuk $Re = 4,63 \times 10^5$.

Pada gambar 4.1 (b) ditunjukkan grafik distribusi C_p dari *octagonal elbow* 2 dimana aliran fluida melawati *octagonal elbow* 1 dulu sebelum masuk ke *octagonal elbow* 2. Secara garis besar distribusi C_p pada dinding *inner* dan *outer* pada sisi *elbow* yaitu $x_o/l_o = 0,3$ sampai $0,75$ menunjukkan kesesuaian dengan teori, dimana tekanan pada sisi lengkungan luar lebih besar daripada tekanan pada sisi lengkungan dalam. Perbedaan tekanan pada lengkung luar dan dalam tersebut sebagai potensi terjadinya aliran sekunder didalam *elbow*. Namun, dikarenakan aliran fluida terlebih dahulu melalui *elbow* 1 sebelum masuk ke *elbow* 2 hal ini memicu pada peningkatan nilai C_p yang diakibatkan adanya separasi aliran dan pengaruh aliran sekunder dari *elbow* 1.



Gambar 4.1 Grafik distribusi C_p inner - outer wall octagonal elbow 1 (a) dan octagonal elbow 2 (b) pada $Re = 2,57 \times 10^5$ dan $Re = 4,63 \times 10^5$



42 *Tugas Akhir*
Konversi Energi

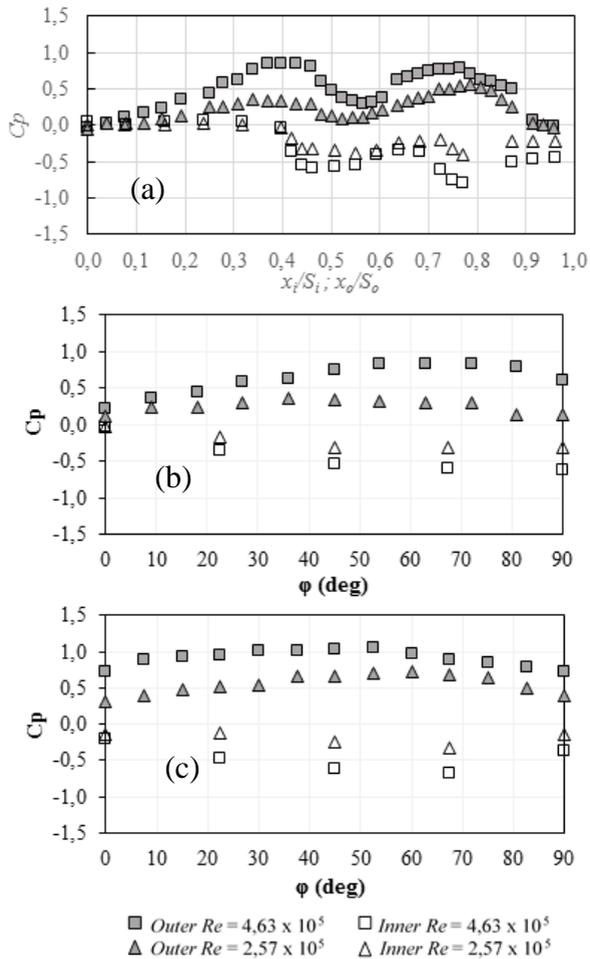


Selisih antara nilai C_p inner terendah dan nilai C_p outer tertinggi didefinisikan ΔC_p maksimum, gambar 4.2 (b) menunjukkan grafik C_p untuk *elbow* 1 dimana C_p inner terendah pada $\varphi = 67^\circ$ dan C_p outer tertinggi pada $\varphi = 63^\circ$. Gambar 4.2 (c) menunjukkan menunjukkan grafik C_p untuk *elbow* 2 dimana C_p inner terendah pada $\varphi = 67^\circ$ dan C_p outer tertinggi pada $\varphi = 53^\circ$. Hasil studi eksperimen dari ΔC_p disajikan pada tabel 4.1.

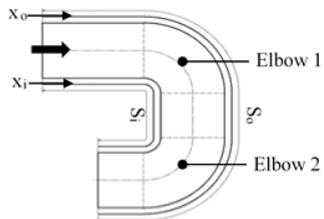
Tabel 4.1 Persentase peningkatan *wall pressure coefficient octagonal elbow* 90° besar 1 dan 2 pada $Re = 2,57 \times 10^5$ dan $Re = 4,63 \times 10^5$

<i>Re</i>	<i>Octagonal elbow 1</i>			<i>Octagonal elbow 2</i>			% <i>increase</i>
	C_p <i>Inner</i>	C_p <i>Outer</i>	ΔC_p	C_p <i>Inner</i>	C_p <i>Outer</i>	ΔC_p	
$2,57 \times 10^5$	-0,32	0,36	0,68	-0,33	0,73	1,06	54,6%
$4,63 \times 10^5$	-0,62	0,84	1,46	- 0,666	1,05	1,71	17%

Pada gambar 4.2 ditunjukkan grafik distribusi C_p dari *octagonal elbow* 1 sampai *octagonal elbow* 2, dari grafik ini didapatkan juga informasi nilai C_p sepanjang dua *octagonal elbow* 90° besar pada *closed loop wind tunnel*.



Gambar 4.2 Grafik distribusi
 (a) $C_p = f(x/S)$ test section
 (b) $C_p = f(\phi)$ octagonal elbow 1
 (c) $C_p = f(\phi)$ octagonal elbow 2





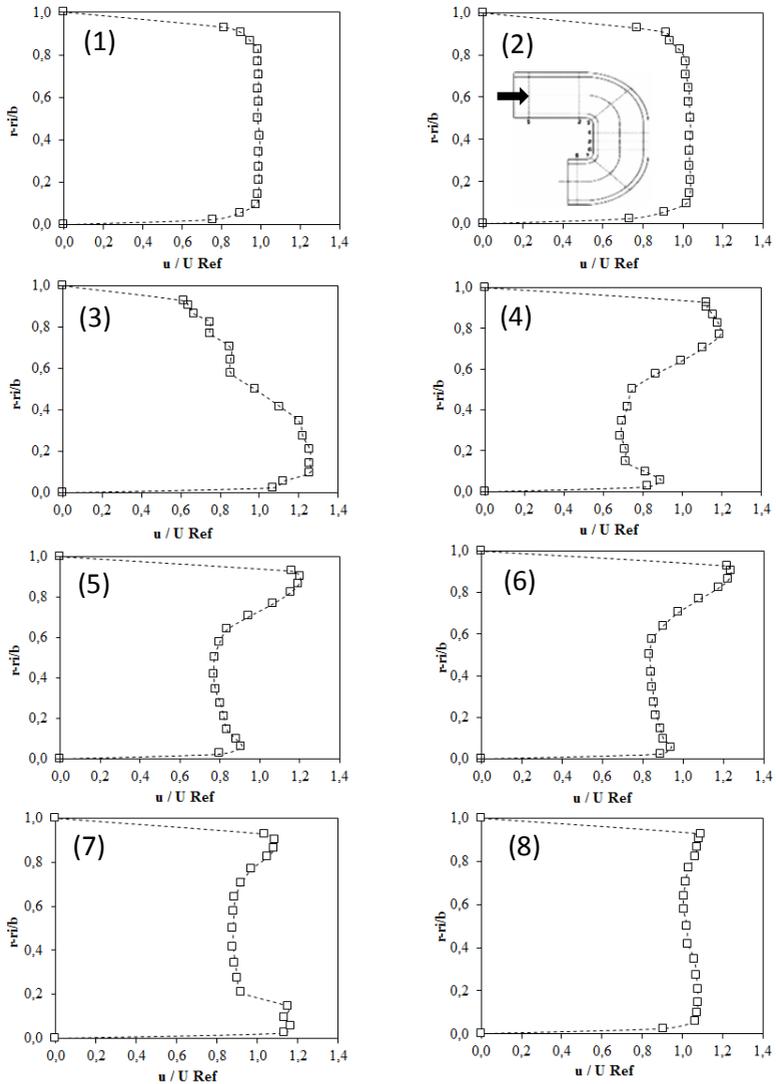
4.2 Distribusi Profil Kecepatan

Profil kecepatan ditampilkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}), dimana u adalah kecepatan lokal pada titik *section* tersebut yang didapatkan dari hasil perhitungan data yang didapat dari pengukuran menggunakan *pitot tube* dan U_{ref} merupakan kecepatan rata – rata masuk pada saluran *upstream* yang telah ditentukan, yaitu 5 m/s. Distribusi profil kecepatan disajikan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{ref}) terhadap fungsi posisi tak berdimensi ($r-r_i/b$) untuk bidang horizontal dan (z/a) untuk bidang vertikal . u adalah kecepatan lokal dan U_{ref} merupakan kecepatan pada *inlet elbow*. Selanjutnya r merupakan radius kelengkungan outer sedangkan r_i merupakan radius kelengkungan *inner* dimana $r-r_i/b = 0$ adalah sisi *inner wall*, $r-r_i/b = 1$ adalah sisi *outer wall*. z adalah titik pengambilan kecepatan aliran bidang vertikal dimana $z/a = 0$ adalah sisi *upper wall*, $z/b = 1$ adalah sisi *upper wall*. b adalah lebar penampang *elbow* dan a sebagai tinggi penampang *elbow*. Pengukuran profil kecepatan dilakukan pada nilai $Re = 4,63 \times 10^5$ atau setara dengan 9 m/s, baik pada bidang horizontal maupun vertikal.

4.2.1 Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$

Gambar 4.3 menunjukkan distribusi profil kecepatan pada bidang horizontal untuk beberapa lokasi pada saluran yang dikaji pada $Re = 4,63 \times 10^5$ atau setara dengan 9 m/s pada *inlet upstream duct*.

Profil kecepatan bidang horizontal terdiri dari data 8 *section* yaitu : $x_i/D_h = 0.25$, $x_i/D_h = 1.14$, $x_i/D_h = 1.35$, $x_i/D_h = 1.63$, $x_i/D_h = 1.82$, $x_i/D_h = 2.01$, $x_i/D_h = 2.18$ dan $x_i/D_h = 2.54$. Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari *inner wall* sampai *outer wall*.



Gambar 4.3 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal setiap *section* pada *octagonal elbow* 90° dengan $Re = 4,63 \times 10^5$.



Perkembangan profil kecepatan bidang horizontal didalam *octagonal elbow* ditunjukkan pada gambar 4.3 dan korelasinya dengan distrisbusi koefisien tekanan statis ditunjukkan gambar 4.2. Pada *section 1* dan *section 2* menunjukkan profil yang masih *uniform*, pada $x/S = 0 - 0,3$ nilai C_p antara sisi *outer* dan *inner wall* cenderung berhimpit.

Pada *section 3* terlihat bahwa kecepatan maksimum aliran berada pada sisi *inner* hal ini dikarenakan aliran berada pada daerah *favorable pressure gradient*. Aliran pada daerah *inner wall* ini akan mengalami penurunan tekanan hal ini bisa diamati distribusi C_p di $x/S = 0,4 - 0,5$ dan aliran fluida akan mengalami percepatan yang ditunjukan kecepatan maksimum berada pada sisi *inner*. Berbeda dengan sisi *outer* yang merupakan daerah *adverse pressure gradient* dimana aliran mengalami perlambatan dan terjadi peningkatan tekanan hal ini bisa diamati distribusi C_p di $x/S = 0,4 - 0,5$.

Pada *section 4*, *section 5* dan *section 6* terjadi defleksi lokasi kecepatan dimana terjadi pergeseran kecepatan maksimum dari sisi *inner* ke sisi *outer* karena pada sisi *outer* berada pada daerah *favorable pressure gradient* dan sisi *inner* dan *adverse pressure gradient*. Gambar 4.2 menunjukkan tekan statis pada sisi *inner* ($x/S = 0,5 - 0,6$) meningkat sedangkan pada sisi *outer wall* menurun. Fakta ini diperkuat oleh visualisasi aliran fluida pada gambar 2.9 yang dilakukan Cheng (1993) dimana separasi aliran fluida di dalam *circular elbow* terjadi pada sisi *inner* dan sisi *outer elbow*. Pada sisi *inner wall* separasi masih teramati sampai di sisi *outlet elbow* sedang sisi *outer wall* tidak teramati separasi lagi. Besarnya daerah *separation* terutama pada sisi *inner wall* menurunkan momentum aliran disisi *inner wall* dan menyebabkan aliran mengalami perlambatan sedangkan sisi *outer wall* mengalami percepatan.

Pada *section 7* teramati kecepatan maksimum aliran berada pada sisi *inner* hal ini dikarenakan aliran berada pada daerah *favorable pressure gradient* hal ini ditunjukkan gambar 4.2 dimana tekanan statis menurun pada $x/S = 0,6 - 0,76$. Pada sisi



outer kecepatan aliran lumayan tinggi jika dibanding kecepatan aliran sisi *outer* pada *elbow* 1. Ini disebabkan oleh aliran masih terpengaruh adanya defleksi kecepatan pada sisi *outer* setelah melalui *elbow* 1.

Pada *section* 8 teramati profil kecepatan *uniform*, pada $x/S = 0,85 - 0,95$ nilai C_p antara sisi *outer* dan *inner wall* cenderung berhimpit. Fenomena ini disebabkan aliran melewati *honeycomb* dimana salah satu fungsinya adalah penyearah aliran. Pada *section* ini aliran tidak terpengaruh dengan adanya instalasi *elbow* 2.

4.2.2 Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$

Gambar 4.4 menunjukkan distribusi profil kecepatan pada bidang vertikal untuk data 8 *section* yaitu : $x_i/D_h = 0.25$, $x_i/D_h = 1.14$, $x_i/D_h = 1.35$, $x_i/D_h = 1.63$, $x_i/D_h = 1.82$, $x_i/D_h = 2.01$, $x_i/D_h = 2.18$ dan $x_i/D_h = 2.54$. Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari *lower wall* sampai *upper wall* dan dikaji pada $Re = 4,63 \times 10^5$ atau setara dengan 9 m/s pada *inlet upstream duct*.

Perkembangan profil kecepatan bidang horizontal didalam *octagonal elbow* ditunjukkan pada gambar 4.3 dan korelasinya dengan distrisbusi koefisien tekanan statis ditunjukkan gambar 4.2.

Pada *section* 1 dan *section* 2 menunjukkan profil yang masih *uniform*. Pada kondisi profil kecepatan *uniform*, pada $x/S = 0 - 0,3$ nilai C_p antara sisi *outer* dan *inner wall* cenderung berhimpit. Pengaruh dari *wall shear stress* sebagai akibat adanya gesekan antara fluida dengan *solid surface* masih sangat kecil.

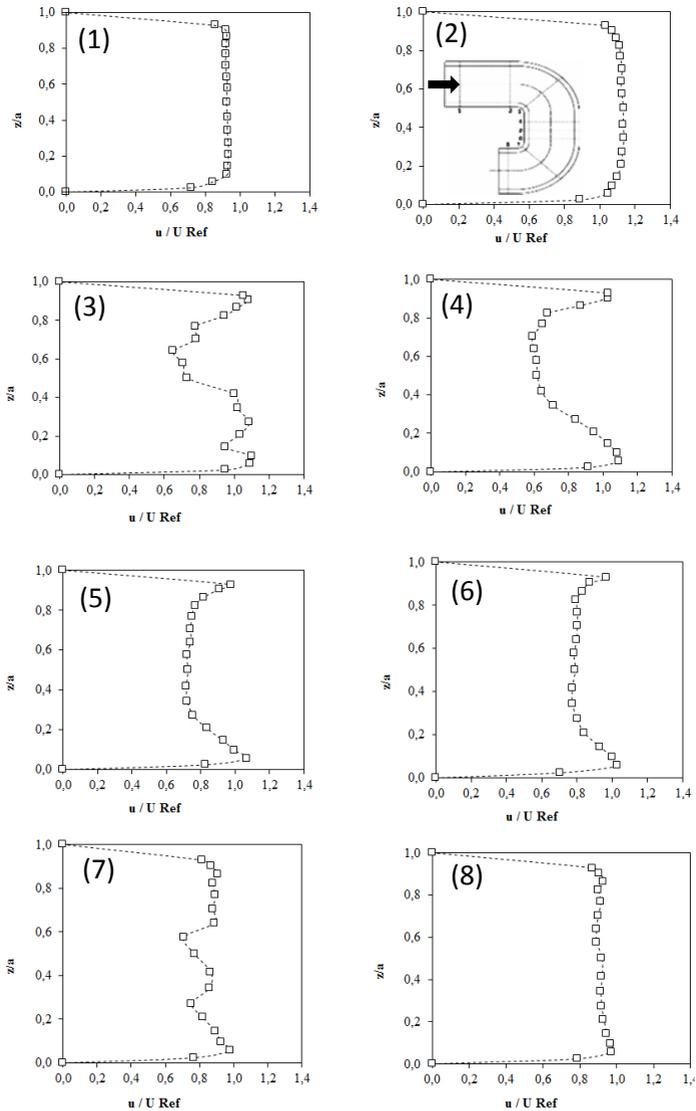
Pada *section* 3 profil kecepatan pada sekitar $z/a = 0,4$ sampai 0,8 mengalami kecepatan rendah dibanding pada sisi *inlet upstream* sebagai akibat adanya fenomena *secondary flow*, aliran sekunder terjadi karena adanya perbedaan besar tekanan statis *inner* dan *outer wall* pada $x/S = 0,45$.



Pada *section 4*, *section 5* dan *section 6* terjadi kecepatan yang lebih besar pada sisi *upper* maupun sisi *lower* dibanding kecepatan pada sisi *inlet upstream duct* dan didaerah sekitar $z/a = 0,2$ sampai $0,8$ berkecepatan rendah daripada kecepatan pada sisi *inlet upstream duct*. Hal tersebut terjadi karena adanya *secondary flow* sebagai akibat aliran melalui *elbow 1*, aliran sekunder terjadi karena adanya perbedaan tekanan statis *inner* dan *outer wall* pada $x/S = 0,5 - 0,6$ (*straight duct*).

Pada *section 7* aliran memasuki *elbow 2*, gambar 4.4 (7) menunjukkan adanya kecepatan rendah ($z/a = 0,2 - 0,8$) dibanding pada sisi *inlet upstream* sebagai akibat adanya fenomena *secondary flow*, aliran sekunder terjadi karena adanya perbedaan besar tekanan statis *inner* dan *outer wall* pada $x/S = 0,75$.

Pada *section 8* teramati profil kecepatan *uniform*, pada $x/S = 0,85 - 0,95$ nilai C_p antara sisi *outer* dan *inner wall* cenderung berhimpit. Fenomena ini disebabkan aliran melewati *honeycomb* dimana salah satu fungsinya adalah penyearah aliran. Pada *section* ini aliran tidak terpengaruh dengan adanya instalasi *elbow 2*.



Gambar 4.4 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal setiap *section* pada *octagonal elbow* 90° dengan $Re = 4,63 \times 10^5$.



4.3 Intensitas Turbulensi dan Profil Intensitas Turbulensi

4.3.1 Intensitas Turbulensi

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran intensitas turbulensi pada *outlet octagonal elbow 2* di *closed-loop wind tunnel* untuk mengetahui fluktuasi kecepatan aliran. Setelah melalui dua buah *octagonal elbow 2* dimana ouletnya dipasang *honeycomb*. Fungsi dari *honeycomb* ini adalah untuk penyearah aliran serta mengurangi derajat turbulensi.

Intensitas turbulensi dihitung menggunakan persamaan 2.9. Untuk menghitung intensitas turbulensi pada *outlet octagonal elbow* besar pada posisi *centerline* yang pertama yaitu pengambilan data menggunakan *pressure transducer* dan DAQ Pro yang dihubungkan dengan laptop. Pengambilan data dilakukan pada *output elbow 2* pada $x_i/D_h = 2,54$. Kemudian dilakukan pengolahan data pada setiap variasi Re hingga didapatkan grafik kecepatan (U_n) terhadap waktu (t).

Dari data tabel 4.2 dapat diketahui bahwa intensitas turbulensi pada *outlet octagonal elbow 2* pada $Re_{Dh} = 2,57 \times 10^5$ dan $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$ dapat digolongkan rendah. Rendahnya intensitas turbulensi pada *outlet elbow 2* dipengaruhi oleh adanya *honeycomb*. Intensitas turbulensi ideal pada *test section* sebuah *wind tunnel* yang didesain dengan baik mempunyai nilai intensitas turbulensi sebesar 1% (Munson et al., 2005).

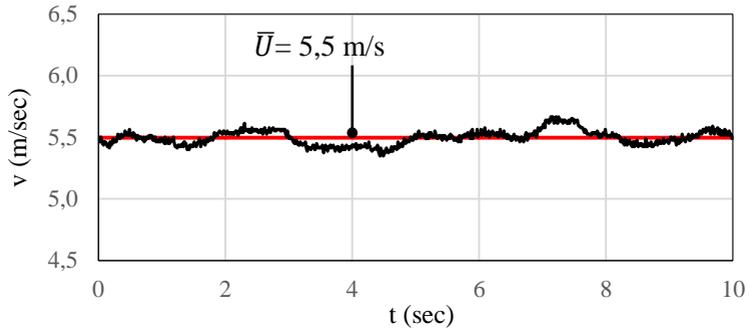
Tabel 4.2. Perbandingan intensitas turbulensi pada setiap variasi Re

Bilangan Reynolds	U_{avg} (m/s)	IT (%)
$2,57 \times 10^5$	5,50	1,1
$4,63 \times 10^5$	9,15	1,8

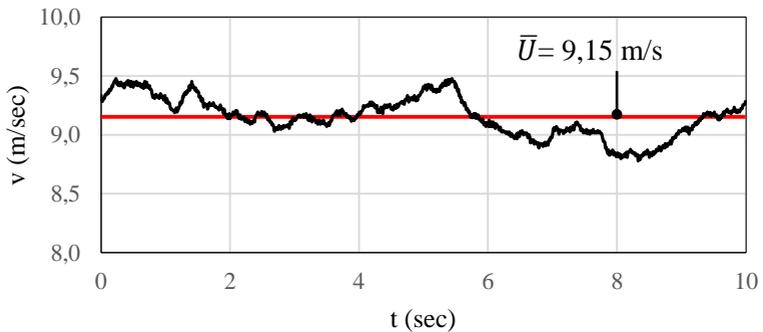
Gambar 4.5 menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara yang melewati *outlet octagonal elbow* besar selalu berfluktuasi terhadap waktu disetiap bilangan Reynolds. Intensitas turbulensi diperoleh dengan membagi standar deviasi fluktuasi kecepatan



(u') dengan kecepatan rata-rata (\bar{U}). Grafik pada gambar 4.5 menunjukkan perbedaan (\bar{U}).



(a)



(b)

— Kecepatan rata-rata — Fluktuasi Kecepatan

Gambar 4.5 Sinyal fluktuasi kecepatan aliran udara pada (a) $Re_{Dh} = 2,57 \times 10^5$; (b) $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$ pada *centerline elbow*.

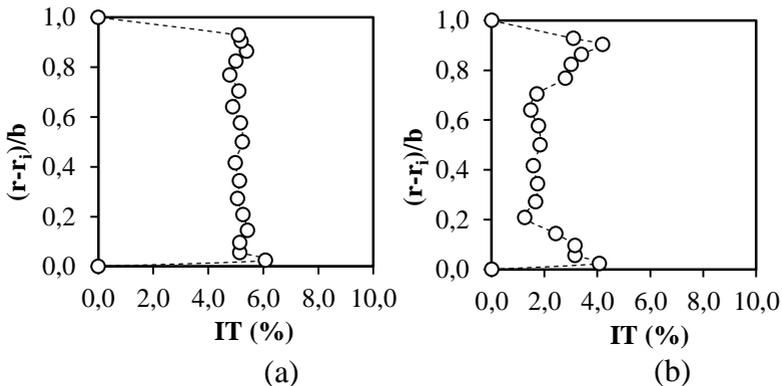


4.3.2 Profil Intensitas Turbulensi

Gambar 4.6 (a) dan (b) menunjukkan profil intensitas turbulensi pada bidang horizontal. Pengukuran diambil pada $x_i/D_h = 0.25$ (*inlet upstream*) dan $x_i/D_h = 2.54$ (*oulet elbow 2*) dan dikaji pada $Re = 4,63 \times 10^5$ atau setara dengan 9 m/s pada *inlet upstream duct*, tujuan pengukuran ini untuk mengamati perubahan profil intensitas turbulensi sebelum memasuki instalasi *elbow 1* dan setelah keluar dari *elbow 2*, dimana pada sisi *oulet elbow 2* dipasang instalasi *honeycomb*.

Gambar 4.6 (a) menunjukkan profil intensitas turbulensi pada $x_i/D_h = 0.25$, teramati profil intensitas turbulensi relatif konstan disekitar 5 persen sepanjang sisi *inner* sampai sisi *outer wall*.

Pada $x_i/D_h = 2.54$, profil intensitas turbulensi posisi sesaat keluar dari *honeycomb* ditunjukkan pada Gambar 4.6 (b). Dalam profil ini kita dapat melihat bahwa intensitas turbulensi sebesar 1,8% di pusat profil [$(r-r_i)/b = 0,5$] dan berkisar 4 % di daerah *inner* dan *outer wall*. Rendahnya nilai intensitas pada section ini dipengaruhi oleh adanya instalasi *honeycomb*.



Gambar 4.6 Profil intensitas turbulensi bidang horizontal pada $Re_{Dh} = 4,63 \times 10^5$ (a) posisi $x_i/D_h = 0.25$; (b) posisi $x_i/D_h = 2.54$.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis pada penelitian mengenai karakteristik aliran fluida melalui *large octagonal elbow* pada *closed-loop subsonic wind tunnel* dengan *Re_{Dh}* = $2,57 \times 10^5$ dan *Re_{Dh}* = $4,63 \times 10^5$ dengan metode eksperimen, dapat dirumuskan beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Distribusi *C_p* pada *elbow* 1 dan *elbow* 2 menunjukkan tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar daripada tekanan pada sisi *inner wall*. Hal ini sebagai potensi terjadinya aliran sekunder didalam *elbow* 1 maupun *elbow* 2.
2. Terjadi peningkatan nilai *C_p* *elbow* 2 yang diakibatkan adanya separasi aliran dan pengaruh aliran sekunder dari *elbow* 1 yang belum sepenuhnya hilang. Peningkatan ΔC_p pada *elbow* 2 sebesar 54,62 % dari ΔC_p *elbow* 1 pada *Re* = $2,57 \times 10^5$ dan sebesar 17,01% pada *Re* = $4,63 \times 10^5$.
3. Profil kecepatan bidang horizontal pada *section* 4 ($x_i/D_h = 1.63$), *section* 5 ($x_i/D_h = 1.82$) dan *section* 6 ($x_i/D_h = 2.01$) terjadi defleksi lokasi kecepatan dari dinding *inner* menuju dinding *outer*. Pada profil kecepatan bidang vertikal pada *section* 4, *section* 5 dan *section* 6 terjadi kecepatan yang lebih besar baik pada sisi *upper* maupun sisi *lower* daripada kecepatan pada sisi *inlet upstream*, dan terjadi *backflow* disekitar $z/a = 0,4$ sampai 0,8. Profil kecepatan bidang horizontal dan vetikal pada *section* 8 ($x_i/D_h = 2.54$) teramati *uniform*.
4. Intensitas turbulensi pada *outlet octagonal elbow* 2 ($x_i/D_h = 2.54$) pada *Re_{Dh}* = 2.57×10^5 sebesar 1,08 % dan pada *Re_{Dh}* = $4,63 \times 10^5$ sebesar 1,83 % dapat digolongkan rendah.



5. Profil intensitas turbulensi pada $x/D_h = 0.25$, profil intensitas turbulensi relatif konstan disekitar 5 % sepanjang sisi *inner* sampai sisi *outer wall*. Pada $x/D_h = 2.54$, profil intensitas turbulensi posisi sesaat keluar dari *honeycomb* sebesar 1,8 % di pusat profil [($r-r_i/b$) = 0,5] dan berkisar 4 % di daerah *inner* dan *outer wall*.

5.2 Saran

Adapun saran yang diperlukan untuk kedepannya adalah sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan keakuratan data kuantitatif dan kualitatif pada saat pengambilan data diperlukan peralatan yang berkualitas baik dan terkalibrasi secara berkala.
2. Temperatur ruangan yang stabil harus dikontrol agar data yang diperoleh baik.
3. Diperlukan adanya kajian eksperimen ataupun numerik tentang reduksi intensitas turbulensi oleh instalasi *honeycomb* pada *closed-loop subsonic wind tunnel*.



DAFTAR PUSAKA

- Cheng, D. Y. 1993. Laminar Flow Elbow System and Method. U.S. Patent Document, No. US5197509 A.**
- Danbon, F. & Sollicc, C. 2000. **Aerodynamic Torque of Butterfly Valve-Influence of an Elbow on The Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque.** J. Fluids Engineering, vol. 122, p. 337-344.
- Hakim, Amir. 2008. **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.
- Hernandez, Miguel A Gonzales. 2013. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel.** Science Direct. Spanyol.
- Kulkarni, S., Minor, M., Deaver, M., Pardyjak, E., Hollerbach, J. 2012. **Design, Sensing, and Control of A Scaled Wind Tunnel For Atmospheric Display.** IEEE/ASME Trans. Mechatron. 17(4), 635–645.
- Miller, Donald S. 1990. **Internal Flow System (Second edition).** BHRA (Information Service), United Kingdom.
- Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodore H. 2005. Mekanika Fluida (Edisi Keempat, Jilid 2). Surabaya: Penerbit Erlangga.**
- Naibaho, Romi D. K. 2015. Studi Eksperimen Aliran Melalui Octagonal Elbow Dilengkapi Dengan Guide Vane Pada Closed Loop Wind Tunnel.** Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin. FTI-ITS. Surabaya.



- Njock Libii, Josué. 2011. **Wind Tunnels in Engineering Education, Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research** (Prof. Jorge Colman Lerner, Ed). InTech. Croatia.
- Pritchard, P. 2011. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics (Eighth edition)**, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Sutardi dan Puti S. 2012. Karakteristik Tekanan Dan Aliran Sekunder Di Dalam Rectangular Elbow 90°. Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin, vol. 7, p. 144 – 119.**
- Sutardi, Wawan A.W., Ibnu Affan, Iswati dan Sutrisno. 2010. **Experimental Study on The Effect of Guide Vane Insertion and Reynolds Numbers on The Flow Pressure Drop in a 90° Rectangular Elbow**. Journal. Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya.
- Wagtendonk, W. 2003. *Meteorology for Professional Pilots***. Bay of Plenty, New Zealand: Aviation Theory Centre (NZ) Ltd.

Biodata Penulis



Penulis dilahirkan di Sumenep, Jawa timur, 20 Januari 1993, merupakan anak kedua dari 5 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Lenteng Timur I, SMPN 1 Lenteng, dan SMAN 1 Sumenep. Setelah lulus SMA pada tahun 2011, penulis diterima di Jurusan D-III Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang. Di tahun 2015 diterima di S1 Teknik Mesin ITS di program Lintas Jalur. Penulis sangat berharap agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta bagi penulis sendiri. Apabila pembaca ingin berkorespondensi dengan penulis, dapat melalui Email/HP : **khairulfaizin@yahoo.com / 085331869705**