



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI SALURAN
UDARA BERPENAMPANG BUJUR SANGKAR YANG
DIPENGARUHI LETAK *SQUARE DISTURBANCE
BODY (SDB)* PADA *UPSTREAM DUCT***

RIZKY AKBAR FAUZI
NRP 2112 100 055

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

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



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI
SALURAN UDARA BERPENAMPANG BUJUR
SANGKAR YANG DIPENGARUHI LETAK
SQUARE DISTURBANCE BODY (SDB) PADA
*UPSTREAM DUCT***

RIZKY AKBAR FAUZI
NRP. 2112100055

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

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



FINAL PROJECT - TM141585

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION FLOW
THROUGH SQUARE DUCT EFFECTED BY
DISTANCE OF SQUARE DISTURBANCE BODY
(SDB) AT UPSTREAM DUCT**

RIZKY AKBAR FAUZI
NRP. 2112100055

Advisory Lecturer
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

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

**STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI SALURAN
UDARA BERPENAMPANG BUJUR SANGKAR YANG
DIPENGARUHI LETAK *SQUARE DISTURBANCE BODY*
(SDB) PADA *UPSTREAM DUCT***

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:

RIZKY AKBAR FAUZI

Nrp. 2112 100 055

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD. (Penguji 1)
NIP. 196412281990031002
3. Vivien Suphandani, ST., ME., PhD. (Penguji 2)
NIP. 198105292003122001
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., PhD. (Penguji 3)
NIP. 132309758

**SURABAYA
JULI, 2017**

**STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI
SALURAN UDARA BERPENAMPANG BUJUR
SANGKAR YANG DIPENGARUHI LETAK *SQUARE
DISTURBANCE BODY (SDB)* PADA *UPSTREAM
DUCT***

Nama Mahasiswa : Rizky Akbar Fauzi
NRP : 2112 100 055
Departemen : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

Abstrak

Instalasi saluran udara menggunakan pipa lurus dan fitting perpipaan. Fitting perpipaan digunakan untuk mengalirkan udara ke lokasi-lokasi yang diinginkan, salah satu contohnya adalah elbow 90°. Meskipun dapat mengalirkan udara ke lokasi yang diinginkan, namun elbow 90° juga membuat pressure drop pada instalasi saluran udara semakin besar yang diakibatkan oleh adanya friction loss, separation loss, dan secondary flow yang terjadi setelah melewati aksesoris tersebut. Pressure drop yang besar tersebut mengakibatkan kerugian energi pada instalasi saluran udara tersebut semakin besar. Salah satu usaha untuk mengurangi pressure drop yang terjadi di dalam elbow 90° adalah menambahkan sebuah bodi pengganggu (Square Disturbance Body) yang ditempatkan pada posisi tertentu.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan model saluran berpenampang bujur sangkar (square duct) dengan $D_h = 125$ mm yang terdiri dari : upstream duct (straight duct) dengan panjang $7D_h$, Square Disturbance Body (SDB) dengan $d = 12,5$ mm, elbow 90° dengan $R/D_h = 2$, dan dilengkapi downstream duct (straight duct) dengan panjang $15D_h$, serta induced draft fan. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan pitot static tube, inclined manometer, dan pressure transducer. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak $0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dengan Re_{D_h} sebesar $8,74 \times 10^4$ untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang

downstream duct, pressure drop antara downstream duct dan upstream duct, serta pressure drop elbow 90° antara inlet elbow 90° dan outlet elbow 90° dengan dan tanpa menggunakan Square Disturbance Body berupa nilai pressure coefficient, minor loss coefficient elbow 90° pada variasi nilai Re_{Dh} sebesar $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 1,3,5 \times 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s).

Hasil penelitian ini diperoleh bahwa penempatan SDB efektif menurunkan pressure drop dan mengurangi blockage area. Penempatan SDB pada saluran dengan jarak $l = 0,5D_h$ merupakan jarak paling optimal untuk meningkatkan intensitas turbulensi dan menurunkan pressure drop, dimana penurunan nilai rata-rata pressure drop sebesar 13,2%. Sedangkan pada variasi SDB ($l = 0,1D_h$) justru mengalami peningkatan pressure drop sebesar 24,8%. Penambahan SDB sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai minor loss coefficient elbow 90° yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan SDB. Dimana pada variasi SDB ($l = 0,1D_h$) memiliki nilai rata-rata minor loss coefficient elbow 90° sebesar 0,24. Sementara variasi SDB ($l = 0,5D_h$) memiliki rata-rata nilai minor loss coefficient elbow 90° paling rendah sebesar 0,04. Pada bidang horizontal dan vertikal menunjukkan bahwa dengan penambahan SDB, profil kecepatan pada section 1 - 6 memiliki bentuk yang berbeda dibanding tanpa SDB, sementara pada section 12 - 14 semua variasi menunjukkan bentuk profil kecepatan yang mirip.. Pada sisi inner, terjadi perlambatan aliran karena adanya backflow yang ditimbulkan oleh separasi aliran. Penambahan SDB dapat menyebabkan penundaan separasi aliran karena shear layer yang dihasilkan SDB memberikan momentum aliran yang lebih kuat untuk melawan adverse pressure.

Kata kunci: Pressure Drop, Square Disturbance Body, Square Elbow 90°

EXPERIMENTAL INVESTIGATION FLOW THROUGH SQUARE DUCT EFFECTED BY DISTANCE OF SQUARE DISTURBANCE BODY (SDB) AT UPSTREAM DUCT

Name : Rizky Akbar Fauzi
NRP : 2112 100 055
Department : Mechanical Engineering FTI – ITS
Advisor : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

Abstract

Air duct installation is consist of straight duct and fittings. Fittings are used to stream the air to desired location, for example is elbow 90°. Elbow 90° can stream the air, but will increase pressure drop due to friction loss, separation loss, and secondary flow. Pressure drop can increase the total amount of energy consumption by the installation and the fan, so that the air duct installation construction should be optimized in order to reduce the loss of energy. One of the method to reduce pressure drop in the elbow 90° is by placing a square disturbance body (SDB) at a specific position in the air duct.

The experiment use a model square duct with diameter (D_h) 125 mm. The air duct consist of upstream duct with a $7D_h$ length, SDB with $d = 12.5$ mm, elbow 90° with a curvature ratio (R/D_h) 2, downstream duct with a $15D_h$ length, and centrifugal fan. Measurement parameters use pitot static tube, inclined manometer, and pressure transducer. SDB is placed with distance variant (l/D_h) = 0.1 – 0.5 from the inlet elbow 90°. Measurement velocity profile and turbulence intensity downstream duct on the vertical and horizontal positions use the Reynolds number (Re_{D_h}) $8,74 \times 10^4$. Measurement coefficient pressure elbow 90° use Re_{D_h} $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, and $1,35 \times 10^5$. Measurement pressure drop square duct and loss coefficient elbow 90° use Re_{D_h} of $3,97 \times 10^4 \leq Re_{D_h} \leq 1,35 \times 10^5$ (air speed of 5 m/s to 17 m/s with the increase in speed of 1 m/s).

The results showed that the addition of SDB, effective to reduce pressure drop and blockage area. The addition of SDB with $l/D_h = 0.5$ is the most optimal result to reduce pressure drop, where the percentage is 13.2%. While the least optimal result is SDB with $l/D_h = 0.1$, where it actually increase the pressure drop by 24,8%. Minor loss coefficient of elbow 90° with addition of SDB is smaller than without SDB. SDB with $l/D_h = 0,1$ has a minor loss coefficient elbow 90° mean value of 0,24. While the SDB with $l/D_h = 0,5$ has the smallest minor loss coefficient elbow 90° mean value of 0,04. Horizontal and vertical velocity profile showed that with the addition of SDB at section 1 – 6 has a different profile than without SDB, however at section 12 – 14 has a similar velocity profile. SDB can form a shear layer that has a higher turbulence intensity to resist adverse pressure or delay flow separation due to the curvature ratio of the inner elbow 90° .

Keyword: Pressure Drop, Square Disturbance Body, Square Elbow 90°

KATA PENGANTAR



Alhamdulillahirobbil alaamiin, segala puji bagi Allah Azza Wa Jalla atas nikmat berupa akal dan fikiran yang dapat didaya gunakan, sehingga Tugas Akhir dalam segenap beban kuliah untuk memperoleh gelar sarjana dari salah satu kampus terbaik di Indonesia yaitu Departemen Teknik Mesin - Institut Teknologi Sepuluh Nopember ini dapat diselesaikan oleh penulis. Laporan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna mengingat penulis hanyalah manusia biasa yang bersifat dasar lupa. Untuk itu saran dari para pembaca yang terhormat sangat penulis harapkan sebagai bahan evaluasi agar menjadi pribadi yang lebih baik.

Rasanya penyusunan tugas akhir ini tidak akan pernah selesai kalau bukan karena bantuan orang-orang yang telah digerakkan hatinya oleh Allah untuk membantu penulis. Untuk itu penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih, yang pertama kepada Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar selalu memberikan bimbingan dan petunjuk dalam penulisan tugas akhir ini. Kedua kepada Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD., Vivien Suphandani, ST., ME., PhD., dan Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., PhD. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik dalam pengerjaan tugas akhir ini. Ketiga kepada Pak Sutisno selaku karyawan Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida yang telah membantu proses pengambilan data tugas akhir ini. Tidak lupa kepada segenap dosen, karyawan, dan civitas akademika Departemen Teknik Mesin FTI ITS atas ilmu dan pengalaman yang berharga yang telah diberikan.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada teman-teman angkatan M55 yang selalu kebersamai, memotivasi, dan memberikan memori untuk dikenang selama kurang lebih 5 tahun ini. Kemudian teman-teman Kabinet Berani BEM ITS 2015/2016 yang telah mengisi tahun ke-4 penulis dengan bersama-sama

berjuang demi kehidupan kemahasiswaan ITS yang lebih baik. Teman-teman Forum Indonesia Muda yang telah mengajarkan arti kekeluargaan se-Indonesia, KANS Jatim yang telah menjadi tempat pulang disaat kepenatan akan rutinitas harian, dan kepada orang-orang yang InsyaAllah menjadi saudara sampai surga, Rumah Kepemimpinan - Heroboyo 7 semoga kita senantiasa menjadi manusia yang mampu membuat Indonesia menjadi lebih baik dan bermartabat.

Terakhir kepada Ayah, Ibu, Rizky Fauziah, Rizky Dhahifa Wahyuni, Rizky Muhammad Fajar, dan Rizky Saifullah Fathan dirumah, terima kasih telah menjadi dan akan selalau menjadi motivasi terbesar penulis dalam menjalani kehidupan, semoga kita dikumpulkan lagi dalam Jannah-Nya Allah Azza Wa Jalla.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

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

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 <i>Fluid As Continum</i>	9
2.2 Saluran Udara	10
2.3 Aliran <i>Viscous</i>	11
2.4 Karakteristik Aliran Melalui Saluran	13
2.4.1 Aliran Laminar	13
2.4.2 Aliran Transisi	13
2.4.3 Aliran Turbulen	14
2.4.4 Aliran Berkembang Penuh (<i>Fully Developed Flow</i>)	15
2.4.5 <i>Separation Flow</i> Pada <i>Elbow 90°</i>	16
2.4.6 <i>Secondary Flow</i> Pada <i>Elbow 90°</i>	16
2.5 Persamaan Euler Dalam Koordinat <i>Streamline</i>	17
2.6 Tekanan Stagnasi, Tekanan Statis, dan Tekanan Dinamis .	19
2.7 <i>Pressure Coefficient</i>	20
2.8 <i>Head Loss</i>	21
2.8.1 <i>Head Loss Mayor</i>	22
2.8.2 <i>Head Loss Minor</i>	23

2.9 Intensitas Turbulensi	23
2.10 Penelitian Terdahulu	24
2.10.1 Penelitian Rup dan Sarna (2015).....	24
2.10.2 Penelitian Dutta dan Nandi (2015).....	26
2.10.3 Penelitian Samani dan Bergstrom	28
2.10.4 Penelitian Ozgoren (2005).....	31
2.10.5 Penelitian Hardian (2017).....	34

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Skema Penelitian	37
3.2 Peralatan Pendukung	38
3.2.1 <i>Square Duct</i>	38
3.2.2 <i>Centrifugal Fan</i>	40
3.2.3 <i>Honey Comb, Screen, dan Nozzle</i>	40
3.2.4 <i>Square Disturbance Body</i>	40
3.2.5 Alat Ukur.....	41
3.3 Analisis Dimensi Parameter – Parameter yang Dianalisis ..	44
3.3.1 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk <i>Pressure Drop</i> pada <i>Square Duct</i>	45
3.3.2 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Kecepatan pada <i>Square Duct</i>	46
3.4 Langkah – Langkah Validasi	48
3.4.1 Validasi Tekanan Dinamis	48
3.4.2 Validasi Tekanan Statis.....	49
3.5 Prosedur Pengambilan Data.....	50
3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif	50
3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif.....	51
3.6 Urutan Langkah Pengambilan Data.....	56
3.7 Gambar Peralatan Penelitian.....	57

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 <i>Pressure Drop</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,35 \times 10^5$	61
4.2 <i>Minor Loss Coefficient Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,35 \times 10^5$	66

4.3	<i>Pressure Coefficient Elbow 90° pada Square Duct dengan Reynolds Number $8,74 \times 10^4$</i>	68
4.4	Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada bagian <i>Upstream</i> dan <i>Downstream</i> dengan $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$	71
4.4.1	Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal bagian <i>Upstream</i>	72
4.4.2	Profil Kecepatan Bidang Horizontal bagian <i>Downstream</i>	72
4.4.3	Profil Kecepatan Bidang Vertikal bagian <i>Downstream</i>	76
4.5	Intensitas Turbulensi Bidang Horizontal pada <i>Outlet Elbow 90°</i> dengan <i>Reynolds Number $8,74 \times 10^4$</i>	79
4.6	Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i>	83

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan Hasil Penelitian	87
5.2	Saran	88

DAFTAR PUSTAKA	89
-----------------------------	----

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition).....	9
Gambar 2.2	Macam – macam bentuk <i>ducting</i> (a) <i>Circular Tube</i> (b) <i>Square Duct</i> (c) <i>Rectangular Duct</i>	10
Gambar 2.3	Ilustrasi aliran melintasi silinder sirkular, (a) <i>inviscid</i> dan (b) <i>viscous</i> (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition).....	12
Gambar 2.4	Lapis batas dengan <i>adverse pressure gradient</i> (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition).....	12
Gambar 2.5	Aliran Laminar	13
Gambar 2.6	Aliran Transisi	13
Gambar 2.7	Aliran Turbulen	14
Gambar 2.8	Profil kecepatan untuk aliran di dalam saluran..	15
Gambar 2.9	Terjadinya separasi aliran pada dinding <i>Elbow 90°</i>	16
Gambar 2.10	Terjadinya <i>secondary flow</i> pada <i>Elbow 90°</i> (Miller, 1990).....	17
Gambar 2.11	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition).....	18
Gambar 2.12	Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis (Fox dan Mc. Donald, 8 th edition).....	19
Gambar 2.13	a) Posisi pengambilan data pada <i>domain</i> uji b) Mesh pada <i>Volume</i> . (Rup dan Sarna, 2011)	24
Gambar 2.14	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ (Rup dan Sarna, 2011)	25
Gambar 2.15	Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen. (Rup dan Sarna, 2011).....	26
Gambar 2.16	Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya (Dutta dan Nandi, 2015).....	27

Gambar 2.17	<i>Velocity profile</i> pada sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° dengan variasi <i>curvature ratio</i> ($R_c/D = 1 - 5$) (Dutta dan Nandi, 2015)	27
Gambar 2.18	Domain aliran dan grid simulasi (Samani, 2015)	28
Gambar 2.19	Profil kecepatan rata-rata pada daerah gap, (a) U_1 untuk $g/D = 1$, (b) U_3 untuk $g/D = 1$, (c) U_1 untuk $g/D = 0.5$, (d) U_3 untuk $g/D = 0.5$, koordinat x diukur dari <i>leading edge</i> (Samani, 2015).....	29
Gambar 2.20	Efek dari gap terhadap struktur aliran (a dan b) untuk $g/D = \infty$, (c dan d) untuk $g/D = 1$, (e dan f) untuk $g/D = 0.5$, (g dan h) untuk $g/D = 0$, (Samani, 2015).....	30
Gambar 2.21	Skema penelitian dan pendefinisian parameter dari <i>square cylinder</i> (Ozgoren, 2005).....	32
Gambar 2.22	Perbandingan struktur aliran secara <i>time-average</i> pada $Re = 550$ (atas) dan $Re = 3400$ (bawah) (Ozgoren, 2005).....	32
Gambar 2.23	Grafik <i>streamwise velocity</i> u (mm/s) terhadap waktu, dan Strouhal Number pada $Re = 3400$ untuk bodi CC, SC, dan OSC (Ozgoren, 2005) .	33
Gambar 2.24	Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakkan <i>Inlet Disturbance Body</i> (Hardian, 2017)	34
Gambar 2.25	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow</i> 90° (Hardian, 2017)	35
Gambar 2.26	Koefisien <i>Loss Elbow</i> 90° pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow</i> 90° (Hardian, 2017).....	36
Gambar 3.1	Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakkan SDB	38
Gambar 3.2	Model uji penelitian	39
Gambar 3.3	<i>Square Disturbance Body</i>	41
Gambar 3.4	Skema pemasangan <i>wall pressure tap</i> dan <i>pitot tube</i>	42

Gambar 3.5	Skema pemasangan <i>wall pressure tap</i> dan <i>pitot tube</i>	43
Gambar 3.6	<i>Inclined Manometer</i>	44
Gambar 3.7	Skema validasi tekanan dinamis <i>pressure transduser 1" WC</i>	48
Gambar 3.8	Grafik hasil validasi tekanan dinamis transduser 1" WC.....	49
Gambar 3.9	Skema validasi tekanan statis <i>pressure transduser 3" WC</i>	50
Gambar 3.10	Grafik hasil validasi tekanan statis <i>pressure transduser 3" WC</i>	50
Gambar 3.11	Lokasi perhitungan untuk <i>pressure drop</i>	55
Gambar 4.1	Grafik <i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow 90°</i> dengan variasi jarak peletakan <i>square disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$	62
Gambar 4.2	Grafik <i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> (a) titik 1 – 2; (b) titik 2 – 3; (c) titik 3 – 4; dengan variasi jarak peletakan <i>square disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$	65
Gambar 4.3	Grafik <i>Minor Loss Coefficient elbow 90°</i> dengan variasi jarak peletakan <i>square disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$	66
Gambar 4.4	Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> pada <i>Square Elbow 90°</i> dengan variasi jarak peletakan <i>square disturbance body</i> terhadap Re_{Dh} $8,74 \times 10^4$	69
Gambar 4.5	Grafik profil kecepatan (a) bidang horizontal bagian <i>upstream</i> (b) bidang vertikal bagian <i>upstream</i>	72
Gambar 4.6	Profil kecepatan bidang horizontal sepanjang <i>downstream</i> pada masing-masing posisi <i>cross-section</i> (a) Tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); (c) SDB ($l = 0,5D_h$)	75
Gambar 4.7	Profil kecepatan bidang vertikal sepanjang <i>downstream</i> pada masing-masing posisi <i>cross-</i>	

	<i>section</i> (a) Tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); (c) SDB ($l = 0,5D_h$)	78
Gambar 4.8	Intensitas Turbulensi (IT) bidang horizontal pada <i>outlet elbow</i> 90° ($x/D_h=0$).....	80
Gambar 4.9	Fluktuasi kecepatan bidang horizontal posisi $x/D_h = 0$ dan $z/D_h = 0,024$ pada variasi (a) tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); dan (c) SDB ($l = 0,5D_h$)....	82
Gambar 4.10	Perbandingan profil kecepatan dengan penelitian terdahulu	83
Gambar 4.11	Perbandingan <i>pressure coefficient</i> dengan penelitian terdahulu.....	85

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Urutan Langkah Pengambilan Data.....	56
Tabel 3.2	Peralatan penelitian.....	57

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dikota-kota besar diseluruh dunia banyak kita jumpai gedung-gedung pencakar langit yang dibangun dan difungsikan untuk berbagai macam keperluan. Begitu juga di Indonesia, di kota besar seperti Jakarta dan Surabaya gedung-gedung pencakar langit difungsikan sebagai pusat perkantoran, hotel, apartemen, dan lain-lain. Gedung-gedung pencakar langit ini membutuhkan total energi yang besar untuk operasionalnya sehari-hari. Konsumsi energi oleh gedung-gedung ini menyangkut banyak hal, **Deng dan Burnett (1998)** melakukan penelitian tentang rata-rata penggunaan energi di 16 hotel yang di Hong Kong, dan hasilnya adalah konsumsi energi pada gedung-gedung ini digunakan antara lain 32% untuk sistem pengondisian udara, 28% untuk non-electrical, 23% untuk kebutuhan khusus penyewa, 12% untuk sistem penerangan, dan 5% untuk sistem lift dan escalator. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa yang memakan energi paling besar adalah sistem pengondisian udara (*Air Conditioning*), dimana pada gedung-gedung semacam ini menggunakan AC central yang menggunakan sistem perpipaan (*rectangular duct*) untuk menyalurkan dan mensirkulasikan udara panas dan dingin. Sistem perpipaan seperti ini pasti memiliki kerugian energi terutama diakibatkan *fitting* perpipaan yang digunakan untuk menyalurkan udara ke lokasi-lokasi yang diinginkan, misalnya ke lantai paling atas. Untuk meningkatkan efisiensi pada gedung-gedung ini maka kerugian energi harus mampu diatasi dengan membuat rekayasa, misalnya pada *Elbow 90* yang merupakan salah satu *fitting* perpipaan, dengan begitu biaya operasional untuk kebutuhan energi gedung-gedung ini dapat dihemat.

Elbow 90° merupakan salah satu *fitting* perpipaan yang berfungsi untuk membelokkan aliran agar aliran dapat mengalir ke arah yang diinginkan. Seperti pada *fitting* perpipaan yang lain, aliran udara yang melalui *elbow 90°* mengalami *pressure drop*

yang lebih besar dibandingkan dengan aliran yang melalui saluran udara lurus dengan kecepatan *freestream* yang sama. Karena *pressure drop* yang besar tersebut maka kerugian energi (*head loss*) pada *elbow 90°* juga semakin besar, sehingga daya yang dibutuhkan untuk mengalirkan udara pada alat penyalur udara seperti *blower* dan *compressor* menjadi semakin besar. *Pressure drop* pada *elbow 90°* disebabkan oleh beberapa fenomena aliran yang terjadi didalamnya. Pertama adalah jari-jari kelengkungan *elbow 90°*. Kedua adalah *friction loss* yang disebabkan oleh gesekan antara udara dan dinding saluran *elbow 90°*. Ketiga adalah separasi aliran yang terjadi, separasi aliran ini terbagi menjadi dua, yaitu *separation loss* (secara 2D) dan *secondary flow* (secara 3D). *Separation loss* terjadi karena aliran fluida yang masuk ke dalam *elbow 90°* mengalami perubahan arah sehingga momentum aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure gradient*, akhirnya aliran akan berbalik arah (*back flow*) dari aliran utama. *Secondary flow* terjadi akibat dari perbedaan distribusi tekanan pada *inner wall elbow 90°* (sisi yang memiliki radius kecil) dan *outer wall elbow 90°* (sisi yang memiliki radius besar), tekanan pada *sisi outer wall* lebih besar dari pada sisi *inner wall*, sehingga partikel fluida bergerak menuju sisi *inner wall*. Pada bagian *corner*, *secondary flow* ini mengakibatkan penyumbatan aliran (*blockage effect*) sehingga area efektif yang mampu dilalui udara (*effective flow area*) menjadi berkurang. Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi di dalam *elbow 90°* adalah menambahkan sebuah bodi pengganggu berbentuk kotak (*Square Disturbance Body*) sebelum *inlet elbow 90°*. Penambahan *Square Disturbance Body* ini bertujuan untuk menunda *separation point* dan membuat aliran memiliki intensitas turbulensi yang kuat. Intesitas turbulensi yang semakin kuat menyebabkan momentum aliran juga semakin kuat sehingga mampu melawan *adverse pressure gradient*. Selain itu juga dapat mengurangi gaya hambat (*drag force*) pada suatu konfigurasi lingkaran silindris (seperti penampang *elbow 90°*). Dengan berkurangnya *drag force*, akan

terjadi penurunan pada *head loss minor* sehingga nilai *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin mengecil.

Beberapa penelitian tentang aliran melalui body pengganggu berbentuk kotak (*square*) dan aliran melalui penampang *rectangular duct* dengan *elbow 90°* telah dilakukan, beberapa diantaranya adalah sebagai berikut. **Rup dan Sarna (2011)** melakukan penelitian yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct* dengan *elbow 90°*. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada $Re = 40000$ yang memiliki ukuran geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$. Hasil yang diharapkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow 90°*. Kemudian didapatkan bahwa hasil simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow 90°* pada lokasi $\phi = 30^\circ$ dan 60° serta perbedaan profil kecepatan yang cukup signifikan pada lokasi $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh III* ($V_k = 1034\ 775$). Selain itu, didapatkan koefisien tekanan maksimum pada dinding *elbow 90°* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$).

Penelitian tentang body pengganggu kotak (*square*) dilakukan oleh **Ozgoren (2005)**. Ozgoren melakukan penelitian dengan menggunakan teknik *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV). Penelitian ini bertujuan untuk melihat karakteristik aliran melalui body *circular cylinder* (CC), *sharp-edge square cylinder* (SC), dan *45° oriented square cylinder* (OSC). Penelitian dilakukan menggunakan *closed-loop free-surface water channel* dengan tebal (W) = 1000 mm, panjang (L) = 8000 mm, dan tinggi (H) = 750 mm. *Reynolds number* pada penelitian ini divariasikan mulai dari 550 sampai 3400, *Square Cylinder* (SC) memiliki dimensi 800 x 20 x 20 dan diletakan pada bagian tengah *channel*

tegak lurus W. Dari penelitian ini didapatkan hasil fluktuasi kecepatan terhadap waktu, SC memiliki fluktuasi yang lebih besar dari pada CC, dengan nilai maksimum untuk SC sekitar 200 mm/s dan minimum sampai -100 mm/s, sementara untuk CC nilai maksimum sekitar 200 dan minimum sekitar 0. Hal ini menunjukkan bahwa aliran yang melalui bodi SS lebih turbulen dibanding CC. **Samani dan Bergstrom (2015)** melakukan penelitian untuk menginvestigasi pengaruh dinding pada struktur wake dari square cylinder yang diletakan dekat dinding. Penelitian dilakukan dengan metode simulasi numeric dan menggunakan teknik *Large Eddy Simulation* serta *Proper Orthogonal Decomposition*. Tiga variasi *gap ratio* adalah $g/D = 0, 0.5, \text{ dan } 1$, Reynolds number yang digunakan adalah $Re = 500$, Square Cylinder diletakan pada $6D$ dari inlet dan $11D$ dari outlet tunnel. Fenomena yang terjadi adalah untuk semua variasi *gap* separasi aliran terjadi pada daerah *leading edge*, hal ini disebabkan oleh bentuk geometri *square cylinder*, kemudian terdapat daerah secondary resirkulasi pada bagian bawah diantara *square cylinder* dan dinding.

Hardian (2017) melakukan eksperimen dengan model saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*): *upstream duct* (*straight duct*, *Inlet Disturbance Body (IDB)* berbentuk silinder dengan $D = 12,5 \text{ mm}$, *elbow* 90° , dan *downstream duct* (*straight duct*). Pengujian dilakukan dengan variasi jarak $l/D_h = 0,1 - 0,5$; *gap* konstan $g/D = 0,2$; dan $R/D_h = 1,5$, variasi nilai Re_{D_h} sebesar $3,97 \times 10^4 < Re_{D_h} < 13,5 \times 10^4$. Hasil dari penelitian ini adalah bahwa penempatan *IDB* efektif untuk proses *recovery* aliran dan menanggulangi timbulnya *secondary flow*. Penempatan *IDB* pada saluran dengan jarak $l = 0,1D_h$ merupakan jarak paling efektif untuk meningkatkan intensitas turbulensi dan menurunkan *pressure drop*, dimana pada sisi *inner outlet elbow* 90° memiliki intensitas turbulensi tertinggi yaitu sebesar 30,92%. Saluran dengan *IDB* $l = 0,1D_h$ juga memiliki *pressure drop* terendah dengan persentase penurunan nilai *pressure drop* sebesar 17,68% terhadap saluran tanpa *IDB*.

Berdasarkan penjelasan tentang fenomena aliran yang terjadi pada *elbow 90°* dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dapat diperkirakan bahwa dengan adanya penambahan *Square Disturbance Body* akan mampu meningkatkan momentum aliran, mengurangi *head loss minor*, dan mengurangi *pressure drop*. Penelitian sebelumnya telah dilakukan dengan penambahan *inlet disturbance body* berbentuk silinder, dengan variasi jarak peletakan IDB sebelum *inlet elbow 90°* dan *gap* IDB terhadap *inner wall* tetap. Penelitian tentang *Square Disturbance Body* kali ini dilakukan dengan tujuan memberikan informasi yang lebih lengkap tentang karakteristik aliran pada *elbow 90°* dengan variasi jarak peletakan SDB sebelum *inlet elbow 90°* dan *gap* SDB terhadap *inner wall* tetap.

1.2 Rumusan Masalah

Aliran yang melalui sebuah body pengganggu berbentuk kotak dengan *gap* terhadap *wall* tetap, memiliki intensitas turbulensi yang lebih besar dibandingkan aliran *freestream* dibagian depan sebelum melalui pengganggu tersebut. Intensitas turbulensi yang tinggi tersebut diharapkan mampu memberikan agitasi kepada *boundary layer* aliran yang melintasi dinding dengan saluran melengkung (*elbow 90°*), sehingga aliran memiliki momentum yang lebih tinggi dan mampu melawan *adverse pressure gradient* dan *wall shear stress*.

Pada penelitian kali ini *Square Disturbance Body* (SDB) diletakkan sebelum memasuki (*inlet*) *elbow 90°*, sehingga aliran dengan intensitas turbulensi yang kuat akan *attach* pada sisi *inner elbow 90°* dengan sudut kelengkungan yang tepat. Apabila peletakan SDB sebelum *inlet elbow 90°* tidak tepat, maka aliran yang *attach* pada sisi *inner elbow 90°* tidak memiliki intensitas turbulensi yang cukup kuat karena aliran turbulen tersebut mengalami *recovery* lebih dahulu, sehingga *pressure drop* yang berhasil diturunkan tidak lebih besar dari pada peletakan SDB dengan posisi yang tepat. Oleh karena itu, untuk mengetahui jarak peletakan yang tepat, pada penelitian kali ini SDB akan

divariasikan dengan jarak peletakan sebelum *inlet elbow 90°* sebesar $0,1D_h$ sampai dengan $0,5D_h$ dan *gap* antara SDB dengan dinding sisi *inner* tetap.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini berfungsi agar pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar dari tujuan awal. Berikut adalah batasan masalah yang digunakan:

1. Fluida kerja adalah udara dengan profil kecepatan *uniform* pada sisi *inlet upstream*, serta bersifat *incompressible*, *viscous*, dan *steady*.
2. Perpindahan panas akibat gesekan fluida dan dinding saluran diabaikan.
3. Kekasaran dinding diabaikan.
4. Aliran yang melintasi saluran udara merupakan aliran turbulen.
5. Studi eksperimen menggunakan bilangan Reynolds pada saluran *upstream* sebesar $Re_{Dh}=8,74 \times 10^4$ untuk mengukur profil kecepatan dan intensitas turbulensi, serta dengan jarak bilangan Reynolds $3,95 \times 10^4 < Re_{Dh} < 1,35 \times 10^5$ untuk mengukur *pressure drop*.
6. Temperatur fluida diasumsikan konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Studi eksperimental dilakukan untuk menganalisa karakteristik aliran yang dipengaruhi oleh *Square Disturbance Body* (SDB) dan *Elbow 90°* ($R/D_h=2$) pada saluran berpenampang bujur sangkar (*square duct*). Penelitian ini berfokus pada variasi jarak SDB yang diletakan pada *inner upstream duct* untuk menganalisa karakteristik aliran sepanjang *downstream straight duct*. Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui *pressure drop* sepanjang saluran udara (antara *inlet duct* dan *outlet duct*).
2. Mengetahui *minor loss coefficient elbow 90°*.

3. Mengetahui nilai *pressure coefficient* (C_p) pada dinding sisi *inner* dan *outer Elbow 90°*.
4. Mengetahui profil kecepatan pada *upstream* dan *downstream duct* (posisi bidang *horizontal* dan *vertikal*).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* instalasi saluran udara antara *downstream duct* dan *upstream duct* yang dipasang *Square Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Square Disturbance Body*.
2. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* serta *coefficient loss minor elbow 90°* yang dipasang *Square Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Square Disturbance Body*.
3. Memberikan gambaran tentang perbedaan profil kecepatan aliran pada *downstream duct* yang melewati suatu saluran berpenampang *square* dan *elbow 90°* yang dipasang *Square Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Square Disturbance Body*.

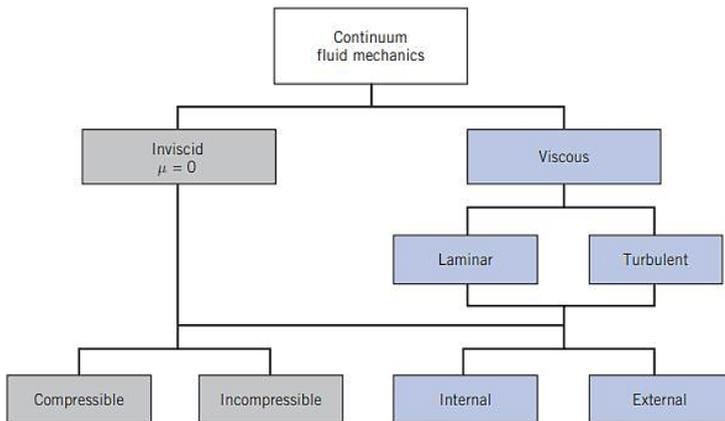
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan serta dilengkapi pula dengan referensi mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang telah dilakukan.

2.1 *Fluid As Continuum*

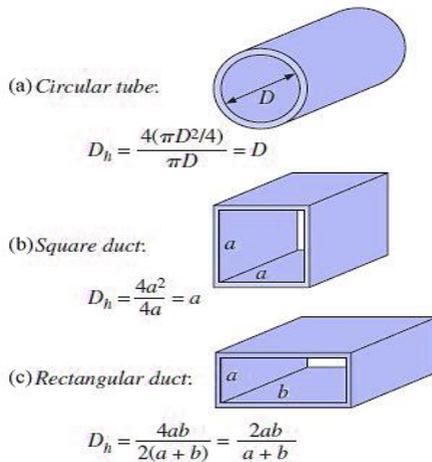
Karena sulitnya menganalisa partikel cairan secara mikroskopis, maka dilakukan pendekatan secara makroskopis dengan anggapan sudah cukup memadai, ini berarti kita harus mengansumsikan fluida yang “*continuum*”, sebagai konsekuensinya bahwa seluruh *properties* fluida merupakan suatu fungsi dari kedudukan dan waktu.



Gambar 2.1 Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 8th Edition)

2.2 Saluran Udara

Secara umum *ducting* merupakan suatu benda yang berbentuk *square*/kotak dan spiral atau *round* yang berfungsi sebagai media untuk mendistribusikan fluida yang bersifat udara dari suatu tempat ke tempat lain. *Ducting* juga bisa diartikan suatu benda kotak atau spiral yang berfungsi untuk mensirkulasikan sejumlah udara dari suatu ruangan dengan bantuan *fan unit/blower*, serta *AC central* dengan menggunakan sistem resirkulasi (*return air*).



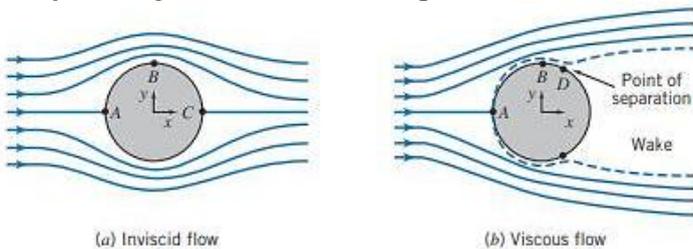
Gambar 2.2 Macam – macam bentuk *ducting* (a) *Circular Tube*
(b) *Square Duct* (c) *Rectangular Duct*

Selain itu, terdapat berbagai macam fungsi *ducting* dalam kehidupan sehari – hari, antara lain sebagai *supply* udara dingin ke ruang yang dikondisikan (*supply air*), *ducting* yang berfungsi sebagai *supply* dari udara luar (*fresh air*) dan ada pula *ducting* yang berfungsi untuk membuang udara dari dalam ke luar (*exhaust air*) secara fisik bentuk *ducting supply air* ini berinsulasi karena untuk mempertahankan udara dingin yang didistribusikan tidak terbuang, sedangkan untuk *ducting fresh air* dan *exhaust air* ini tidak menggunakan insulasi, lapisan dari insulasi ini antara lain :

Glasswool, Alumunium Foil, Spindle pin/ pengikat/ tali/ flinkote. Sedangkan untuk lapisan *ducting* didekat unit *AC Indoor* (untuk sistem *AC Split*) atau Unit *Air Handling Unit* (sistem *central*) biasanya bagian dalamnya menggunakan *Glasswool* dan *glassclotch*, untuk meredam bunyi bising dari unit. Bahan yang digunakan untuk *ducting* itu sendiri bermacam-macam, ada yang terbuat dari bahan *PVC, mild steel, BJLS* (baja lapis seng), *PU (Polyurethane)*, untuk *ducting* yang terbuat dari bahan *PU* tidak perlu menggunakan lapisan luar karena lapisannya sudah tersedia dari pabrikan hanya untuk lapisan dalamnya saja yang terdapat didekat unit menggunakan *glassclotch*.

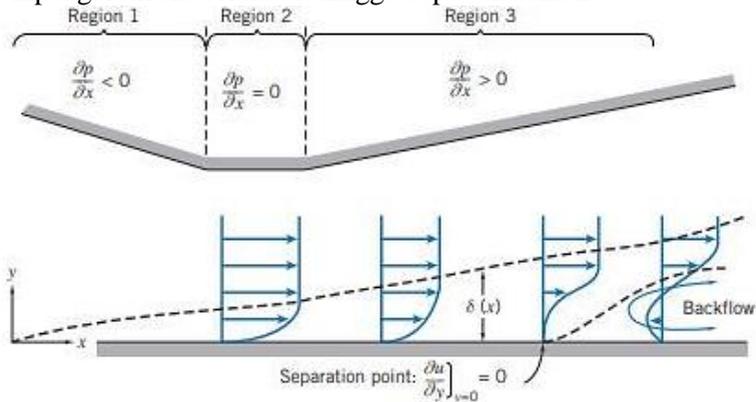
2.3 Aliran Viscous

Aliran *viscous* merupakan aliran yang dipengaruhi oleh viskositas fluida. Viskositas fluida mempengaruhi aliran udara karena fluida mengalir akan bergesekan dengan dinding. Gambar 2.3 menunjukkan ilustrasi suatu aliran fluida yang mengalir melewati permukaan silinder sirkular. Titik A menunjukkan titik stagnasi, dimana kecepatan pada titik itu adalah 0, dan tekanan terbesar juga terdapat pada titik tersebut. Sedangkan pada titik B *streamline* mengalami pengecilan penampang sehingga kecepatan pada titik tersebut paling besar, sebaliknya tekanan pada titik tersebut paling kecil. Pada titik D terjadi separasi diakibatkan momentum aliran tidak mampu lagi melawan gaya gesek permukaan silinder sirkular dan *adverse pressure gradient* akibat perluasan penampang *streamline*. Separasi ini juga memancing terjadinya *wake* pada daerah dibelakang silinder sirkular.



Gambar 2.3 Ilustrasi aliran melintasi silinder sirkular, (a) *inviscid* dan (b) *viscous* (Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Aliran *inviscid* digambarkan suatu aliran fluida tanpa dipengaruhi gesekan terhadap dinding permukaan silinder sirkular, atau pengaruh kekentalan (*viskositas*) fluida tidak mempengaruhi aliran fluida. Meskipun pada kenyataannya semua fluida mempunyai viskositas namun pada kondisi tertentu pengaruh viskositas tidak mempengaruhi sifat fluida sehingga dapat diabaikan.



Gambar 2.4 Lapis batas dengan *adverse pressure gradient* (Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Gambar 2.4 menunjukkan bahwa adanya perubahan luasan aliran dapat mempengaruhi profil kecepatan aliran. Pada region 1 ($\frac{dP}{dx} < 0$) terjadi percepatan aliran karena bidang alir menyerupai *nozzle* atau disebut juga daerah *favourable pressure gradient*. Pada region 2 ($\frac{dP}{dx} = 0$) kecepatan aliran konstan atau disebut juga daerah *zero pressure gradient*. Pada region 3 ($\frac{dP}{dx} > 0$) terjadi perlambatan aliran karena bidang alir menyerupai *diffuser* atau disebut juga daerah *adverse pressure gradient*, pada daerah ini juga terjadi separasi aliran yang diakibatkan momentum aliran tidak mampu lagi melawan gaya gesek permukaan benda dan tekanan

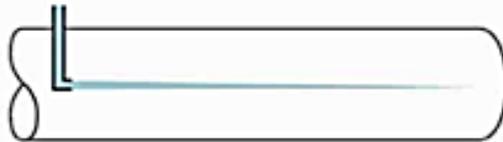
akibat pelebaran penampang, dan kecepatan aliran dititik separasi adalah nol. Akibat separasi ini maka akan terjadi *backflow* atau aliran yang berbalik arah dari arah aliran utama.

2.4 Karakteristik Aliran Melalui Saluran

Karakteristik struktur aliran internal (dalam pipa) sangat tergantung dari kecepatan rata-rata aliran dalam pipa, densitas, viskositas dan diameter pipa. Pada instalasi sistem *ducting* ataupun perpipaan, *elbow* merupakan bagian yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya separasi dan *secondary flow*.

2.4.1 Aliran Laminar

Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan–lapisan atau lamina–lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Aliran laminar ini mempunyai nilai bilangan *Reynolds* kurang dari 2300 ($Re \leq 2300$).



Gambar 2.5 Aliran Laminar

2.4.2 Aliran Transisi

Aliran transisi merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Keadaan peralihan ini tergantung pada viskositas fluida, kecepatan dan lain-lain yang menyangkut geometri aliran dimana nilai bilangan *Reynolds*-nya antara 2300 sampai dengan 4000 ($2300 \leq Re \leq 4000$).



Gambar 2.6 Aliran Transisi

2.4.3 Aliran Turbulen

Aliran turbulen didefinisikan sebagai aliran yang dimana pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dimana nilai bilangan Reynoldsnya lebih besar dari 4000 ($Re \geq 4000$)



Gambar 2.7 Aliran Turbulen

Kondisi aliran *laminar* atau *turbulent* dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds* untuk aliran *incompressible*. Jenis lapis batas yang terjadi pada aliran udara yang mengalir suatu obyek juga sangat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* (Re). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas gaya geser dan gaya inersia sangat penting, sementara bilangan *reynolds* sendiri menggambarkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geser.

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya geser}} \quad (2.1)$$

dimana :

$$\begin{aligned} \text{Gaya Inersia} &= p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \\ \text{Gaya Geser} &= \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2 \end{aligned}$$

Sehingga untuk aliran internal diameter hidrolis (D_h) digunakan untuk perhitungan saluran tak bundar. Diameter hidrolis dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (2.2)$$

dimana : A = Luas penampang
 P = keliling penampang

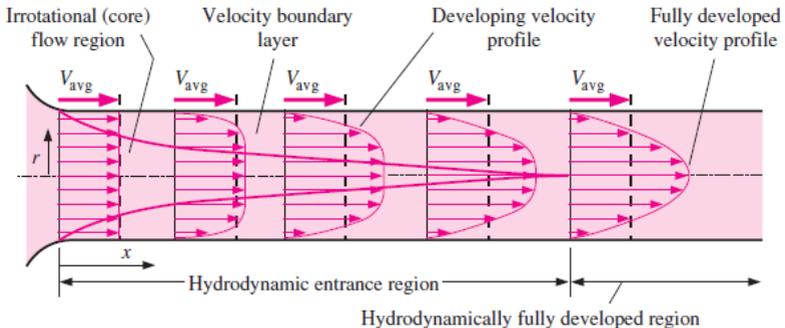
Sehingga,

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot Dh}{\mu} \quad (2.3)$$

dimana :

Re = bilangan *Reynolds*
 U_{ref} = kecepatan aliran *fluida* (m/s)
 D_h = diameter dalam saluran (m)
 μ = viskositas kinematis *fluida* (Nm/s²)

2.4.4 Aliran Berkembang Penuh (*Fully Developed Flow*)



Gambar 2.8 Profil kecepatan untuk aliran di dalam saluran

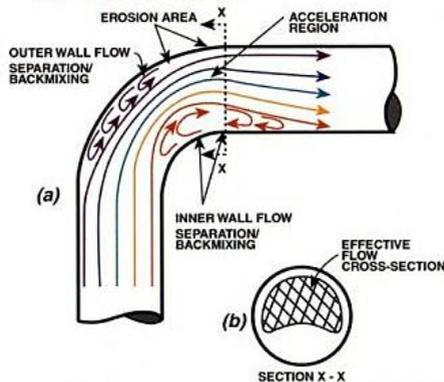
Fully Developed Flow merupakan suatu fenomena aliran dimana terjadinya *boundary layer* maksimum atau profil kecepatan yang tetap, tidak mengalami perubahan. Profil ini dipengaruhi oleh viskositas yang berakibat pada terjadinya gaya geser antara profil kecepatan.

Fenomena aliran seperti ini akan terjadi ketika aliran yang mengalir tidak mengalami gangguan, seperti *fitting*, instalasi, dan sebagainya. Setiap aliran baik aliran laminar maupun aliran turbulen mempunyai besaran yang berbeda dimana untuk aliran laminar bernilai konstan dari titik awal, hal tersebut terjadi karena pengaruh kecepatan *fluida* sehingga *fully developed flow* lebih

cepat, berbeda dengan aliran turbulen dimana *fully developed flow* disebabkan oleh adanya aliran acak sehingga *fully developed flow* terjadi lebih panjang.

2.4.5 Separation Flow Pada Elbow 90°

Pada gambar 2.9 merupakan visualisasi terjadinya separasi aliran yang dapat menimbulkan terjadinya kerugian *pressure drop*. Hal tersebut disebabkan oleh adanya hubungan antara aliran dengan dinding *elbow* sehingga terjadi *friction loss* yang dapat mengurangi momentum dari aliran. Momentum aliran yang semakin kecil akan menambah ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient* sehingga juga akan mengurangi kecepatan aliran dan terbentuknya *vortex* di sekitar dinding *elbow*. Terbentuknya *vortex* tersebut akan berakibat pada mengecilnya luasan penampang aliran utama yang menyebabkan aliran mengalami percepatan dan menyebabkan terjadinya *pressure drop*.

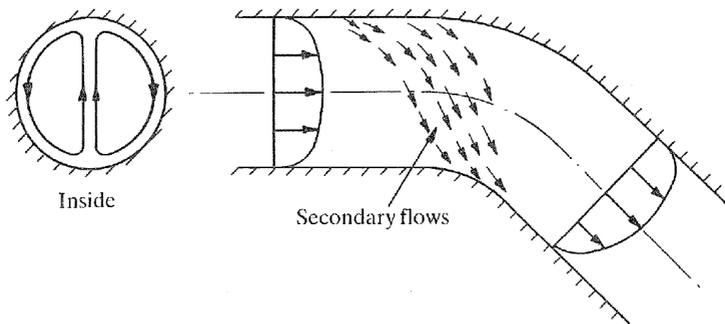


Gambar 2.9 Terjadinya separasi aliran pada dinding *Elbow 90°*.

2.4.6 Secondary Flow pada Elbow 90°

Secondary flow terjadi karena adanya perbedaan distribusi tekanan yang terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*, tekanan statis akan semakin besar pada sisi *outer wall*. Oleh karena itu, aliran yang melewati elbow tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama, sehingga terjadilah aliran sekunder (*secondary flow*). Pada *square*

elbow memiliki ciri yang berbeda dibandingkan dengan *circular elbow*, yaitu terjadinya *secondary flow* pada sisi sudut. Pada *circular elbow*, tidak dijumpai fenomena *boundary layer* pada sisi samping dan bawah, namun pada *square elbow* hal tersebut dapat dijumpai. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi samping dan bawah tersebut yang menyebabkan terjadinya *secondary flow*.



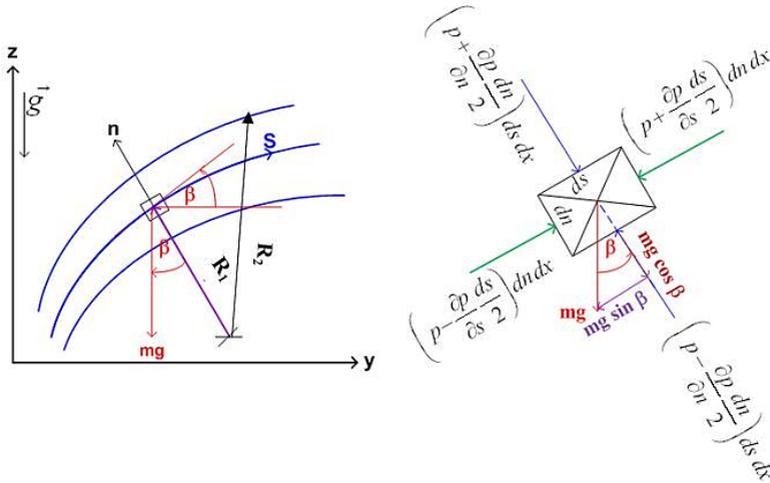
Gambar 2.10 Terjadinya *secondary flow* pada *Elbow 90°*
(Miller, 1990)

2.5 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*

Pada sebuah aliran tunak, aliran fluida di sepanjang *streamline* setiap partikel fluida yang berurutan melewati titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. Dalam aliran tunak sebuah partikel fluida akan bergerak di sepanjang *streamline* dikarenakan untuk *steady flow*, *pathlines* dan *streamline* berlangsung dengan bersamaan. Dari persamaan Euler dibangun persamaan gerak yang dinyatakan dalam koordinat *streamline* untuk *inviscid flow*.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.4)$$

Untuk memperjelas, dapat dilihat aliran pada bidang *yz* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Persamaan gerak dituliskan dalam koordinat *s* (jarak disepanjang *streamline*) dan juga koordinat *n* (jarak normal terhadap *streamline*). Tekanan di pusat dari element adalah *p*.



Gambar 2.11 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Persamaan Euler di sepanjang *streamline* ke arah s , untuk *steady flow* dan mengabaikan *body forces*, dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.5)$$

persamaan (2.5) tersebut menunjukkan hubungan antara kecepatan dengan tekanan, yang mana apabila terjadi penurunan kecepatan maka terjadi peningkatan tekanan, begitu pula sebaliknya. Hal ini sangat sesuai dengan hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa apabila suatu aliran ideal tanpa gesekan dijumlahkan antara komponen tekanan dan kecepatannya pada setiap titik, maka hasilnya adalah sama.

Persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut,

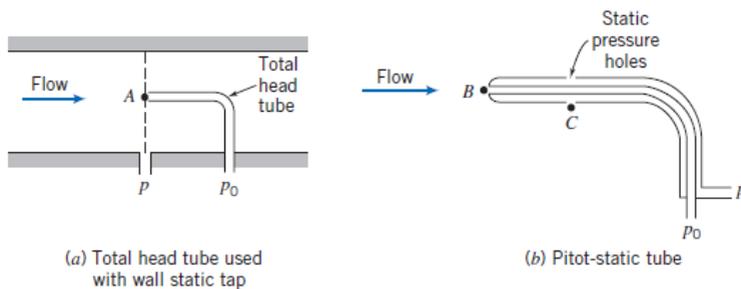
$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.6)$$

persamaan (2.6) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan ke arah luar dari lengkungan *streamline*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan gaya yang bekerja pada partikel hanyalah gaya

dari tekanan, medan tekanan menyebabkan percepatan sentripetal. Pada daerah *streamline* yang lurus atau radius kelengkungannya (R) tak terhingga maka tidak ada perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline* lurus.

2.6 Tekanan Stagnasi, Tekanan Statis, dan Tekanan Dinamis

Tekanan yang diukur dengan suatu alat, yang bergerak bersama partikel fluida dengan kecepatan relatif alat ukur terhadap aliran dinamakan tekanan statis. Pengukuran tekanan statis biasanya menggunakan *wall pressure tap*, kecepatan aliran fluida pada permukaan dinding saluran fluida akan bernilai nol karena aliran fluida telah berkembang penuh (*fully developed flow*).



Gambar 2.12 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis
(Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Tekanan stagnasi dapat didefinisikan sebagai tekanan yang diukur pada titik stagnasi, dimana kecepatan pada titik stagnasi tersebut adalah nol. Persamaan Bernoulli dapat diterapkan pada aliran kompresibel untuk sepanjang suatu *streamline*, yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = \text{konstan} \quad (2.7)$$

Pengukuran tekanan stagnasi (P_o) dimana kecepatannya adalah nol dan $z_o = z$ maka persamaan Bernoulli di atas menjadi :

$$P_o = P + \frac{U^2}{2} \rho \quad (2.8)$$

Tekanan dinamis merupakan selisih antara tekanan stagnasi dengan tekanan statis.

$$P_o - P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.9)$$

Dimana :

- P : Tekanan statis
- P_o : Tekanan stagnasi
- ρ : Densitas fluida
- U : Kecepatan aliran fluida
- g : Percepatan gravitasi bumi
- z : Ketinggian

2.7 Pressure Coefficient (C_p)

Dalam sistem *ducting*, sistem perpipaan, atau model pengujian lainnya, sering kali dilakukan modifikasi parameter, $\Delta p/\rho V^2$, dengan memasukkan faktor $\frac{1}{2}$ untuk membuat *denominator* menyediakan tekanan dinamik. Maka terbentuklah rasio berikut,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.10)$$

dimana Δp adalah tekanan lokal dikurangi dengan tekanan *freestream*, ρ dan V adalah properti dari aliran *freestream*. Rasio ini merupakan rasio antara gaya tekanan terhadap gaya inersia, dan rasio ini disebut dengan *Euler number*. *Euler number* sering disebut dengan *pressure coefficient*, C_p . Dalam pengujian suatu model, *pressure coefficient* secara tidak langsung digunakan untuk menyatakan besarnya *pressure drop*. *Pressure coefficient* pada *elbow* didefinisikan sebagai selisih antara tekanan statis pada dinding dengan tekanan statis referensi dibagi dengan dinamis yang diukur pada *inlet*.

2.8 *Head Loss*

Head loss merupakan suatu fenomena rugi-rugi aliran di dalam sistem pemipaan. Rugi-rugi aliran selalu terjadi pada sistem pemipaan dengan menggunakan berbagai macam fluida, seperti fluida cair dan gas. Pada umumnya, rugi aliran yang terbesar terjadi pada fluida cair, hal ini dikarenakan sifat molekulnya yang padat dibandingkan gas dan memiliki gesekan lebih besar terhadap media yang dilaluinya, terutama jika koefisien gesek media yang dilalui itu lebih besar, maka gesekan yang terjadi pun akan semakin besar. *Head loss* sangat merugikan dalam aliran fluida di dalam sistem pemipaan, karena *head loss* dapat menurunkan tingkat efisiensi aliran fluida.

Salah satu penyebab *head loss* adalah konstruksi desain dari sistem pemipaan tersebut. Jika konstruksi memiliki percabangan yang lebih banyak maka akan memperbesar rugi alirannya, selain itu aliran yang semula dalam keadaan laminar pada saat melalui pipa lurus yang koefisien geseknya besar akan berubah menjadi aliran turbulen. Kondisi aliran turbulen inilah yang dapat merugikan dalam sistem pemipaan tersebut, seperti akan menimbulkan getaran dan juga pengelupasan dinding pipa. Selain itu akibat yang paling mendasar dengan adanya rugi-rugi aliran (*head loss*) ialah dapat menyebabkan besarnya energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan aliran fluida yang berdampak meningkatnya penggunaan listrik pada mesin penggerak fluida seperti pompa. *Head loss* (rugi aliran) sering terjadi pada sistem pemipaan untuk seluruh perusahaan, industri rumah tangga, dan tempat lainnya yang menggunakan pipa sebagai distribusi aliran fluida.

Persamaan Bernoulli untuk fluida sesungguhnya menggambarkan keseimbangan energi, dengan mengikutsertakan kerugian-kerugian energi yang terjadi di dalam persamaan tersebut.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \sum H_{L_T} \quad (2.11)$$

Dimana : P = Tekanan statis (Pa)

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \text{Kecepatan aliran } \left(\frac{m}{s}\right) \\ z &= \text{Ketinggian fluida (m)} \\ \rho &= \text{Massa jenis fluida } \left(\frac{kg}{m^3}\right) \\ g &= \text{Percepatan gravitasi } \left(\frac{m}{s^2}\right) \\ H_{LT} &= \text{Head loss total (m)} \\ \alpha &= \text{Koefisien energi kinetik}\end{aligned}$$

Jika diameter sepanjang aliran tetap dan perbedaan ketinggian dianggap sangat kecil, maka untuk mencari *head loss* dapat dicari dengan:

$$\sum H_{LM} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (2.12)$$

Head loss aliran terbagi menjadi dua bagian, yaitu *Head loss* mayor dan minor.

2.8.1 Head Loss Mayor

Head loss mayor (rugi mayor) adalah besar nilai kehilangan energi yang diakibatkan oleh gesekan antara fluida dengan dinding pipa lurus yang mempunyai luas penampang yang tetap. Untuk menghitung *head loss mayor* dibedakan menurut jenis aliran fluidanya. *Head loss* yang terjadi pada aliran *fully developed* yang melewati pipa lurus horizontal dinyatakan sebagai kerugian tekanan aliran fluida *fully developed* melalui pipa penampang konstan.

a. Laminar

Untuk aliran laminar, berkembang penuh pada pipa horisontal, maka penurunan tekanan dapat dihitung secara analitis, yaitu:

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{D} \quad (2.13)$$

Substitusi dari persamaan , didapatkan:

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{\rho D} = \left(\frac{64}{Re}\right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2.14)$$

Dimana: h_{lm} = *head loss minor* (m)

Dan koefisien gesekan (f) untuk aliran laminar adalah:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.15)$$

b. Turbulen

Head loss mayor untuk aliran turbulen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.16)$$

2.8.2 *Head Loss Minor*

Head loss minor (rugi minor) adalah besar nilai kehilangan energi aliran fluida di dalam pipa yang disebabkan oleh perubahan luas penampang jalan aliran, *entrance*, *fitting*, dan lain sebagainya. Rugi minor adalah rugi yang disebabkan gangguan lokal seperti pada perubahan penampang, adanya katub, belokan *elbow* dan sebagainya. Kerugian ini dapat diketahui dari persamaan:

$$h_{lm} = K \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.17)$$

Dimana : h_{lm} = *head loss minor* (m)

2.9 **Intensitas Turbulensi**

Intensitas turbulensi merupakan bilangan untuk menentukan fluktuasi dari turbulensi dengan membandingkan *root mean square* dari fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (\bar{U}). Intensitas turbulensi dinyatakan dalam bentuk prosentase. Intensitas turbulensi dapat dinotasikan pada persamaan 2.21 sebagai berikut:

$$IT = \frac{u'}{\bar{U}} \times 100\% \quad (2.18)$$

$$u' = \sqrt{\frac{\sum(\bar{U} - U_n)^2}{n - 1}}$$

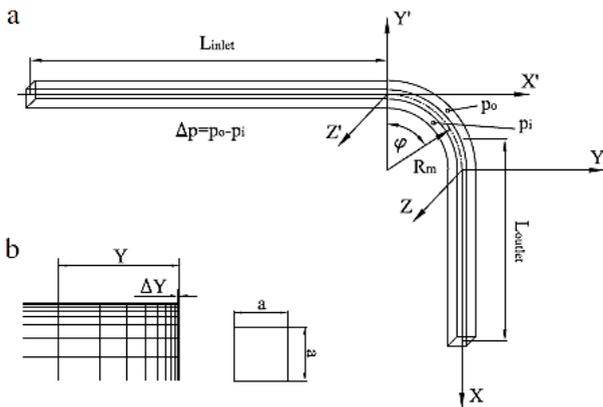
Dimana: IT : Intensitas turbulensi
 U_n : Kecepatan pada waktu tertentu (kecepatan lokal) (m/s)
 \bar{U} : Kecepatan rata-rata (m/s)
 u' : Standar deviasi fluktuasi kecepatan (m/s)

2.10 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini digunakan beberapa referensi dari penelitian terdahulu yang telah dilakukan, penelitian-penelitian tersebut adalah:

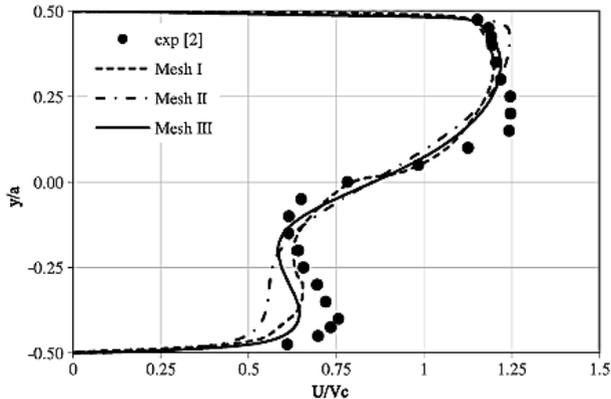
2.10.1 Penelitian Rup dan Sarna (2015)

Rup dan Sarna (2011) melakukan penelitian yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct*. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada $Re = 40000$ yang memiliki ukuran geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm seperti yang terlihat pada gambar 2.17. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$.



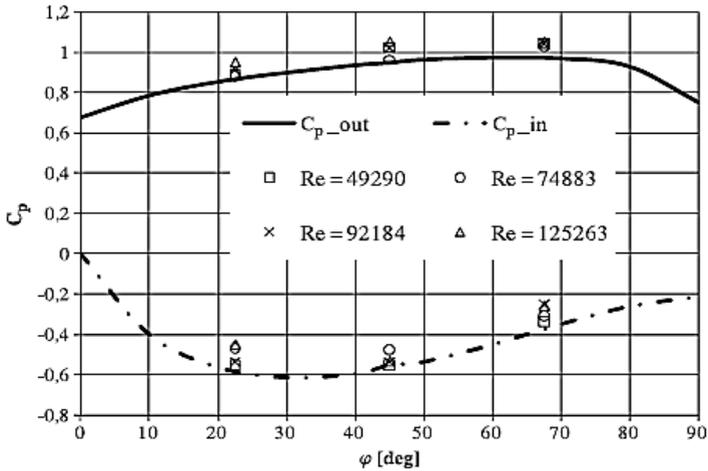
Gambar 2.13 a) Posisi pengambilan data pada *domain* uji
 b) Mesh pada *Volume*. (Rup dan Sarna, 2011)

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



Gambar 2.14 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/Dh = 1.0$ dan $z/Dh = 0.0$ (Rup dan Sarna, 2011)

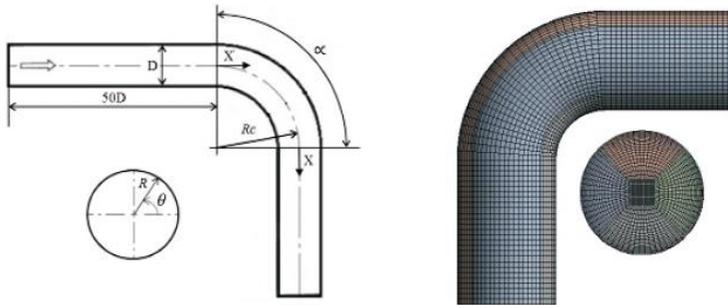
Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.14 yang menunjukkan profil kecepatan pada lokasi $x/Dh = 1.0$ dan $z/Dh = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($Vk = 1034\ 775$). Terjadi perbedaan kecepatan pada sisi *inner* dan sisi *outer* pada saluran setelah melewati *elbow*, hal itu dikarenakan adanya defisit momentum aliran pada sisi *inner* maupun *outer*, namun defisit momentum pada sisi *inner* jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sisi *outer*.



Gambar 2.15 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen. (Rup dan Sarna, 2011)

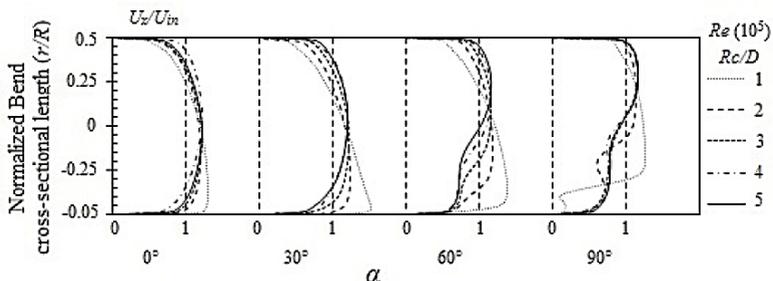
2.10.2 Penelitian Dutta dan Nandi (2015)

Dutta dan Nandi (2015) melakukan studi eksperimen dan numerik tentang pengaruh *Reynolds Number* dan *Curvature Ratio* pada aliran turbulen dalam pipa melengkung. Pada penelitian ini, aliran turbulen mengalir melalui saluran sirkular dengan pipa melengkung 90° (*elbow* 90°) menggunakan *curvature ratio* ($Rc/D = 1$ sampai 5) dengan memiliki diameter inner yang sama yaitu $0,01$ m serta menggunakan panjang *inlet* $50D$ dan panjang *outlet* $20D$, dimana Rc adalah radius kelengkungan dan D adalah diameter pipa serta menggunakan bilangan Re dari 1×10^5 sampai 10×10^5 .



Gambar 2.16 Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya (Dutta dan Nandi, 2015)

Dari penelitian ini didapatkan bahwa untuk nilai Re yang semakin tinggi, maka pengaruh kelengkungan akan menurun. Kecenderungan separasi aliran akan meningkat untuk lengkungan dengan *curvature ratio* yang rendah serta kemampuan melawan *unsteady* dan *complex flow* akan meningkat untuk lengkungan dengan *curvature ratio* yang tinggi.



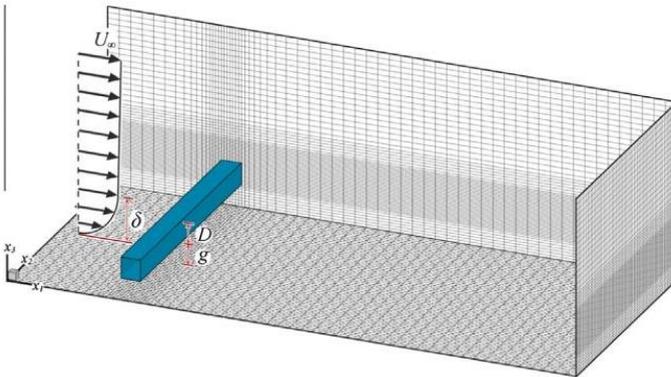
Gambar 2.17 *Velocity profile* pada sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° dengan variasi *curvature ratio* ($R_c/D = 1 - 5$) (Dutta dan Nandi, 2015)

Gambar 2.17 adalah *velocity profile* untuk variasi 5 jenis *curvature ratio* ($R_c/D = 1 - 5$) dengan menggunakan *Reynolds Number* ($Re = 1 \times 10^5$). Pada outlet *elbow* ($\alpha = 90^\circ$), terdapat aliran

balik sebagai akibat dari *adverse pressure gradient* pada *outlet elbow* dimana memiliki momentum aliran yang lebih rendah daripada momentum pada *freestream*, yang mana menurunkan kecepatan pada dekat dinding dan *boundary layer thickness*. Selain itu juga didapati bahwa percepatan yang lebih tinggi terjadi pada *curvature ratio* yang rendah.

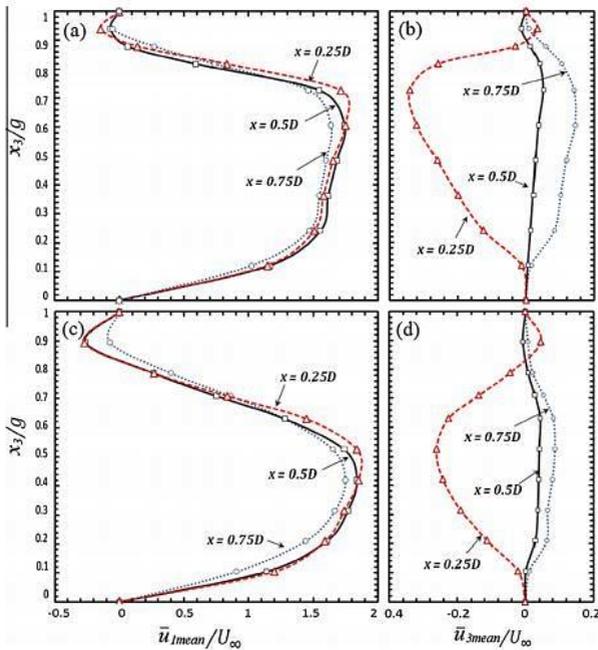
2.10.3 Penelitian Samani dan Bergstrom (2015)

Samani dan Bergstrom (2015) melakukan penelitian untuk menginvestigasi pengaruh dinding pada struktur wake dari square cylinder yang diletakkan dekat dinding. Penelitian dilakukan dengan metode simulasi numeric dan menggunakan teknik *Large Eddy Simulation* serta *Proper Orthogonal Decomposition*. Tiga variasi *gap ratio* adalah $g/D = 0, 0.5, \text{ dan } 1$, Reynolds number yang digunakan adalah $Re = 500$, Square Cylinder diletakkan pada $6D$ dari inlet dan $11D$ dari outlet tunnel.



Gambar 2.18 Domain aliran dan grid simulasi (Samani, 2015)

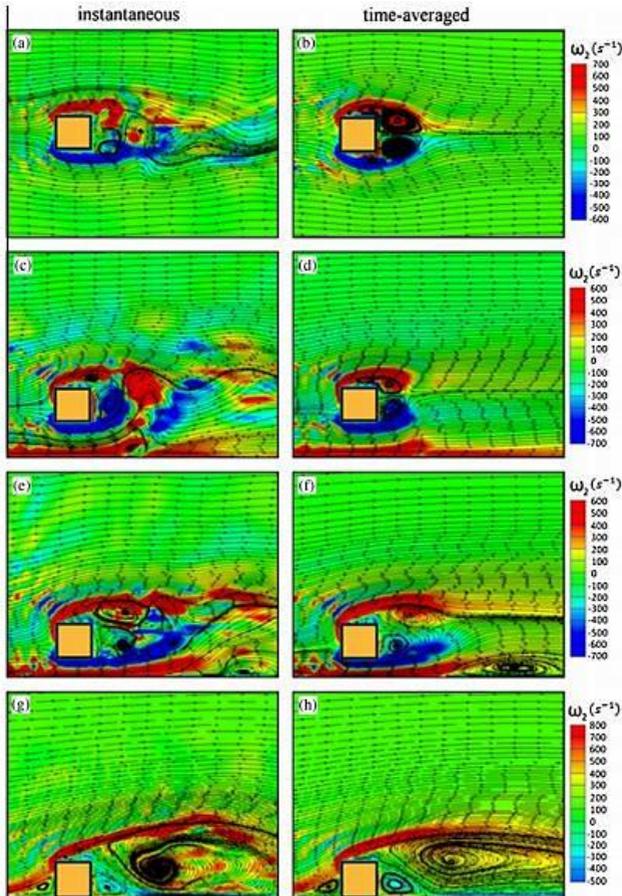
Fenomena yang terjadi adalah untuk semua variasi *gap* separasi aliran terjadi pada daerah *leading edge*, hal ini disebabkan oleh bentuk geometri *square cylinder*. Kemudian terdapat daerah secondary resirkulasi pada bagian bawah diantara *square cylinder* dan dinding.



Gambar 2.19 Profil kecepatan rata-rata pada daerah gap, (a) U_1 untuk $g/D = 1$, (b) U_3 untuk $g/D = 1$, (c) U_1 untuk $g/D = 0.5$, (d) U_3 untuk $g/D = 0.5$, koordinat x diukur dari *leading edge square cylinder* (Samani, 2015)

Dari gambar 2.19 kita dapat mengetahui profil kecepatan pada daerah *gap*, yaitu antara bagian bawah *square cylinder* dan *wall* untuk $g/D = 1$ dan $g/D = 0.5$ dan pada tiga lokasi *streamwise* yang berbeda, serta lokasi x yang diukur dari *leading edge square cylinder*. Dari grafik dapat dilihat bahwa aliran pada daerah *gap* relatif lebih cepat dibandingkan dengan aliran *freestream* dengan peningkatan maksimum sebesar 50%. Walaupun demikian, sepanjang permukaan bagian bawah *square cylinder* terjadi penurunan kecepatan dan terjadi *reverse flow* yang kecil. Untuk *gap* (X_3/g), resirkulasi semakin besar seiring dengan *gap* yang

semakin kecil, dan profil kecepatan untuk ketiga lokasi yang berbeda memiliki bentuk yang mirip. Kecepatan *vertical* aliran cenderung bergerak ke bawah pada *leading edge*, namun berubah arah ke atas ketika mendekati *trailing edge*. Hal ini diakibatkan interaksi antara *wake* dan *vortex* yang mengenai *wall* yang menyebabkan aliran terdefleksi ke atas.

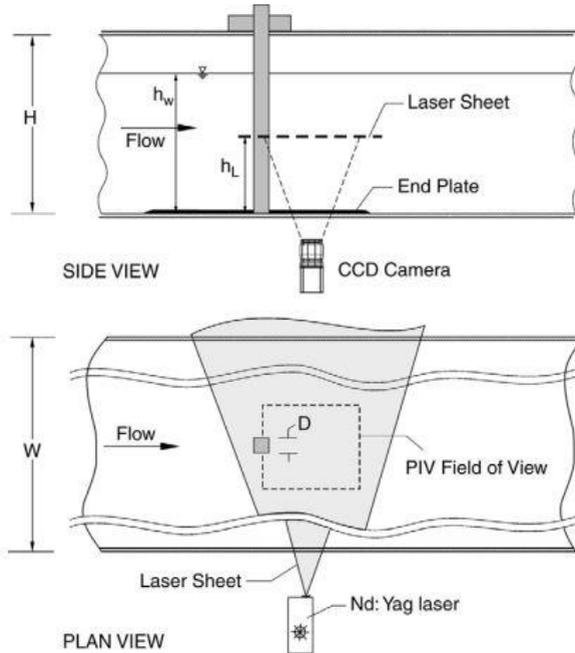


Gambar 2.20 Efek dari gap terhadap struktur aliran (a dan b) untuk $g/D = \infty$, (c dan d) untuk $g/D = 1$, (e dan f) untuk $g/D = 0.5$, (g dan h) untuk $g/D = 0$, (Samani, 2015)

Dari Gambar 2.20 kita dapat melihat secara time-averaged terdapat dua *symmetric vortex* didaerah dekat *wake* pada $g/D = \infty$ (a dan b), pada $g/D = 1$ struktur *vortex* mulai menjadi *asymmetric* dengan *vortex* bagian atas terseparasi ke atas, hal ini dimungkinkan karena *secondary separation* mulai terbentuk dibagian bawah dinding (c dan d). Pada $g/D = 0.5$, *secondary separation* semakin menonjol dan bergeser ke *downstream* (e dan f). Pusaran *secondary vertical cell* ini relatif semakin besar dibanding dengan pusaran *primary cell* pada daerah *wake*. Secara umum, ketika *square cylinder* mendekati *wall*, *wake* akan terseparasi ke atas. Saat *square cylinder* diletakan pada $g/D = 0$ (g dan h), *secondary cell* pada *wall* akan bergabung dengan resirkulasi dari bagian atas dan menjadi sebuah pusaran yang besar dibelakang *body*. Untuk geometri ini *bubble* resirkulasi pada daerah *wake* tertekan seluruhnya oleh *wall*, dan tidak ada *vortex shedding*.

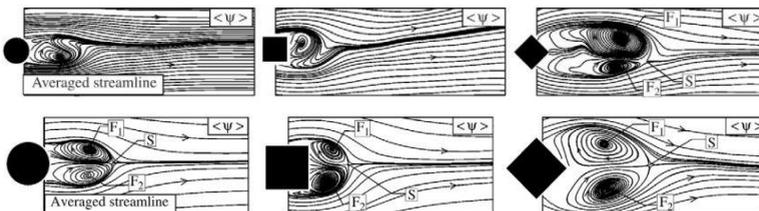
2.10.4 Penelitian Ozgoren (2005)

Ozgoren (2005) melakukan penelitian dengan menggunakan teknik *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV). Penelitian ini bertujuan untuk melihat karakteristik aliran melalui bodi *circular cylinder* (CC), *sharp-edge square cylinder* (SC), dan *45° oriented square cylinder* (OSC). Penelitian dilakukan menggunakan *closed-loop free-surface water channel* dengan tebal (W) = 1000 mm, panjang (L) = 8000 mm, dan tinggi (H) = 750 mm. Reynolds number pada penelitian ini divariasikan mulai dari 550 sampai 3400. *Square Cylinder* (SC) memiliki dimensi 800 x 20 x 20 dan diletakan pada bagian tengah *channel* tegak lurus W .



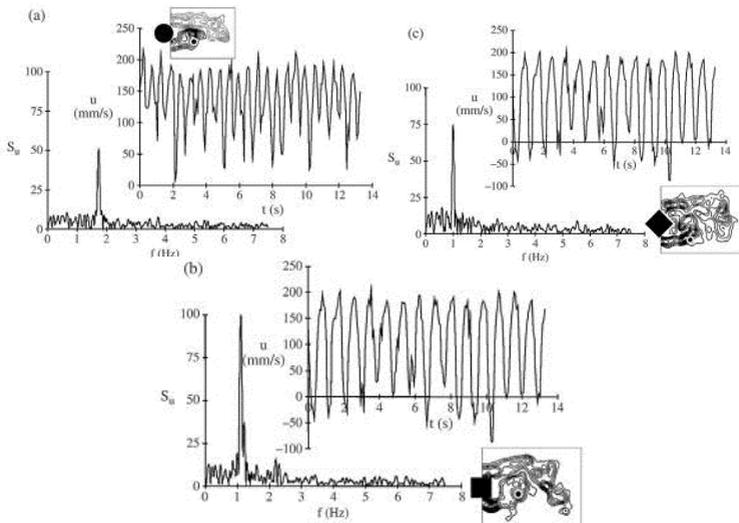
Gambar 2.21 Skema penelitian dan pendefinisian parameter dari *square cylinder* (Ozgoren, 2005)

Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa skala panjang arah *cross-stream* dan arah *streamwise* untuk SC lebih besar dari pada CC.



Gambar 2.22 Perbandingan struktur aliran secara *time-average* pada $Re = 550$ (atas) dan $Re = 3400$ (bawah) (Ozgoren, 2005)

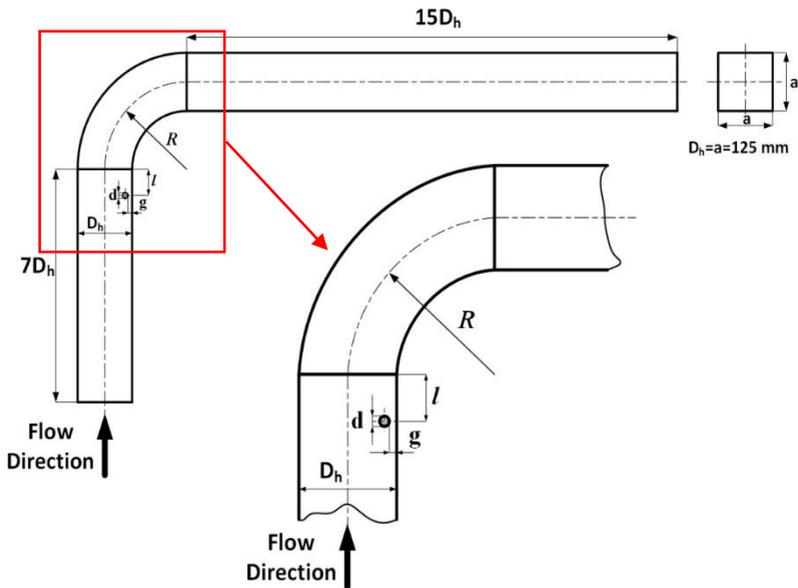
Dari gambar 2.22 kita dapat melihat perbandingan struktur aliran setelah melalui bodi CC, SC, dan OSC. Pola aliran secara *time-average* dibelakang ketiga bodi terlihat berbeda. Pada $Re = 550$ aliran dibelakang bodi CC dan SC berbentuk elips, dan memiliki batas spiral yang terfokus mendekati bagian atas *downstream boundary* untuk SC, dan bagian bawah *downstream boundary* untuk CC, sementara untuk OSC aliran membentuk dua pusaran yang simetris dilambangkan dengan F1 dan F2, dan *saddle point* dilambangkan dengan S. Pada $Re = 3400$ ketiga bentuk bodi menunjukkan bentuk struktur aliran yang sama, yaitu dua pusaran yang simetris dan memiliki *saddle point* yang dilambangkan dengan S.



Gambar 2.23 Grafik *streamwise velocity* u (mm/s) terhadap waktu, dan Strouhal Number pada $Re = 3400$ untuk bodi CC, SC, dan OSC (Ozgoren, 2005)

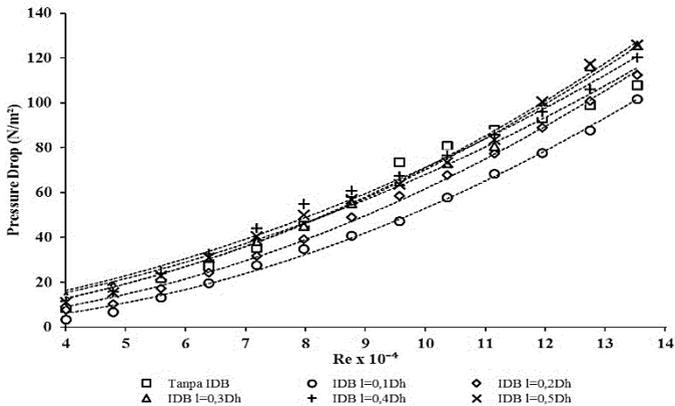
2.10.5 Penelitian Hardian (2017)

Hardian (2017) melakukan eksperimen dengan model saluran berpenampang bujur sangkar (*square duct*): *upstream duct* (*straight duct*), *Inlet Disturbance Body* (IDB) berbentuk silinder dengan $D = 12,5$ mm, *elbow* 90° , dan *downstream duct* (*straight duct*). Pengujian dilakukan dengan variasi jarak $l/D_h = 0,1 - 0,5$; gap konstan $g/D = 0,2$; dan $R/D_h = 1,5$, variasi nilai ReD_h sebesar $3,97 \times 10^4 < ReD_h < 13,5 \times 10^4$.



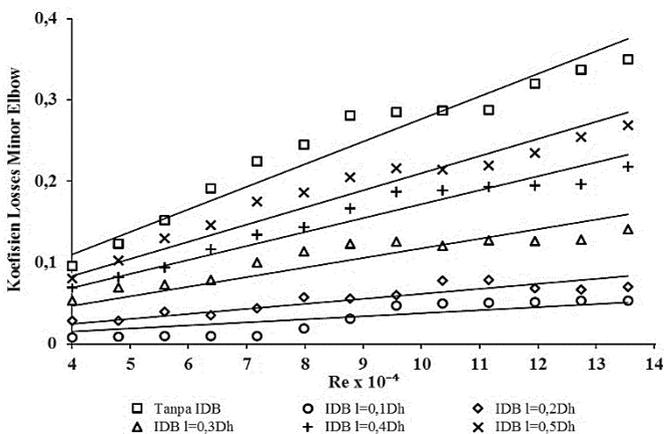
Gambar 2.24 Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakkan *Inlet Disturbance Body* (**Hardian, 2017**)

Hasil dari penelitian ini adalah bahwa penempatan *IDB* efektif untuk proses *recovery* aliran dan menanggulangi timbulnya *secondary flow*. Penempatan *IDB* pada saluran dengan jarak $l = 0,1D_h$ merupakan jarak paling efektif untuk meningkatkan intensitas turbulensi dan menurunkan *pressure drop*.



Gambar 2.25 *Pressure drop pada square duct dengan square elbow 90° (Hardian, 2017)*

Dari Gambar 2.24 dapat dilihat pada jarak *inlet disturbance body* 0,1Dh memiliki *pressure drop* paling rendah dengan persentase kenaikan *pressure drop* sebesar 23,57% pada setiap variasi Reynolds Number, sedangkan pada jarak *inlet disturbance body* 0,5Dh memiliki *pressure drop* paling tinggi dengan persentase kenaikan *pressure drop* sebesar 17,09% pada setiap variasi Reynolds Number.



Gambar 2.26 Koefisien *Loss Elbow 90°* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* (Hardian, 2017)

Pada jarak *inlet disturbance body* $0,1D_h$ memiliki nilai koefisien *loss elbow 90°* paling rendah dengan persentase kenaikan nilai koefisien *loss elbow 90°* sebesar 12,61% pada setiap variasi *Reynolds Number*, sedangkan pada jarak variasi tanpa menggunakan *inlet disturbance body* memiliki nilai koefisien *loss elbow 90°* paling tinggi dengan persentase kenaikan nilai koefisien *loss elbow 90°* sebesar 9,89% pada setiap variasi *Reynolds Number*.

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang metode penelitian yang digunakan untuk mendapatkan data berupa *pressure drop*, *minor loss coefficient*, *pressure coefficient*, dan profil kecepatan *downstream* bidang vertikal dan horizontal. Peralatan yang digunakan, yaitu *square duct* dengan *elbow 90°* dengan rasio kelengkungan (R/D_h) sebesar 2. Penambahan *square disturbance body* (SDB) dengan tinggi 125 mm dan sisi (d) 12.5 mm di depan *inlet elbow 90°* dengan gap (g/d) tetap sebesar 0,2. Variasi SDB yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu tanpa SDB dan jarak (l/D_h) SDB sebesar 0,1 sampai 0,5. Sedangkan variasi bilangan Reynolds (Re_{Dh}) yang digunakan dalam penelitian ini sebesar $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$ atau pada kecepatan udara sebesar 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s.

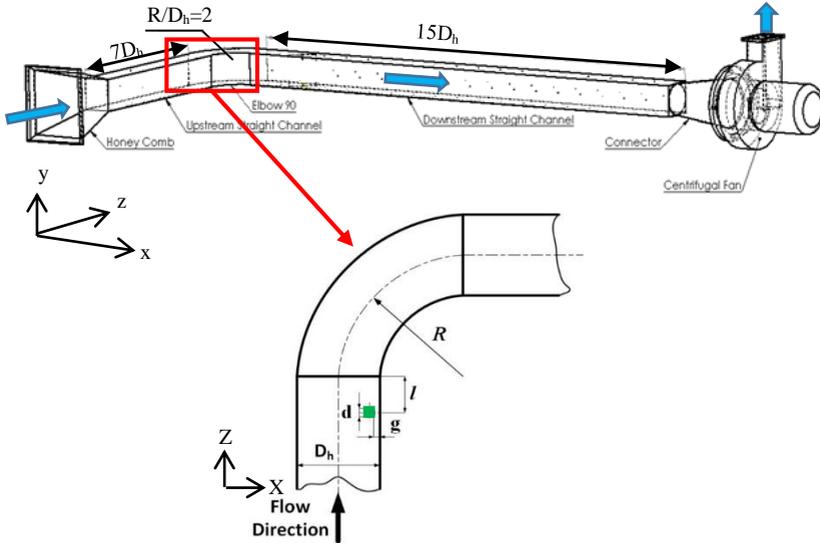
Penjelasan variasi pengambilan data dalam penelitian ini secara rangkum sebagai berikut:

- Pengambilan *pressure drop square duct* tanpa menggunakan SDB dan menggunakan SDB dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada Re_{Dh} sebesar $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$.
- Pengambilan *minor loss coefficient elbow 90°* tanpa menggunakan SDB dan menggunakan SDB dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada Re_{Dh} sebesar $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$.
- Pengambilan *pressure coefficient elbow 90°* tanpa menggunakan SDB dan menggunakan SDB dengan variasi $l/D_h = 0,1 - 0,5$ pada Re_{Dh} sebesar $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $1,35 \times 10^5$.
- Pengambilan profil kecepatan *downstream* bidang vertikal dan horizontal pada $x/D_h = 1$ dengan Re_{Dh} sebesar $8,74 \times 10^4$.

3.1 Skema Penelitian

Instalasi penelitian berupa benda uji (*test section*) dan peralatan pendukung seperti *honey comb*, *square duct*, *square elbow 90°*, *centrifugal fan* dan *connector*. *Square disturbance body*

dipasang pada *inner upstream straight duct* dengan jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ sebelum *inlet elbow* 90° . Skema instalasi penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakkan SDB

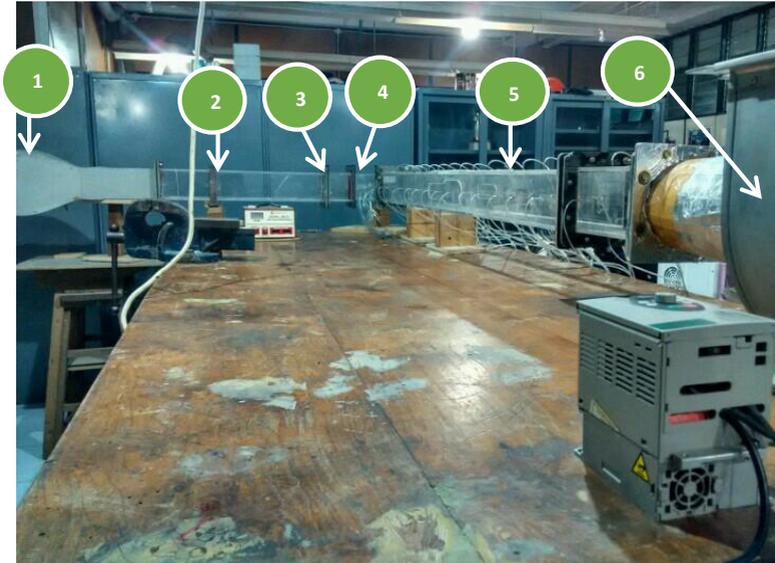
3.2 Peralatan Pendukung

3.2.1 Square Duct

Penelitian menggunakan *square ducting* dan *square elbow* 90° ini dimaksudkan untuk dapat menguji benda dalam skala model. Hal ini disebabkan pengukuran dengan skala sebenarnya cukup sulit dan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Oleh sebab itu, dibuatlah *square ducting* dan *square elbow* 90° dengan pembuatan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasilnya cukup akurat dan memadai.

Square ducting yang digunakan dalam percobaan ini adalah jenis *open circuit*, dimana udara yang dialirkan dalam *ducting*

langsung bebas dilepas ke udara bebas setelah melalui *work section*.



Gambar 3.2 Model uji penelitian

- Keterangan :
1. *Nozzle*
 2. *Upstream duct*
 3. *Square Dicturbance Body*
 4. *Elbow 90°*
 5. *Downstream duct*
 6. *Centrifugal fan*

Spesifikasi *Square Ducting* :

- Bentuk Penampang : *Square duct & square elbow 90°*
- Bahan : Akrilik
- Tebal : 8 mm
- L_m (panjang total *garis tengah elbow 90°*):2975 mm
- l_i (panjang total *inner searah streamline*) : 3170 mm
- l_o (panjang total *outer searah streamline*) : 3268 mm

- L_i (*upstream straight duct*) : 875 mm
- L_o (*downstream straight duct*) : 1875 mm
- R (*centerline elbow 90° radius*) : 250 mm
- r_i (*inner radius*) : 188 mm
- r_o (*outer radius*) : 312 mm
- D_h (*diameter hidrolik*) : 125 mm
- l (*jarak SDB dari inlet elbow 90°*) : 12,5mm;
25,0 mm; 37,5 mm; 50,0 mm; 62,5 mm
- g (*gap SDB dari dinding inner*) : 2,5 mm

3.2.2 Centrifugal Fan

Pada penelitian ini digunakan 1 buah *centrifugal fan* dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Merk : ElexMax Three-Phase Asynchronous Motor
- Type : 71M4 – 4 B3
- No : 0221
- Voltage : 220 / 380 Voltage
- Frekuensi : 50 Hz
- Daya : 0,75 KW
- Putaran : 1350 RPM
- Berat : 8,7 kg

3.2.3 Honey Comb, Screen, dan Nozzle

Nozzle berfungsi untuk menambah kecepatan aliran sebelum memasuki *test suction*. Didalam *nozzle* terdapat *screen* dan *honeycomb* yang berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati uniform dan mengurangi turbulensi aliran ketika memasuki instalasi *test suction*.

3.2.4 Square Disturbance Body

Dalam eksperimen ini, instalasi saluran udara dipasang bodi pengganggu berupa *square disturbance body* yang terletak pada jarak $l/D_h = 0,1$ sampai $0,5$ dengan gap (g/d) tetap sebesar $0,2$

sebelum inlet *elbow* 90° . Bentuk *square disturbance body* adalah persegi dengan panjang 125 mm dan memiliki tebal yang sama disemua sisi (d) 12,5 mm.



Gambar 3.3 *Square Disturbance Body*

3.2.5 Alat Ukur

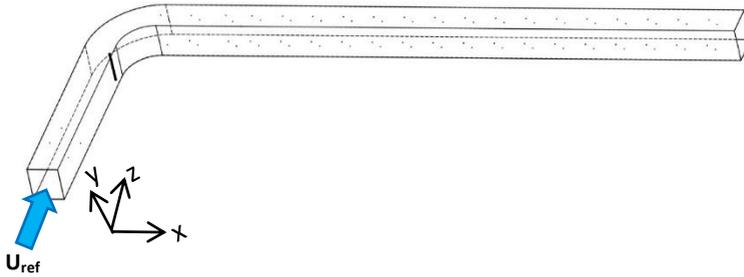
Pada penelitian ini dibutuhkan beberapa alat ukur untuk mendapatkan tekanan statis dan tekanan stagnasi, diantaranya adalah *wall-pressure tap*, *pitot static tube*, *transducer* dan *manometer inclined*.

1. *Wall Pressure Tap*

Wall-pressure tap yaitu lubang-lubang kecil berdiameter 1 mm yang terhubung pada manometer atau transducer tekanan serta dipasang sepanjang kontur permukaan benda uji maupun saluran yang searah aliran dan tegak lurus terhadap permukaan.

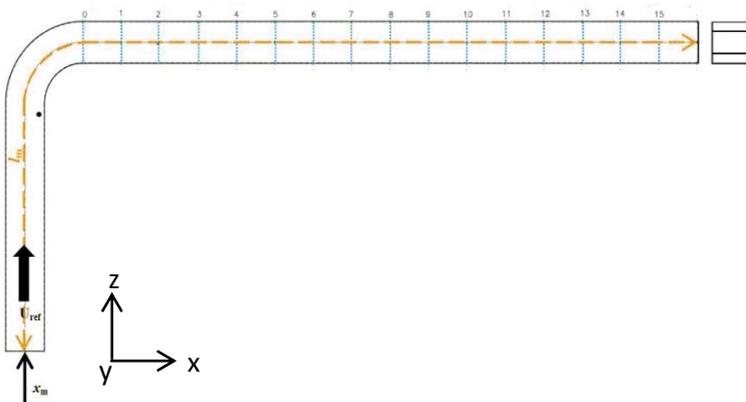
2. *Pitot Tube*

Alat ini berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis sekaligus tekanan stagnasi aliran fluida yang terdapat pada saluran maupun yang terletak dibelakang benda uji. Pergeseran titik pengukuran secara horizontal pada setiap *cross section* yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran tertentu.



Gambar 3.4 Skema pemasangan *wall pressure tap* dan *pitot tube*

Posisi pemasangan *stagnation pitot tube* dan *wall pressure tap* pada benda uji secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.4. *Wall pressure tap* dipasang sepanjang *downstream straight duct* mulai dari *outlet elbow 90°* pada setiap dinding *ducting* yang disusun secara paralel pada masing-masing *test section* yang berjarak 125 mm. Titik pengukuran tekanan statis dimulai pada titik yang berjarak 937,5 mm dari *inlet upstream* sampai pada titik yang berjarak 2937,5 mm dari *inlet upstream*. Sedangkan *stagnation pitot tube* dipasang pada *centerline* tepat sejajar dengan *wall pressure tap*, dimana jarak antar *tap* adalah 125 mm.



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

Jumlah *wall pressure tap* disesuaikan dengan kondisi tekanan pada setiap section. Pada bagian *downstream straight duct* dipasang 15 *wall pressure tap*. Untuk mengetahui profil kecepatan aliran, maka *test section* dibagi menjadi 15 *section* yang akan dijadikan posisi peletakan *pitot tube*. Pada gambar 3.5 ditunjukkan beberapa lokasi yang akan diteliti untuk mendapatkan profil kecepatan.

3. Transducer Tekanan dan Data Aquisisi

Pressure transducer yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dua macam, yaitu memiliki range 1" WC dan 3" WC. Spesifikasi dari *pressure transducer* sebagai berikut:

1. Untuk mengukur profil kecepatan dan intensitas turbulensi

Model : PX653 - 01D5L
 Range : $\pm 1''$ WC = $\pm 249,09$ Pa
 Akurasi : 0.25 % FS (*Full scale*)
 Output : 1 – 5 V DC
 Excitation : 12 – 36 V DC
 Ser.no. : X14500102

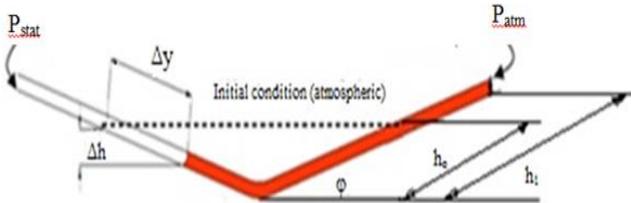
2. Untuk mengukur *pressure drop*

Model : PX653 - 03D5V
 Range : $\pm 3''$ WC = $\pm 747,27$ Pa
 Akurasi : 0.25 % FS (*Full scale*)
 Output : 1 – 5 V DC
 Excitation : 12 – 36 V DC
 Ser.no. : X11450113

4. 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 15° 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 3.6.



Gambar 3.6 *Inclined Manometer*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Kerosene* ($SG_{\text{kerosene}} = 0,827$)
- Kemiringan : 15°

3.3 Analisa Dimensi Parameter - Parameter yang Dianalisis

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 sepanjang *downstream straight duct*.

Δp : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m^2)

ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)

μ : viskositas absolut fluida ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)

U_{ref} : kecepatan *freestream* di *inlet upstream duct* (m/s)

u : kecepatan lokal (m/s)

R : *elbow* 90° radius (m)

l : jarak SDB dari *inlet elbow* 90°

D_h : diameter hidrolis saluran (m)

- d : diameter *square disturbance body*
 g : gap antara SDB dan dinding *inner*
 y : aliran searah sumbu koordinat y
 z : aliran searah sumbu koordinat z
 x : aliran searah sumbu koordinat x

3.3.1 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk *Pressure Drop* pada *Square Duct*

Pressure drop pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga perbedaan tekanan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z, \dots) \quad (3.1)$$

dimana ΔP adalah perbedaan tekanan (N/m^2)

Menggunakan *Buckingham Pi-theorema* dengan parameter ρ , U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak dimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}$: koefisien tekanan
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*
3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap cylinder disturbance* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik

8. $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan arah aliran sumbu y dengan diameter hidrolis
9. $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan arah aliran sumbu z dengan diameter hidrolis

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah

$\frac{d}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}$ sehingga,

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{l}{D_h}\right) \quad (3.4)$$

dan untuk *pressure drop* tak berdimensi ($\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2}$) pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_2\left(Re_{D_h}, \frac{l}{D_h}\right) \quad (3.5)$$

3.3.2 Analisis Grup Tak Berdimensi untuk Kecepatan pada *Square Duct*

Velocity profile pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga kecepatan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$u = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z,) \quad (3.6)$$

dimana u adalah kecepatan lokal (m/s)

Menggunakan Buckingham Pi-theorema dengan parameter ρ, U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak dimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{u}{U_{ref}}$: kecepatan tak berdimensi
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*

3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap cylinder disturbance* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\bullet \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.7)$$

$$\bullet \frac{u}{U_{ref}} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.8)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah

$\frac{d}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}$ sehingga,

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.9)$$

dan untuk kecepatan tak berdimensi $\left(\frac{u}{U_{ref}}\right)$ pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_2\left(Re_{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.10)$$

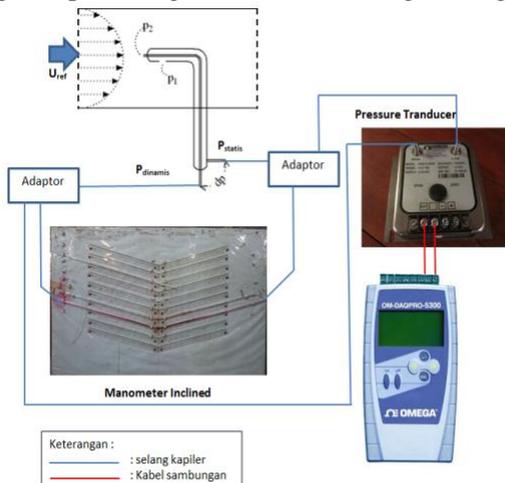
Untuk menghitung profil kecepatan dengan menggunakan *Reynolds number* konstan yaitu $8,74 \times 10^4$.

3.4 Langkah-Langkah Validasi

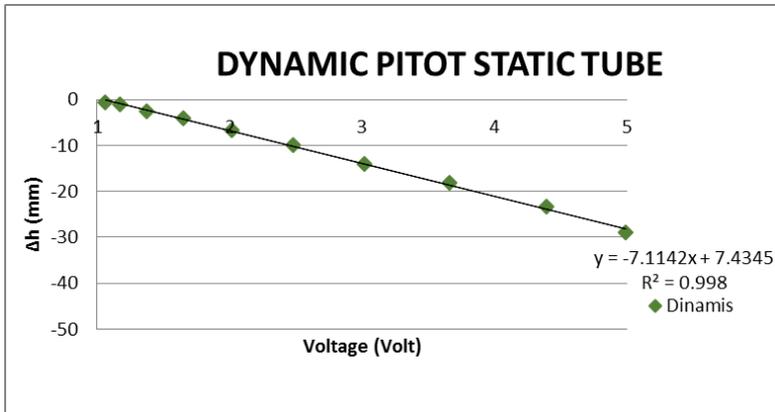
Validasi dilakukan pada pengambilan data tekanan statis dan dinamis. Peralatan yang digunakan, yaitu manometer, *pressure transducer* 1" WC, *pressure transducer* 3" WC, data aquisition DAQ PRO 5300, dan *pitot static tube*. Langkah-langkah validasi yang dilakukan sebelum pengambilan data pada penelitian sebagai berikut:

3.4.1 Validasi Tekanan Dinamis

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *freestream* tanpa dipasang *square disturbance body*.
2. *Pitot static tube* dipasang pada dinding saluran udara yang tersambung pada manometer dan transduser.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data manometer dan transduser untuk tekanan dinamis.
5. Dari manometer didapatkan Δh (mm) dan dari data transduser didapatkan voltase (volt).
6. Pembuatan grafik Δh (mm) vs voltase (volt) dari data-data yang didapatkan agar diketahui hubungan dengan formula.



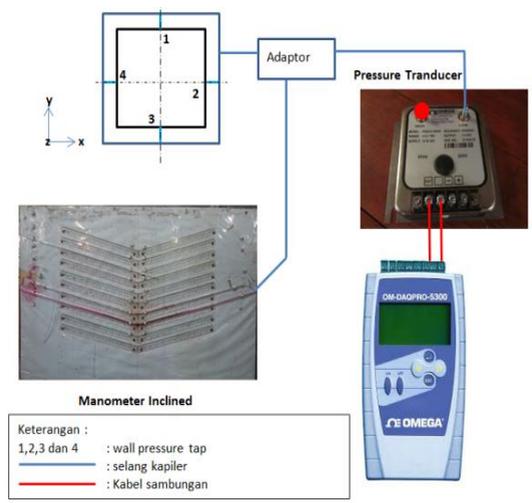
Gambar 3.7 Skema validasi tekanan dinamis *pressure transducer* 1" WC



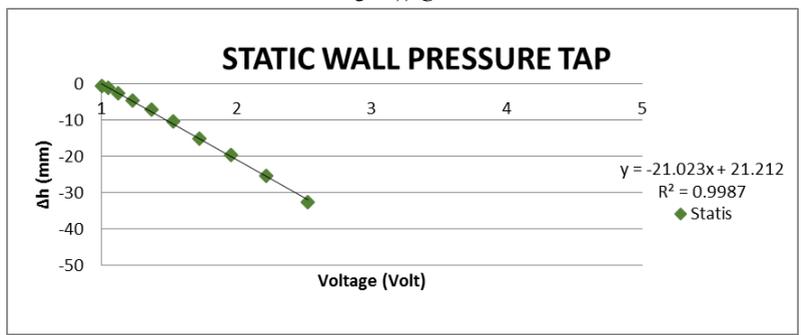
Gambar 3.8 Grafik hasil validasi tekanan dinamis *pressure transduser* 1” WC

3.4.2 Validasi Tekanan Statis

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *square disturbance body*.
2. *Wall pressure tap* pada *inlet upstream duct* dihubungkan pada manometer dan transduser.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data manometer dan transduser 3” WC untuk tekanan statis dinding.
5. Dari manometer didapatkan Δh (mm) dan dari data transduser didapatkan voltase (volt).
6. Pembuatan grafik Δh (mm) vs voltase (volt) dari data-data yang didapatkan agar diketahui hubungan dengan formula.



Gambar 3.9 Skema validasi tekanan statis *pressure transducer* 3” WC



Gambar 3.10 Grafik hasil validasi tekanan statis *pressure transducer* 3” WC

3.5 Prosedur Pengambilan Data

3.5.1 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 sebagai berikut:
 - a) *Test section* dipersiapkan.
 - b) *Pitot static tube* dipasang pada posisi yang ingin diukur.
 - c) *Pitot static tube* dihubungkan dengan transduser dengan menggunakan selang kapiler.
 - d) Frekuensi *inverter* diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - e) Voltase dari transduser pada tekanan stagnasi pada dicatat.
 - f) *Blower* dimatikan
 - g) Langkah d sampai f diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.
- 2) Prosedur pengukuran tekanan statis sebagai berikut:
 - a) *Test section* dipersiapkan.
 - b) *Wall pressure tap* dihubungkan ke transduser dengan selang kapiler.
 - c) Frekuensi *inverter* diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - d) Data voltase dari transduser dicatat.
 - e) Selang kapiler transduser dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* pada titik *section* selanjutnya.
 - f) Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi $16D_h$ dari *inlet downstream square duct*.

3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif

Pengolahan data kuantitatif dilakukan dengan membuat contoh perhitungan. Dalam perhitungan diperlukan beberapa data awal sebagai berikut:

- Diameter hidrolis (D_h) : 125 mm

- Panjang *downstream duct* : 1875 mm
- Panjang *inlet upstream* sampai *downstream*
Inner wall (l_i) : 3170 mm
Outer wall (l_o) : 3268 mm
- Sudut manometer (θ) : 15°
- *Specific gravity kerosene* ($SG_{kerosene}$) : 0,827
- Percepatan gravitasi (g) : $9,81 \text{ m/s}^2$
- Temperatur ruangan dianggap konstan (T) : 28°C
- Massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{ud}) : $1,182 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas kinematis ($T = 28^\circ\text{C}$) (ν) : $1,59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Massa jenis air pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{H2O}) : $996,4 \text{ kg/m}^3$

1) Perhitungan untuk *Reynolds Number*

Pada eksperimen ini digunakan bilangan Reynolds yang didapat melalui persamaan 3.10 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada bilangan Reynolds $8,74 \times 10^4$.

$$Re_{Dh} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot Dh}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot Dh}{\nu} \quad (3.11)$$

dimana: ρ_{ud} : massa jenis udara pada 28°C (kg/m^3)

ν : viskositas kinematis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (m^2/s)

μ : viskositas absolut udara pada $T = 28^\circ\text{C}$

U_{ref} : kecepatan *freestream* pada *inlet upstream square duct* (m/s)

D_h : diameter hidrolik *square duct* (m)

Re_{Dh} : bilangan Reynolds

Pengaturan frekuensi pada *inverter* dilakukan secara manual untuk mendapatkan kecepatan awal (U_{ref}) sebesar 10 m/s. Dengan kalibrasi validasi tekanan dinamis pada saluran *upstream duct* melalui manometer untuk pengukuran nilai Δh . Nilai Δh diukur dari frekuensi 0 Hz sampai 50 Hz. Pengukuran kecepatan aliran masuk menggunakan persamaan 3.13 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 &= SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta y \sin 15^\circ \\ U_{ref}^2 &= \frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}} \\ U_{ref} &= \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}} \quad (3.13) \end{aligned}$$

- dimana :
- $P_{dinamis}$: ($P_{stagnasi} - P_{statis}$) tekanan dinamis diukur dengan *pitot static tube* (N/m²)
 - $P_{kerosene}$: massa jenis *kerosene* pada 28°C (kg/m³)
 - ρ_{udara} : massa jenis udara pada 28°C (kg/m³)
 - g : percepatan gravitasi (m/s²)
 - Δh : perbedaan fluida pada manometer (m)
 - U_{ref} : kecepatan freestream pada *inlet upstream* (m/s)
 - $SG_{kerosene}$: *Specific gravity kerosene* pada 28°C
 - ρ_{H2O} : massa jenis air pada 28°C (kg/m³)

2) Perhitungan Kecepatan Lokal

Perhitungan profil kecepatan sepanjang *downstream duct* diukur pada 10 *test section* dengan variasi gap peletakkan *inlet disturbance body*. Perhitungan profil kecepatan pada setiap *section* sepanjang *downstream duct* ditulis sesuai persamaan 3.14 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{udara}}} \quad (3.14)$$

- dimana:
- p_o : tekanan stagnasi
 - p_s : tekanan statis
 - ρ_{ud} : massa jenis udara pada T = 28°C
 - $p_o - p_s$: tekanan dinamis

3) Perhitungan *Minor Loss Coefficient Elbow 90°* ($K_{elbow\ 90^\circ}$)

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *square disturbance body* pada variasi jarak $0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°*. Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan *minor loss coefficient elbow 90°* pada saluran. *Minor loss coefficient elbow 90°* adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecilnya *head loss minor* akibat pemasangan sebuah *elbow 90°* pada sebuah saluran udara. Pada eksperimen ini, *minor loss coefficient elbow 90°* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°*.

$$P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ} = K_{elbow\ 90^\circ} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.15)$$

$$K_{elbow\ 90^\circ} = \frac{(P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.16)$$

dimana:	P_1	:	Tekanan pada <i>outlet elbow 90°</i> (N/m^2)
	$P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}$:	Tekanan pada <i>inlet elbow 90°</i> (N/m^2)
	\bar{V}^2	:	Kecepatan udara masuk pada upstream (m/s)
	ρ_{udara}	:	massa jenis udara pada $28^\circ C$ (kg/m^3)
	$K_{elbow\ 90^\circ}$:	<i>loss coefficient elbow 90°</i>

Minor loss coefficient elbow 90° pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number* $3,97 \times 10^4 < Re_{D_h} < 1,35 \times 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi jarak peletakan *square disturbance body* $0,1D_h$ sampai $0,5D_h$.

4) Perhitungan *Pressure Drop* (ΔP)

Pressure drop adalah selisih tekanan *inlet* pada *upstream square duct* dan tekanan *outlet* pada *downstream square duct* seperti pada gambar 3.11. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir sama. Perhitungan P_{inlet} dan P_{outlet} adalah sebagai berikut :

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (3.17)$$

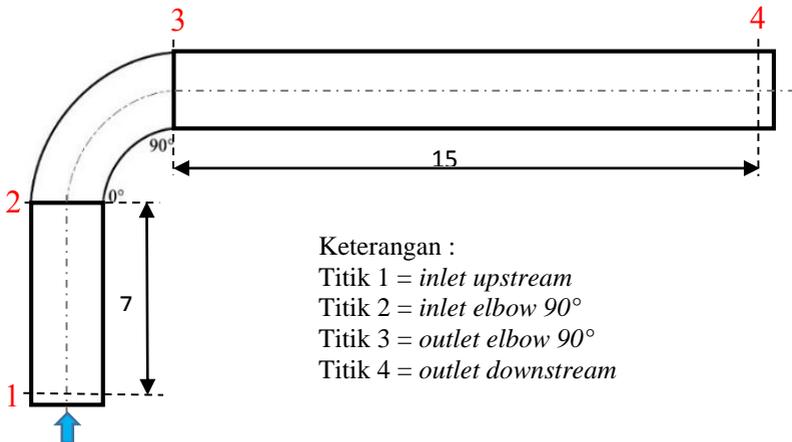
$$\Delta P = (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet})$$

$$\Delta P = (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet}) \quad (3.18)$$

dimana: ΔP : kecepatan lokal (m/s)

P_{inlet} : Tekanan *inlet* pada *upstream square duct* (N/m²)

P_{outlet} : Tekanan *outlet* pada *downstream square duct* (*section 14*) (N/m²)



Gambar 3.11 Lokasi perhitungan untuk *pressure drop*

5) Perhitungan *Pressure Coefficient*

Pressure coefficient (C_p) merupakan selisih antara tekanan lokal dan tekanan *freestream*. Perhitungan *pressure coefficient* dilakukan pada *elbow 90°* untuk mengetahui *pressure drop* pada *elbow 90°*, perhitungan C_p dilakukan pada sisi *inner* dan *outer* pada *elbow 90°*.

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3.19)$$

$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3.20)$$

dimana: C_p : *Pressure coefficient*
 P_c : Tekanan lokal (N/m²)
 P_∞ : Tekanan *freestream* (N/m²)
 ρ : Massa jenis udara (kg/m³)
 V : Kecepatan udara (m/s)

3.6 Urutan Langkah Pengambilan Data

Pada tabel 3.1 dijelaskan urutan langkah- langkah penelitian yang akan dilakukan. Urutan langkah-langkah penelitian sebagai berikut:

Tabel 3.1 Urutan langkah penelitian

No.	Pressure Drop	Profil Kecepatan
1.	Peralatan disiapkan sesuai dengan instalasi penelitian	Peralatan disiapkan sesuai dengan instalasi penelitian
2.	<i>Square Disturbance Body</i> dipasang pada jarak $0,1D_h$ sebelum <i>inlet elbow 90°</i>	<i>Square Disturbance Body</i> dipasang pada jarak $0,1D_h$ sebelum <i>inlet elbow 90°</i>
3.	<i>Induced Draft Fan</i> dinyalakan	<i>Induced Draft Fan</i> dinyalakan
4.	Kecepatan <i>inlet</i> 5 m/s sampai 17 m/s yang memiliki variasi <i>Reynolds Number</i> (Re_{D_h}) $3,95 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$	Kecepatan pada <i>inlet</i> 11 m/s dengan <i>Reynolds Number</i> (Re_{D_h}) $8,74 \times 10^4$

5.	<i>Pressure Drop</i> dihitung dari pengukuran tekanan statis <i>wall pressure tap</i> pada posisi P_{inlet} dan P_{outlet} .	Profil kecepatan dihitung dari tekanan dinamis dengan <i>pitot tube</i> pada 10 <i>sections</i> sepanjang <i>downstream</i> dengan setiap <i>section</i> terdapat 17 titik pengambilan data
6.	Data diolah hingga didapatkan grafik <i>pressure drop vs Re_{Dh}</i>	Data diolah hingga didapatkan grafik profil kecepatan pada setiap <i>section</i>
7.	Langkah 2 sampai 6 diulangi dengan variasi jarak peletakkan <i>Square Disturbance Body</i> $0,2D_h$; $0,3D_h$; $0,4D_h$; dan $0,5D_h$	Langkah 2 sampai 6 diulangi dengan variasi jarak peletakkan <i>Square Disturbance Body</i> $0,2D_h$; $0,3D_h$; $0,4D_h$; dan $0,5D_h$

3.7 Gambar Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.2, yaitu DAQ PRO 5300, transduser 1" WR dan 3" WR, *inverter*, *centrifugal fan*, *pitot static tube*, manometer, dan *inlet disturbance body*.

Tabel 3.2 Peralatan penelitian

No	Nama Alat	Gambar
1	DAQ PRO 5300 0-24 mA: 0-10V max Input: 8 Rate: 100/sample Samples: 1000	

<p>2</p>	<p><i>Pressure transducer 1" WC</i> Model: PX653 - 01D5L Range : $\pm 1''$ WC <i>(Water column)</i> Akurasi: 0.25 % FS <i>(Full scale)</i> Output: 1 – 5 V DC Excitation: 12 – 36 V DC Ser.no.: X14500102</p>	 <p>A photograph of an Omega PX653-01D5L differential pressure transmitter. The device is a rectangular metal box with a white faceplate. It features two pressure ports at the top, labeled 'HIGH' and 'LOW'. The faceplate has a 'SPAN' knob and a 'ZERO' knob. Below the knobs are three terminals labeled 'OUT', '-', and '+'. The top of the faceplate has the Omega logo and the text 'DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER'. Technical specifications are printed on the faceplate: MODEL: PX653-01D5L, ACCURACY: PERISPEC, RANGE: 1" WC, OUTPUT: 1-5 VDC, SUPPLY: 12-36 VDC, and SER. NO.: X14500102. A barcode is also visible.</p>
<p>3</p>	<p><i>Pressure transducer 3" WC</i> Model: PX653 - 03D5V Range: $\pm 3''$ WC <i>(Water column)</i> Akurasi: 0.25 % FS <i>(Full scale)</i> Output: 1 – 5 V DC Excitation: 12 – 36 V DC Ser.no.: X11450113</p>	 <p>A photograph of an Omega PX653-03D5V differential pressure transmitter. The device is a rectangular metal box with a white faceplate. It features two pressure ports at the top, labeled 'HIGH' and 'LOW'. The faceplate has a 'SPAN' knob and a 'ZERO' knob. Below the knobs are three terminals labeled 'OUT', '-', and '+'. The top of the faceplate has the Omega logo and the text 'DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER'. Technical specifications are printed on the faceplate: MODEL: PX653-03D5V, ACCURACY: PERISPEC, RANGE: 3" WC, OUTPUT: 1-5 VDC, SUPPLY: 12-36 VDC, and SER. NO.: X11450113. A barcode is also visible.</p>
<p>4</p>	<p><i>Inverter</i> Model : ATV31HU15M2A U (V~) : input = 200/240 Ø1 output = 200/240 Ø3 F (Hz) :input = 50/60 output = 0.5/500 I (A) :input = 15.8 max output = 8.0</p>	 <p>A photograph of an ATV31HU15M2A inverter. The device is a rectangular metal box with a white faceplate. It features a digital display at the top showing '0.00'. Below the display are several buttons, including a green 'STOP' button and a red 'RESET' button. The bottom of the faceplate has a green label with technical specifications.</p>

<p>5</p>	<p><i>Centrifugal fan</i> Fan : type : VDC/4 – 225; 0.75 kW; 1400 RPM 220 V; 50 Hz Motor : type : 71M4 – 4 B3 220/380 V; 50 Hz; 0.75 kW</p>	
<p>6</p>	<p><i>Pitot static tube</i></p>	
<p>7</p>	<p><i>Manometer</i> Cairan : Kerosene SG = 0.827 Sudut (α) = 15°</p>	
<p>8</p>	<p><i>Square Disturbance Body</i> Dimensi : $l = 125$ mm $d = 12.5$ mm</p>	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

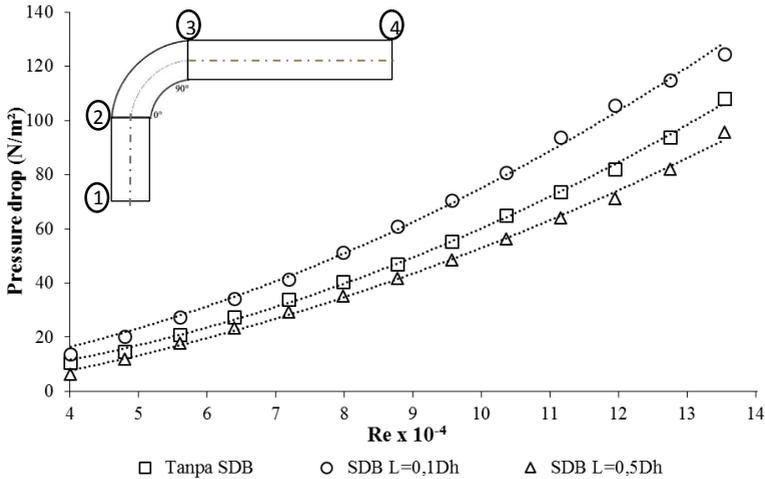
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Hasil studi ditampilkan dan dibahas dalam beberapa sub-bab. Secara garis besar pembahasan hasil dan analisa *pressure drop*, *minor loss coefficient* pada *square duct* dengan *elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s, kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi tanpa dan dengan *square disturbance body*. Kemudian *pressure coefficient* sisi *inner elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, $1,35 \times 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s, 11 m/s, 17 m/s) dengan variasi tanpa dan dengan *square disturbance body*. Kemudian profil kecepatan pada penampang horizontal dan vertikal dengan variasi tanpa dan dengan *square disturbance body* pada kecepatan 11 m/s. Terakhir *turbulent intensity* pada posisi $x/D_h = 1$ dari *outlet elbow 90°* dengan variasi tanpa dan dengan *square disturbance body* pada kecepatan 11 m/s. Jarak peletakkan *square disturbance body* sebelum *inlet elbow 90°* mulai dari $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ untuk semua pengambilan data.

4.1 Pressure Drop pada Square Duct dengan Reynolds Number $3,97 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,35 \times 10^5$

Sub-bab ini menampilkan hasil penelitian berupa grafik pengaruh *square disturbance body* (SDB) dan *Reynolds Number* (Re_{Dh}) terhadap *pressure drop* (Δp) sepanjang *square duct* dengan *elbow 90°*. *Square duct* divariasikan tanpa dan dengan SDB, *gap* SDB tetap (g/d) sebesar 0,2 dan variasi jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°* dengan rasio kelengkungan (R/D_h) tetap sebesar 2. Sedangkan variasi Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$ atau pada kecepatan udara sebesar 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s. Perhitungan Δp menggunakan tekanan pada *inlet upstream duct* (1) dan *outlet downstream duct* (4). Hasil yang ditampilkan hanya 3 variasi yaitu tanpa SDB sebagai acuan

data Δp , $l = 0,5D_h$ sebagai data paling optimal dari pemasangan SDB, dan $l = 0,1D_h$ sebagai data peningkatan Δp terbesar.



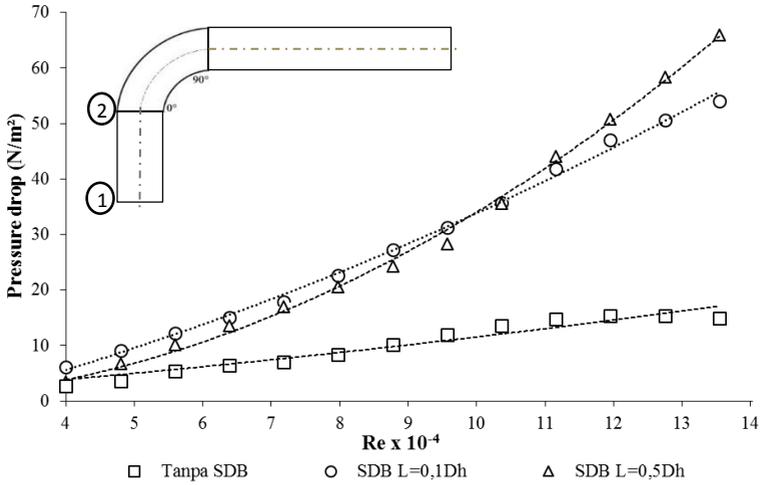
Gambar 4.1 Grafik *Pressure drop* pada *square duct* dengan *square elbow* 90° dengan variasi jarak peletakan *square disturbance body* terhadap Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$

Pada gambar 4.1 ditampilkan grafik *pressure drop* terhadap Re_{Dh} sepanjang *square duct* (titik 1 – 4), dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan *pressure drop* seiring dengan peningkatan *Reynolds Number*. Peningkatan *pressure drop* ini disebabkan oleh peningkatan kecepatan udara yang berbanding lurus dengan peningkatan *Reynolds Number*. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa *trendline* grafik *pressure drop* terhadap Re_{Dh} meningkat pada variasi saluran tanpa SDB mulai dari $10,6 \text{ N/m}^2$ sampai $107,9 \text{ N/m}^2$. Sementara untuk grafik variasi SDB ($l = 0,1D_h$) *pressure drop* meningkat mulai dari $13,7 \text{ N/m}^2$ sampai $124,4 \text{ N/m}^2$, dan variasi SDB ($l = 0,5D_h$) *pressure drop* meningkat mulai dari $6,2 \text{ N/m}^2$ sampai $95,7 \text{ N/m}^2$. Dari ketiga grafik variasi yang ditampilkan, yang memiliki nilai rata-rata *pressure drop* terhadap Re_{Dh} terendah adalah adalah SDB ($l = 0,5D_h$) sebesar $44,8 \text{ N/m}^2$, kemudian tanpa SDB sebesar $51,7 \text{ N/m}^2$, dan terakhir SDB ($l =$

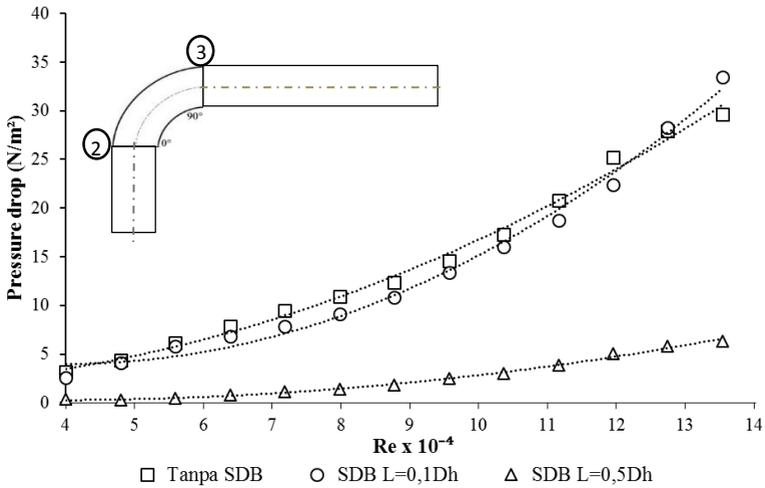
0,1D_h) sebesar 64,5 N/m². Dengan demikian, penambahan SDB pada *square duct* efektif menurunkan *pressure drop* pada SDB ($l = 0,5D_h$) dengan presentase penurunan sebesar 13,2%, sebaliknya peletakan SDB ($l = 0,1D_h$) membuat *pressure drop* pada *square duct* meningkat 24,8% dari saluran tanpa SDB.

Penambahan *elbow 90°* pada *square duct* menyebabkan terjadinya gesekan, separasi aliran, dan aliran sekunder yang mengakibatkan *effective flow area* berkurang. Separasi aliran terjadi karena aliran tidak mampu melawan *advers pressure* pada sisi *inner wall*, sedangkan aliran sekunder terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner* dan *outer elbow 90°*.

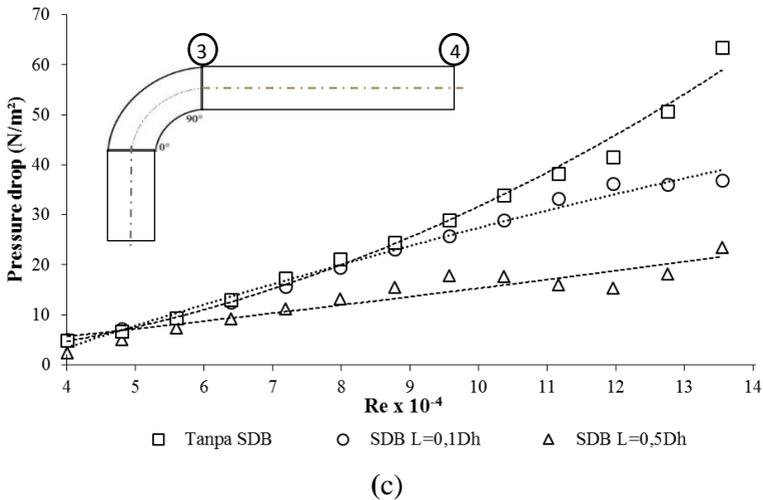
Dengan penambahan *square disturbance body* sebelum memasuki *elbow 90°* maka akan terbentuk *shear layer* (aliran yang terseparasi) dari SDB yang memiliki intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow 90°*, serta mengurangi *blockage area* sehingga momentum aliran utama tidak mengalami penurunan yang besar. Dari gambar 4.1 kita dapat melihat bahwa *pressure drop* saluran mengalami penurunan paling efektif pada penambahan SDB ($l = 0,5D_h$) sebesar 13,2%, hal ini menunjukkan bahwa momentum aliran lebih besar sehingga mampu melawan *adverse pressure* pada sisi *inner elbow 90°*, separasi aliran pada sisi *inner elbow 90°* juga mengalami penundaan, dan *blockage area* berkurang karena mendapatkan momentum aliran tambahan dari SDB tersebut. Sementara pada penambahan SDB ($l = 0,1D_h$) *pressure drop* saluran justru mengalami penambahan sebesar 24,8% dari saluran tanpa SDB. Fenomena ini berkebalikan dengan sebelumnya, yang berarti bahwa aliran pada penambahan SDB ($l = 0,1D_h$) mengalami separasi lebih dulu dibanding saluran tanpa SDB, hal ini menunjukkan bahwa *shear layer* yang terbentuk pada SDB ($l = 0,1D_h$) tidak sempat *attach* pada sisi *inner elbow 90°* untuk menambah momentum aliran, melainkan langsung terseparasi akibat jarak peletakan yang dekat dengan radius kelengkungan sisi *inner elbow 90°*.



(a)



(b)

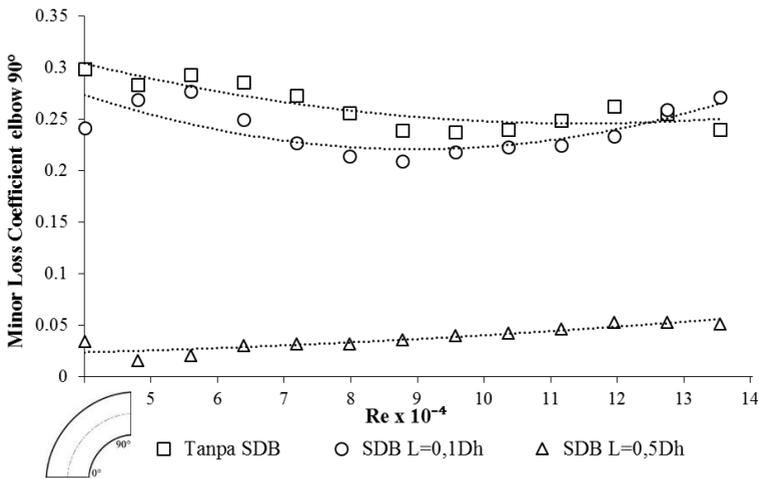


(c)
Gambar 4.2 Grafik *Pressure drop* pada *square duct* (a) titik 1 – 2; (b) titik 2 – 3; (c) titik 3 – 4; dengan variasi jarak peletakan *square disturbance body* terhadap Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$

Pada gambar 4.2 ditampilkan grafik *pressure drop* pada *upstream* (titik 1 – 2), *elbow* 90° (titik 2 – 3), dan *downstream* (titik 3 – 4) terhadap Re_{Dh} . Dapat diperhatikan bahwa pada *upstream* (titik 1 – 2) grafik *pressure drop* dengan penambahan SDB ($l = 0,1D_h$) dan SDB ($l = 0,5D_h$) lebih besar dibanding tanpa SDB, hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan SDB maka *pressure drop* pada *upstream* akan meningkat. Kemudian pada *elbow* 90° (titik 2 – 3) grafik *pressure drop* menunjukkan bentuk yang sama seperti pada gambar 4.1, hal ini semakin memperkuat hipotesa bahwa nilai *pressure drop* pada *elbow* 90° akan turun dengan ditambahkan SDB pada bagian *inlet*. Pada *downstream* (titik 3 – 4) grafik *pressure drop* dengan penambahan SDB ($l = 0,1D_h$) hampir berhimpitan dengan grafik tanpa SDB sampai pada Re_{Dh} $8,74 \times 10^4$, setelah itu terus terus menurun dan lebih rendah dari tanpa SDB sampai Re_{Dh} $13,5 \times 10^5$.

4.2 *Minor Loss Coefficient Elbow 90° pada Square Duct dengan Reynolds Number $3,97 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,35 \times 10^5$*

Sub bab ini menampilkan hasil penelitian berupa grafik pengaruh *square disturbance body* (SDB) dan bilangan Reynolds (Re_{Dh}) terhadap *minor loss coefficient* (K) *elbow 90°*. *Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan SDB sebelum memasuki *elbow 90°*, *gap* SDB tetap (g/d) sebesar 0,2 dan variasi jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°* dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 2. Sedangkan variasi Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$ atau pada kecepatan udara sebesar 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s. Perhitungan didapatkan dari data perbedaan tekanan pada *pressure tap inlet elbow 90°* di *upstream duct* dan *pressure tap outlet elbow 90°* di *downstream duct*.



Gambar 4.3 Grafik *Minor Loss Coefficient elbow 90°* dengan variasi jarak peletakan *square disturbance body* terhadap Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,35 \times 10^5$

Pada gambar 4.3 ditampilkan grafik *minor loss coefficient* (K) *elbow 90°* terhadap Re_{Dh} . Dapat diperhatikan bahwa dengan penambahan SDB maka akan menurunkan nilai *minor loss coefficient* (K) pada *elbow 90°*. Pertama adalah *elbow 90°* tanpa

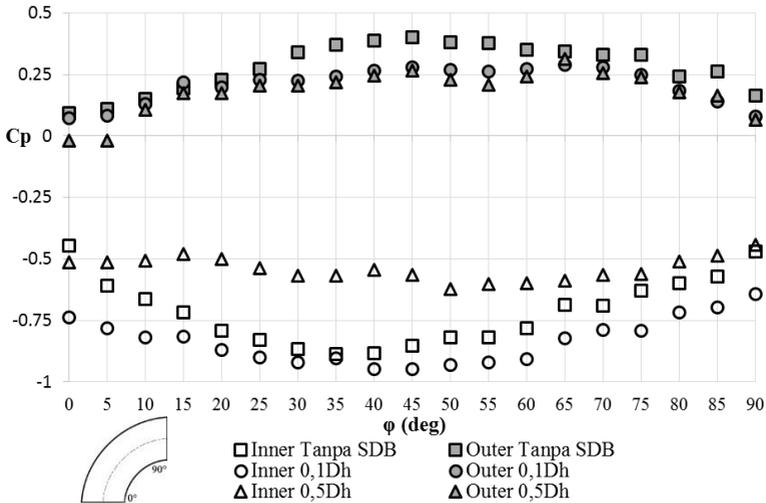
SDB, pada Re_{Dh} terendah nilai *minor loss coefficient* (K) adalah 0,3 dan pada Re_{Dh} tertinggi nilai *minor loss coefficient* (K) sebesar 0,24 dengan rata-rata nilai *minor loss coefficient* (K) mulai dari Re_{Dh} terendah sampai tertinggi adalah 0,26. Kedua adalah *elbow 90°* dengan penambahan SDB ($l = 0,1D_h$), pada Re_{Dh} terendah nilai *minor loss coefficient* (K) adalah 0,24 dan pada Re_{Dh} tertinggi nilai *minor loss coefficient* (K) adalah 0,27 dengan rata-rata nilai *minor loss coefficient* (K) total adalah 0,24. Ketiga adalah *elbow 90°* dengan penambahan SDB ($l = 0,5D_h$), pada Re_{Dh} terendah nilai *minor loss coefficient* (K) adalah 0,03 dan pada Re_{Dh} tertinggi nilai *minor loss coefficient* (K) adalah 0,05 dengan nilai rata-rata *minor loss coefficient* (K) total adalah 0,04.

Headloss minor elbow 90° dipengaruhi oleh nilai *minor loss coefficient* (K), *pressure drop*, dan kecepatan aliran fluida. Sementara peningkatan *minor loss coefficient* (K) disebabkan oleh nilai *pressure drop* yang besar dibandingkan kenaikan kecepatan aliran fluida. Sedangkan penurunan *minor loss coefficient* (K) disebabkan oleh nilai *pressure drop* yang konstan dibandingkan kenaikan kecepatan aliran fluida. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai *minor loss coefficient* (K) menentukan menurun atau meningkatnya nilai *headloss minor elbow 90°*. *Trendline* grafik pada *elbow 90°* tanpa SDB cenderung menurun mulai dari Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai pada Re_{Dh} $1,13 \times 10^5$ kemudian meningkat sampai pada Re_{Dh} $1,35 \times 10^5$. Begitu juga dengan grafik *elbow 90°* dengan penambahan SDB ($l = 0,1D_h$), *trendline* grafik cenderung menurun dari Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai Re_{Dh} $1,13 \times 10^5$ kemudian meningkat sampai Re_{Dh} $1,35 \times 10^5$. Menurunnya nilai *minor loss coefficient* (K) tersebut menunjukkan bahwa pada Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai $1,13 \times 10^5$ kenaikan nilai Re_{Dh} tidak sebanding dengan peningkatan *pressure drop* seperti pada gambar 4.2 (b). Sementara pada grafik *elbow 90°* dengan penambahan SDB ($l = 0,5D_h$) *trendline* grafik cenderung meningkat mulai dari Re_{Dh} $3,97 \times 10^4$ sampai Re_{Dh} $1,35 \times 10^5$, hal ini menunjukkan bahwa peningkatan *pressure drop* seperti pada gambar 4.2 (b) sebanding dengan peningkatan kecepatan aliran fluida. Dari ketiga grafik

yang ditampilkan dapat dilihat bahwa nilai rata-rata *minor loss coefficient* (K) terendah adalah *elbow 90°* dengan penambahan SDB ($l = 0,5D_h$) dengan besar 0,04, hal ini semakin memperkuat hipotesa awal bahwa penambahan SDB pada *inlet elbow 90°* dapat menurunkan nilai *pressure drop* pada *square duct* dengan *elbow 90°*.

4.3 **Pressure Coefficient Elbow 90° pada Square Duct dengan Reynolds Number $8,74 \times 10^4$**

Pada sub bab ini ditampilkan hasil penelitian berupa grafik pengaruh *square disturbance body* dan *Reynolds Number* terhadap *Pressure Coefficient* (C_p) pada *elbow 90°*. Penelitian ini menggunakan *elbow 90°* berpenampang *square*, dengan begitu terdapat kesempatan untuk mengamati berbagai macam karakter aliran fluida dan salah satunya adalah *Pressure Coefficient*. *Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan SDB sebelum memasuki *elbow 90°*, *gap* SDB tetap (g/d) sebesar 0,2 dan variasi jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°* dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 2, dan variasi Re_{Dh} $8,74 \times 10^4$. *Pressure Coefficient* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap freestream* dan *pressure tap outer wall* maupun *inner wall* yang terdapat pada sepanjang dinding melengkung dari *elbow 90°* yang dipasang masing – masing sebanyak 19 *pressure tap* dari $0°$ sampai $90°$ dengan selisih pemasangan antar *pressure tap* setiap kenaikan $5°$.



Gambar 4.4 Distribusi *Pressure Coefficient* pada *Square Elbow* 90° dengan variasi jarak peletakan *square disturbance body* terhadap $Re_{Dh} 8,74 \times 10^4$

Pada gambar 4.4 ditampilkan distribusi *Pressure Coefficient* (C_p) sepanjang sisi *inner* (grafik bagian bawah) dan *outer* (grafik bagian atas) *elbow* 90° terhadap titik sepanjang sisi tersebut tiap 5° dan $Re_{Dh} 8,74 \times 10^4$. Dapat dilihat bahwa distribusi C_p pada sisi *inner* maupun *outer* terjadi perubahan nilai sepanjang penampang melintang baik itu *elbow* 90° tanpa SDB maupun dengan penambahan SDB. *Pressure coefficient* (C_p) terbesar pada sisi *outer elbow* 90° adalah variasi tanpa SDB dengan nilai tertinggi pada puncak grafik sebesar 0,3992. Sedangkan untuk variasi SDB ($l = 0,1D_h$) dan SDB ($l = 0,5D_h$) menunjukkan grafik yang hampir mirip dengan nilai tertinggi pada puncak grafik adalah sebesar 0,2781 dan 0,2652. *Pressure coefficient* (C_p) terkecil pada sisi *inner elbow* 90° adalah SDB ($l = 0,1D_h$) dengan nilai terendah pada dasar grafik sebesar -0,9477, selanjutnya variasi tanpa SDB dengan

nilai terendah $-0,8859$, dan SDB ($l = 0,5D_h$) dengan nilai terendah $-0,6232$.

Penambahan SDB dapat meningkatkan kecepatan di sisi *outer wall* dan mengurangi kecepatan di sisi *inner wall*. Perbandingan Δp dapat ditunjukkan dengan besar ΔC_p pada setiap sudut kelengkungan *elbow* 90° . ΔC_p merupakan selisih dari C_p pada sisi *outer wall* dan sisi *inner wall*. Apabila didapatkan ΔC_p semakin kecil, maka Δp yang dihasilkan juga semakin kecil. Pada gambar 4.4 nilai ΔC_p terbesar untuk variasi tanpa SDB berada pada sudut kelengkungan 40° sebesar $1,2696$. Untuk variasi SDB ($l = 0,1D_h$) nilai ΔC_p terbesar didapatkan pada sudut kelengkungan 45° sebesar $1,2258$. Sementara pada variasi SDB ($l = 0,5D_h$) nilai ΔC_p terbesar berada pada sudut kelengkungan 65° sebesar $0,9013$. Dari perbandingan ketiga variasi diketahui bahwa nilai terkecil adalah pada SDB ($l = 0,5D_h$), hal ini semakin memperkuat hipotesa awal bahwa penambahan SDB dapat menurunkan *pressure drop* pada *square duct*.

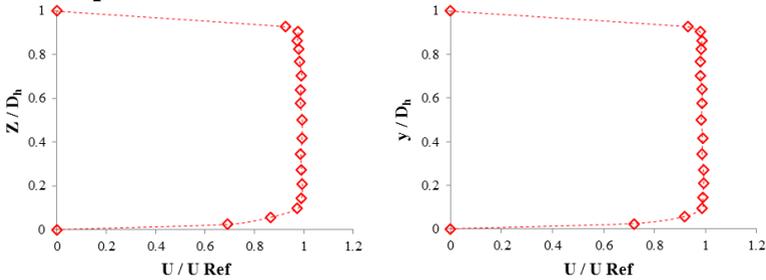
Fenomena aliran yang terjadi pada *elbow* 90° dapat dilihat berdasarkan gambar 4.4. Ketika aliran melewati sebuah *elbow* 90° maka aliran tersebut akan mengalami fenomena seperti ketika aliran melewati sebuah *diffuser* dan *nozzle*. Aliran yang melewati sisi *inner* mengalami fenomena seperti melalui *nozzle* pada sudut 0° sampai 45° , dimana pada sudut tersebut terjadi penurunan nilai C_p yang menandakan terjadinya penurunan tekanan dan kenaikan kecepatan aliran. Sebaliknya, ketika aliran melewati sudut 50° sampai 90° seolah-olah aliran melewati sebuah *diffuser* yang ditandai dengan kenaikan nilai C_p yang menandakan kenaikan tekanan dan penurunan kecepatan. Pada sisi *outer* mulai sudut 0° hingga 45° terjadi kenaikan nilai C_p yang berarti tekanan juga meningkat dan kecepatan aliran menurun seolah-olah memasuki sebuah *diffuser*, sebaliknya mulai sudut 50° sampai 90° terjadi penurunan nilai C_p yang juga menandakan penurunan tekanan dan kenaikan kecepatan seperti pada sebuah *nozzle*. Fenomena aliran seperti dijelaskan diatas terjadi pada semua variasi baik tanpa SDB maupun dengan penambahan SDB. Selain itu distribusi C_p pada

bagian *outer wall* memiliki bentuk yang mirip untuk semua variasi, sehingga dapat dikatakan bahwa penambahan SDB sebagian besar hanya berpengaruh pada bagian *inner wall*. Fenomena lain yang terjadi pada sisi *inner* adalah adanya *reatachment*, yaitu terjadinya tumbukan dari *shear layer* yang diakibatkan oleh penambahan SDB dimana *shear layer* tersebut dapat meningkatkan momentum untuk melawan *advers pressure* pada sisi *inner wall*. Pada keluaran *elbow 90°* tanpa SDB juga terdapat fenomena dimana tekanan pada bagian *outer* dan *inner* lebih besar dibandingkan dengan penambahan SDB. Hal tersebut terjadi karena aliran pada saluran terganggu akibat penambahan SDB.

4.4 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada bagian *Upstream* dan *Downstream* dengan $Re_{D_h} = 8,74 \times 10^4$

Pada sub bab ini ditampilkan hasil penelitian berupa profil kecepatan bidang horizontal dan vertikal pada bagian *upstream* dan *downstream square duct. Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan SDB sebelum memasuki *elbow 90°*, *gap* SDB tetap (*g/d*) sebesar 0,2 dan variasi jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°* dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 2, dan variasi Re_{D_h} $8,74 \times 10^4$. Profil kecepatan merupakan bilangan tak berdimensi yang terdiri dari perbandingan z/D_h pada *ordinat* horizontal atau y/D_h pada *ordinat* vertikal dan u/u_{ref} pada *absis*. Besar z/D_h atau y/D_h bernilai nol pada posisi tepat di *inner square duct* dan bernilai 1 pada posisi tepat di *outer square duct*. Sedangkan besar u/u_{ref} bergantung pada besar profil kecepatan pada suatu titik. Profil kecepatan pada sisi *upstream straight duct* digunakan sebagai acuan untuk menentukan gambaran proses *recovery* profil kecepatan daerah *downstream*.

4.4.1 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal bagian *Upstream*



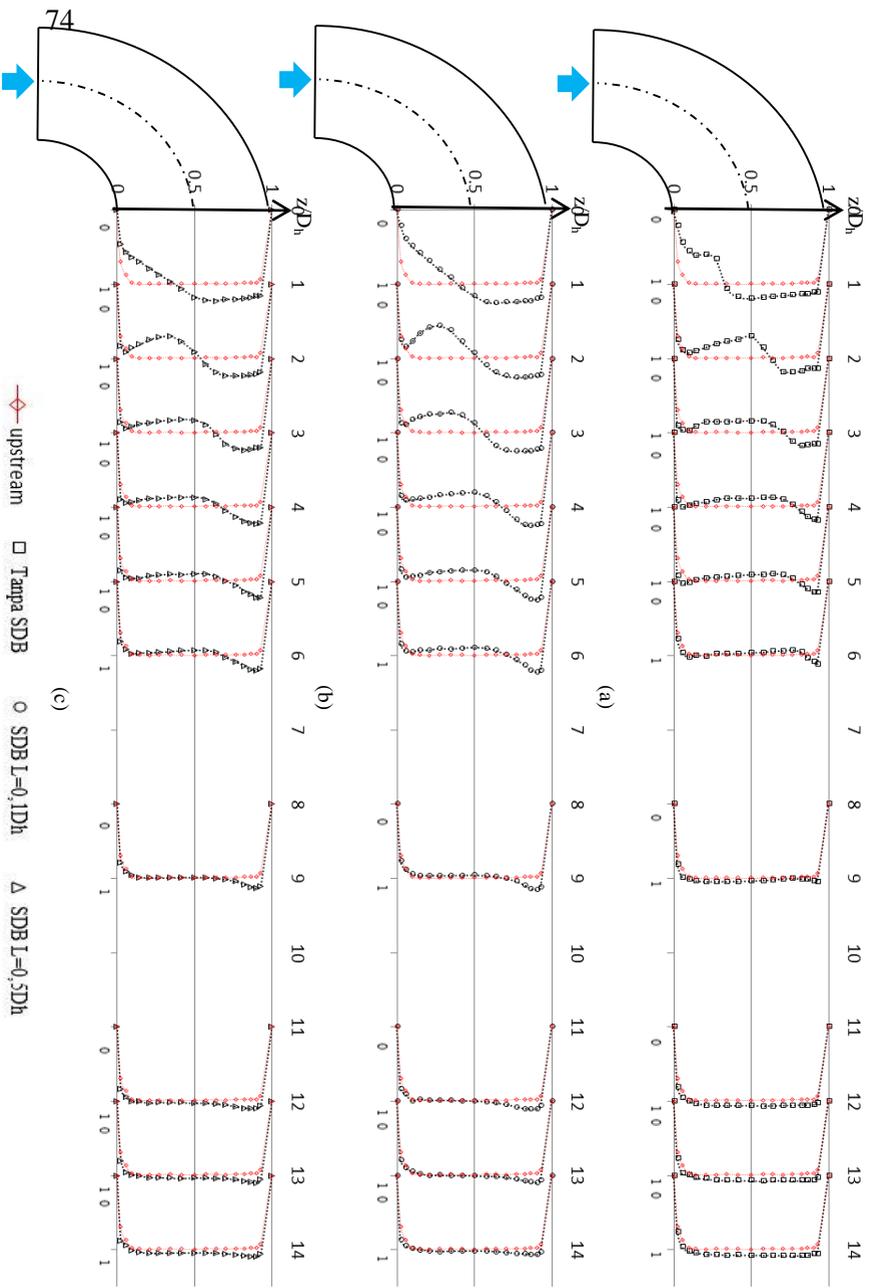
Gambar 4.5 Grafik profil kecepatan (a) bidang horizontal bagian *upstream* (b) bidang vertikal bagian *upstream*

Pada gambar 4.5 ditampilkan profil kecepatan pada bagian *upstream* (a) bidang horizontal dan (b) bidang vertikal. Dari gambar 4.5 (a) dapat dilihat bahwa pada sisi *inner upstream* dengan z/D_h 0 dan 1 memiliki nilai u/U_{ref} sebesar nol. Hal ini menandakan bahwa aliran yang berada tepat pada dinding baik sisi *inner* maupun sisi *outer* memiliki kecepatan nol. Kemudian terlihat profil kecepatan bergerak seragam dan telah berkembang dengan sempurna (*fully developed flow*) pada posisi z/D_h 0,02 sampai 0,9. Profil kecepatan *upstream* ini dijadikan acuan pengukuran pada bagian *downstream* bidang horizontal. Serupa dengan sebelumnya, pada gambar 4.5 (b) juga dapat dilihat bahwa sisi *lower upstream* dengan $y/D_h=0$ dan sisi *upper* dengan $y/D_h=1$ memiliki nilai u/U_{ref} sebesar nol. Kemudian profil kecepatan bergerak seragam telah berkembang dengan sempurna (*fully developed flow*) pada posisi y/D_h 0,02 sampai 0,9. Profil kecepatan ini dijadikan acuan pengukuran pada bagian *downstream* bidang vertikal.

4.4.2 Profil Kecepatan Bidang Horizontal bagian *Downstream*

Profil kecepatan bidang horizontal pada bagian *downstream* diambil dari data pada *section* 1 ($x/D_h=0$), 2 ($x/D_h=1$), 3 ($x/D_h=2$), 4 ($x/D_h=3$), 5 ($x/D_h=4$), 6 ($x/D_h=5$), 9 ($x/D_h=8$), 12 ($x/D_h=11$), 13 ($x/D_h=12$), dan 14 ($x/D_h=13$). Pengambilan data pada setiap *section*

terdiri dari 17 titik dari sisi *inner* sampai sisi *outer square duct*. *Elbow 90°* divariasikan tanpa dan dengan SDB sebelum memasuki *elbow 90°*, *gap* SDB tetap (g/d) sebesar 0,2 dan variasi jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°* dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 2, dan $Re_{D_h} 8,74 \times 10^4$. Analisa profil kecepatan bidang horizontal secara dua dimensi sepanjang *downstream*. Profil kecepatan adalah bilangan tak berdimensi yang bernilai 0 sampai 1 pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan u/U_{ref} pada ordinat. Pada setiap section, aliran *freestream* digunakan sebagai acuan aliran sudah melalui proses *recovery*.



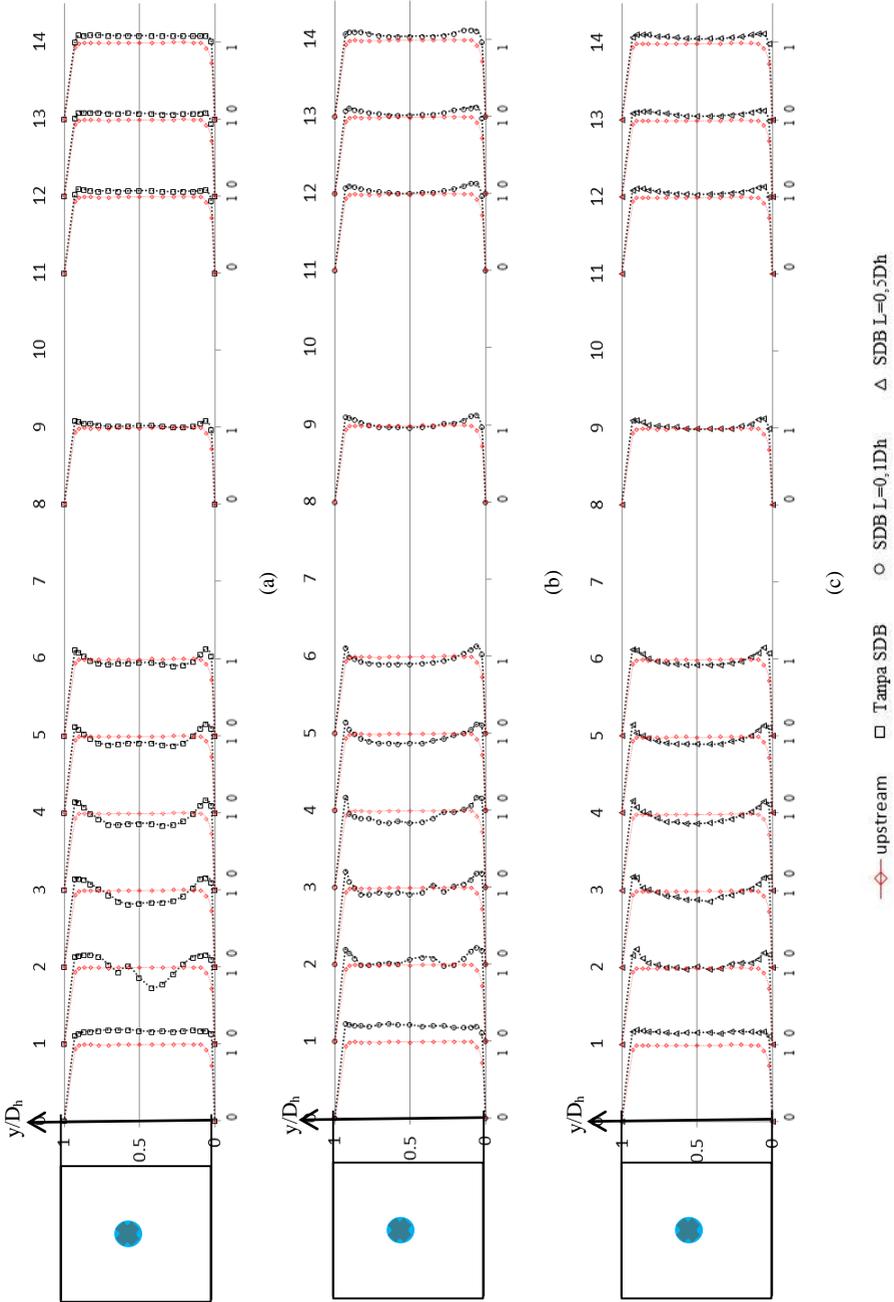
Gambar 4.6 Profil kecepatan bidang horizontal sepanjang *downstream* pada masing-masing posisi *cross-section* (a) Tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); (c) SDB ($l = 0,5D_h$)

Pada gambar 4.6 ditampilkan profil kecepatan bidang horizontal sepanjang *downstream* pada masing-masing *cross-section* untuk variasi (a) tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); dan (c) SDB ($l = 0,5D_h$). Secara umum profil kecepatan mengalami perubahan setelah *outlet elbow 90°* dibanding pada *upstream*. Perbedaan signifikan antara kecepatan sisi *inner* dan *outer* terlihat saat aliran telah melewati *elbow 90°*, sisi *inner* mulai mengalami separasi aliran yang menyebabkan terjadinya pengurangan kecepatan, sedangkan pada sisi *outer* aliran mengarah tangensial ke arah sisi *inner* akibat dari perbedaan tekanan yang diakibatkan radius kelengkungan *elbow 90°*. Hal tersebut dapat menyebabkan *blockage effect* dan aliran terbesar pada *centreline* seperti terlihat pada gambar 4.6. Pada *section 1* ($x/D_h=0$), kecepatan tertinggi di sisi *outer* secara berturut-turut terdapat pada gambar (b), kemudian (c), dan terakhir (a) sedangkan di sisi *inner* kecepatan tertinggi pada gambar (c), kemudian (b), dan terakhir (a), hal itu menandakan bahwa separasi aliran yang terjadi di sisi *inner* pada (c) lebih tertunda karena mendapat tambahan momentum aliran untuk melawan *adverse pressure* akibat dari penambahan SDB. Pada *section 2* ($x/D_h=1$) dapat dilihat terjadi *backflow* yang kuat di *centreline* untuk gambar (a), sementara pada gambar (b) dan (c) *backflow* terjadi pada sisi *inner*. Hal tersebut menandakan dengan penambahan *square disturbance body* cukup memberikan agitasi pada aliran yang melaluinya, dimana kecenderungan aliran akan melewati sisi yang tidak dipasang *square disturbance body*, yaitu sisi *outer* sehingga mengakibatkan sebagian aliran yang mengalir pada sisi *inner* berpindah menuju sisi *outer* dengan kecepatan yang tinggi. Selain itu, fenomena tersebut juga dipengaruhi oleh adanya *shear layer* (aliran yang terseparasi) dari *square disturbance body* yang mempunyai intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk menambah momentum aliran melawan *adverse pressure* di sisi

inner. Kemudian pada *section* 3 ($x/D_h=2$), 4 ($x/D_h=3$), 5 ($x/D_h=4$), dan 6 ($x/D_h=5$) *secondary flow* yang sebelumnya kuat di sisi *inner* secara berangsur-angsur telah merambat ke sisi *outer* seiring dengan berkurangnya kecepatan pada sisi *outer*, dengan demikian *backflow* pada bagian tengah penampang (*centerline*) semakin berkurang seperti terlihat pada ketiga gambar. Pada *section* 3, 4, dan 5 di sisi *outer*, kecepatan tertinggi terdapat pada gambar (b), sedangkan pada sisi *inner* kecepatan tertinggi terdapat pada gambar (c) yang menandakan bahwa momentum aliran di sisi *inner* gambar (c) lebih tinggi dibanding yang lain. Pada *section* 9 ($x/D_h=8$) atau setelah melewati *elbow* 90° sejauh $8D_h$, mulai terjadi *recovery* di sisi *outer*, *centerline*, dan sisi *inner* baik pada gambar (a), (b), maupun (c). Selanjutnya pada *section* 12 ($x/D_h = 11$) dan 13 ($x/D_h = 12$) semua aliran pada ketiga gambar sudah mendekati profil kecepatan yang berkembang secara penuh (*fully developed flow*) seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*, hanya masih terdapat sedikit aliran yang lebih besar pada sisi *outer*. Barulah pada *section* 14 ($x/D_h=13$) ketiga gambar telah membentuk aliran yang berkembang penuh (*fully developed flow*) seperti pada *upstream*.

4.4.3 Profil Kecepatan Bidang Vertikal bagian *Downstream*

Sama seperti sebelumnya, profil kecepatan bidang vertikal pada bagian *downstream* diambil dari data pada *section* 1 ($y/D_h=0$), 2 ($y/D_h=1$), 3 ($y/D_h=2$), 4 ($y/D_h=3$), 5 ($y/D_h=4$), 6 ($y/D_h=5$), 9 ($y/D_h=8$), 12 ($y/D_h=11$), 13 ($y/D_h=12$), dan 14 ($y/D_h=13$). Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari sisi *lower* sampai sisi *upper square duct*. *Elbow* 90° divariasikan tanpa dan dengan SDB sebelum memasuki *elbow* 90° , *gap* SDB tetap (g/d) sebesar 0,2 dan variasi jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dari *inlet elbow* 90° dengan rasio kelengkungan tetap (R/D_h) sebesar 2, dan $Re_{Dh} 8,74 \times 10^4$.



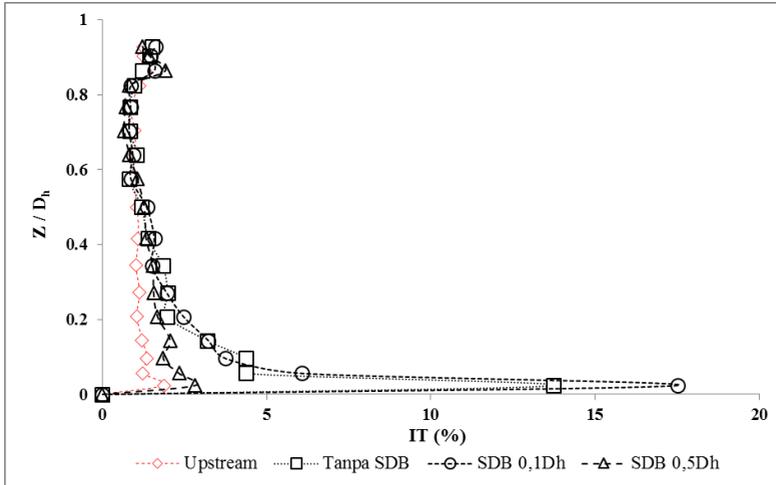
Gambar 4.7 Profil kecepatan bidang vertikal sepanjang *downstream* pada masing-masing posisi *cross-section* (a) Tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); (c) SDB ($l = 0,5D_h$)

Pada gambar 4.7 ditampilkan profil kecepatan bidang vertikal sepanjang *downstream* pada masing-masing *cross-section* untuk variasi (a) tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); dan (c) SDB ($l = 0,5D_h$). Secara umum profil kecepatan mengalami perubahan setelah *outlet elbow 90°* dibanding pada *upstream*. Pada *section 1* ($y/D_h=0$) atau saat aliran meninggalkan *outlet elbow 90°*, profil kecepatan mengalami perkembangan penuh baik gambar (a), (b), ataupun (c). Pada posisi ini kecepatan pada sisi *lower* maupun sisi *upper* lebih besar dibandingkan kecepatan pada *upstream*. Kecepatan tertinggi dari ketiga gambar terdapat pada gambar (b). Pada *section 2* ($y/D_h=1$) dapat dilihat terjadi *backflow* yang kuat di sekitar sisi *upper* hingga sisi *centerline* pada gambar (a). Hal tersebut terjadi karena adanya *secondary flow* sebagai akibat aliran melalui *fitting elbow 90°*. Sementara pada gambar (b) dan (c) *backflow* tidak terlihat dan kecepatan pada sisi *lower* dan *upper* terlihat lebih besar dibanding *centerline*, fenomena ini dapat diartikan bahwa penambahan *square disturbance body* sebagai bodi pengganggu pada saluran efektif untuk mengurangi *blockage area* dibandingkan saluran tanpa *square disturbance body*. Kemudian pada *section 3* ($y/D_h=2$) dan 4 ($y/D_h=3$), mulai terlihat *backflow* pada ketiga gambar di daerah *centreline*. Gambar (a) mengalami peningkatan intensitas *backflow*, sementara gambar (b) dan (c) yang sebelumnya tidak terlihat *backflow* pada *section* ini mulai muncul, hal ini diakibatkan *secondary flow* mulai merambat ke sisi *lower*. Pada *section 5* ($y/D_h=4$), dan 6 ($y/D_h=5$) terlihat ketiga gambar menunjukkan profil aliran yang berangsur-angsur mulai mengalami *recovery*, namun masih terlihat sedikit *backflow* pada *centerline*. Baru pada *section 9* ($y/D_h=8$) atau setelah melewati *elbow 90°* sejauh $8D_h$, *recovery* aliran pada ketiga gambar semakin baik, dengan kecepatan pada sisi *lower* dan *upper* yang masih lebih tinggi dibanding *centerline*. Kecepatan pada sisi *lower*

dan *upper* tertinggi ada pada gambar (c), hal ini menunjukkan bahwa penambahan SDB ($l = 0,5D_h$) paling efektif dalam mengagitas aliran. Selanjutnya pada *section* 12 ($y/D_h = 11$) dan 13 ($y/D_h = 12$) semua aliran pada ketiga gambar sudah mendekati profil kecepatan yang berkembang secara penuh (*fully developed flow*) seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*, hanya masih terdapat sedikit aliran yang lebih besar pada sisi *lower dan upper*. Barulah pada *section* 14 ($y/D_h=13$) ketiga gambar telah membentuk aliran yang berkembang penuh (*fully developed flow*) seperti pada *upstream*.

4.5 Intensitas Turbulensi Bidang Horizontal pada Outlet Elbow 90° dengan Reynolds Number $8,74 \times 10^4$

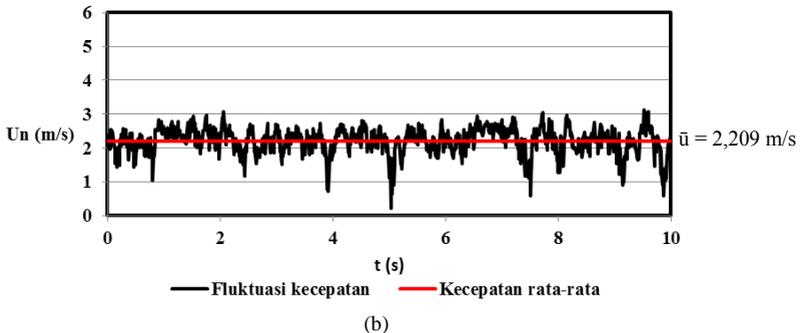
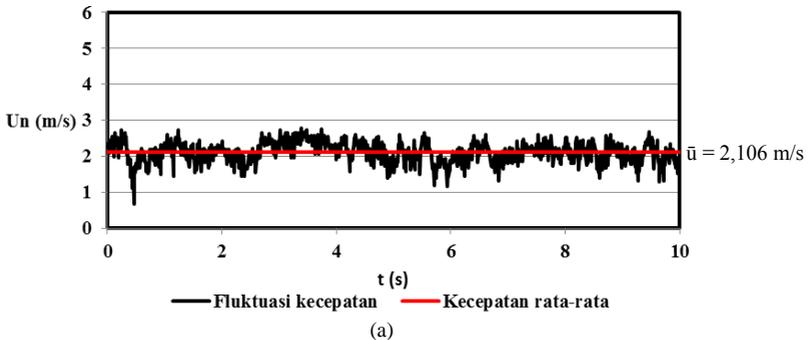
Pada sub bab ini ditampilkan hasil penelitian berupa Intensitas turbulensi (IT) bidang horizontal. Intensitas Turbulensi (IT) bidang horizontal diambil pada bagian *upstream*, yang digunakan sebagai acuan, dan pada *outlet elbow 90°* atau pada *section 1* ($x/D_h=0$) untuk mengetahui gambaran momentum aliran dengan Re_{Dh} $8,74 \times 10^4$. Pengambilan data dilakukan menggunakan alat *DAQ PRO* pada titik-titik mulai dari sisi *inner* sampai *outer* sebanyak 17 titik, dan rentang waktu 10 detik untuk tiap pengambilan data yang menghasilkan kurang lebih 1000 data. Intensitas turbulensi merupakan bilangan tak berdimensi bernilai 0 sampai 1, hasil dari perbandingan *root mean square* dari fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (u_{avg}) dan dinyatakan dalam bentuk prosentase. Intensitas turbulensi akan ditampilkan dalam bentuk grafik dengan absis yang menunjukkan prosentase (%) intensitas turbulensi (IT) terhadap ordinat yang menunjukkan z/D_h .

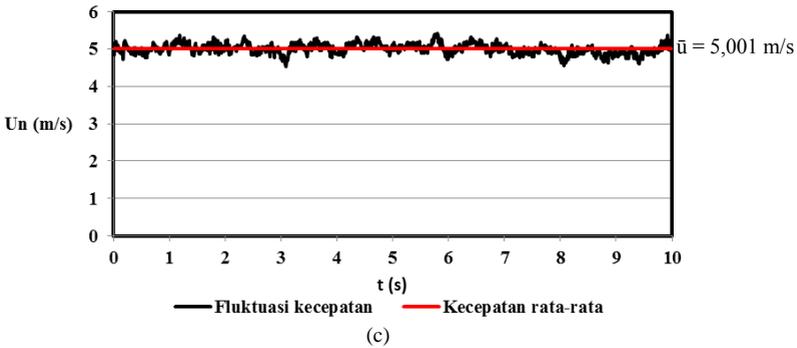


Gambar 4.8 Intensitas Turbulensi (IT) bidang horizontal pada *outlet elbow 90°* ($x/D_h=0$)

Pada gambar 4.8 ditampilkan grafik intensitas turbulensi (IT) bidang horizontal pada *outlet elbow 90°* ($x/D_h=0$) dengan Re_{D_h} $8,74 \times 10^4$. Dapat dilihat pada gambar 4.8 bahwa intensitas turbulensi (IT) pada sisi *inner* dan sisi *outer* berbeda. Pada sisi *outer* dapat dilihat distribusi IT terlihat datar dan mirip untuk semua variasi baik tanpa SDB dan dengan SDB. Pada sisi *outer* distribusi IT semua variasi juga mirip IT pada *upstream*, hal ini menunjukkan tidak ada peningkatan IT yang signifikan pada sisi *outer* baik tanpa SDB maupun dengan penambahan SDB. Sementara pada sisi *inner* posisi $z/D_h = 0,024$, IT menunjukkan peningkatan yang signifikan untuk variasi tanpa SDB sebesar 13% dan SDB ($l = 0,1D_h$) sebesar 17%. Tetapi pada variasi SDB ($l = 0,5D_h$) di sisi *inner*, IT hanya mengalami peningkatan yang sedikit yaitu sebesar 2,8%. Hal tersebut terjadi karena posisi peletakan SDB ($l = 0,5D_h$) adalah jarak paling jauh dibanding yang lain dari posisi pengukuran yaitu pada *otlet elbow 90°* ($x/D_h=0$), sehingga dapat digambarkan aliran yang melewati SDB ($l = 0,5D_h$) pada sisi *inner* sudah mengalami pengurangan intensitas turbulensi yang

besar ketika sampai di titik pengukuran ($x/D_h=0$) dibandingkan dengan variasi yang lain. Hasil ini sedikit berkebalikan dengan penelitian yang dilakukan oleh **Hardian(2017)** dimana pada penelitiannya dikatakan, peletakan IDB yang paling optimal pada *square duct* berbanding lurus dengan tingginya intensitas turbulensi pada variasi tersebut. Semakin tinggi intensitas turbulensi maka fluktuasi kecepatan pada variasi tersebut juga semakin tinggi. Sementara pada penelitian kali ini intensitas turbulensi pada peletakan SDB paling optimal yaitu SDB ($l = 0,5D_h$) justru paling rendah, namun memiliki fluktuasi kecepatan dengan rata-rata yang paling besar dibanding variasi yang lain, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9.





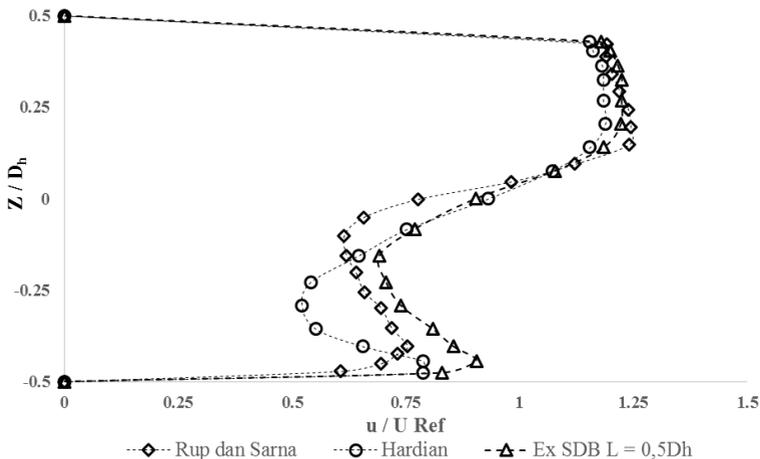
Gambar 4.9 Fluktuasi kecepatan bidang horizontal posisi $x/D_h = 0$ dan $z/D_h = 0,024$ pada variasi (a) tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); dan (c) SDB ($l = 0,5D_h$)

Pada gambar 4.9 ditampilkan fluktuasi kecepatan terhadap waktu, bidang horizontal pada *outlet elbow 90°* ($x/D_h = 0$) untuk variasi (a) tanpa SDB; (b) SDB ($l = 0,1D_h$); dan (c) SDB ($l = 0,5D_h$). Waktu pengambilan data pada satu titik selama 10 detik dengan jumlah data yang didapatkan adalah 1000 data. Dapat dilihat pada gambar 4.9 (a) fluktuasi kecepatan bidang horizontal posisi $x/D_h = 0$ dan $z/D_h = 0,024$ memiliki nilai tertinggi sekitar 2,8 m/s, nilai terendah sekitar 0,8 m/s, dan kecepatan rata-rata 2,106 m/s, serta u' sebesar 0,28. Sementara pada gambar 4.9 (b) fluktuasi kecepatan bidang horizontal posisi $x/D_h = 0$ dan $z/D_h = 0,024$ memiliki nilai tertinggi sekitar 3,1 m/s, nilai terendah sekitar 0,3 m/s, dan kecepatan rata-rata 2,209 m/s, serta u' sebesar 0,38. Hasil dengan fluktuasi kecepatan paling tinggi didapatkan pada gambar 4.8 (c) dengan nilai tertinggi sekitar 5,4 m/s, nilai terendah sekitar 4,5 m/s, dan kecepatan rata-rata 5,001 m/s, serta u' sebesar 0,14. Hal tersebut menunjukkan pada saluran menggunakan *square disturbance body* dengan jarak $0,5D_h$ memiliki nilai kecepatan rata-rata paling tinggi diantara ketiga variasi. Sehingga dapat digambarkan bahwa aliran pada *outlet elbow 90°* ($x/D_h = 0$) di sisi *inner* memiliki momentum paling besar pada gambar 4.9 (c) atau

square duct dengan penambahan SDB ($l = 0,5D_h$). Hasil ini semakin memperkuat hipotesa awal bahwa penambahan SDB pada *square duct* efektif menambah momentum aliran untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner*, serta menurunkan *pressure drop* dengan peletakan paling optimal pada SDB ($l = 0,5D_h$).

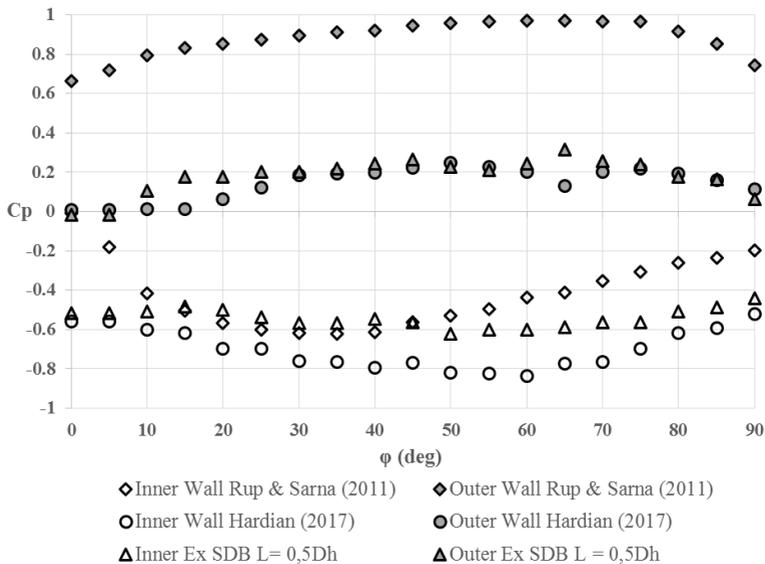
4.6 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°*

Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang perbedaan hasil eksperimen dengan hasil pada penelitian terdahulu yang mempunyai topik dan tujuan yang sama dalam pelaksanaan penelitiannya. Penelitian yang akan dibandingkan adalah hasil penelitian dari Rup dan Sarna (2011) dan Hardian (2017). Seperti sebelumnya, pada sub bab ini akan diberikan distribusi profil kecepatan hasil penelitian yang dibandingkan dengan distribusi profil kecepatan dari peneliti terdahulu pada posisi yang sama yaitu $x/D_h=0$, dan membandingkan nilai *pressure coefficient* pada *elbow 90°*.



Gambar 4.10 Perbandingan profil kecepatan dengan penelitian terdahulu

Pada gambar 4.10 ditampilkan distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *outlet elbow* 90° ($x/D_h = 0$) hasil dari perbandingan penelitian kali ini dengan hasil dari peneliti terdahulu. Penelitain Rup dan Srana (2011) menggunakan *square duct* dengan diameter hidrolis (D_h) sebesar 80 mm, rasio kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) sebesar 2, dan panjang *upstream* sepanjang $20D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $20D_h$. Sementara penelitain Hardian (2017) menggunakan *square duct* dengan diameter hidrolis (D_h) sebesar 125 mm, rasio kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) sebesar 1,5 dan panjang *upstream* sepanjang $7D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $15D_h$. Data yang dibandingkan dari penelitian Hardian (2017) adalah hasil variasi IDB yang paling optimal, yaitu penempatan IDB pada $l = 0,1D_h$. Sedangkan data yang dibandingkan dari penelitian ini adalah *square duct* dengan penempatan SDB paling optimal yaitu SDB ($l = 0,5D_h$). Dapat dilihat pada gambar 4.10 bahwa terlihat bentuk distribusi kecepatan yang identik antara hasil penelitian ini dengan hasil penelitian oleh Rup dan Sarna (2011), dan Hardian (2017). Pada sisi *outer*, terjadi percepatan pada masing – masing distribusi profil kecepatan, sedangkan pada sisi *inner* terlihat terjadi defisit momentum yang mengakibatkan *blockage* area pada sisi *inner*. Kecepatan aliran paling tinggi pada daerah *outer* terjadi pada profil kecepatan penelitian yang dilakukan oleh Rup dan Sarna, sedangkan kecepatan aliran paling tinggi pada sisi *inner* terjadi pada eksperimen kali ini, yaitu tanpa SDB ($l = 0,5D_h$). Perbedaan distribusi profil kecepatan yang terlihat disebabkan oleh perbedaan dimensi instalasi penelitian dan properti fluida yang digunakan di dalam saluran pada masing – masing penelitian. Untuk properti fluida pada penelitian ini dan penelitian Hardian (2017), pengukuran profil kecepatan menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $8,74 \times 10^4$, sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Rup dan Sarna (2011) menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $4,00 \times 10^4$.



Gambar 4.11 Perbandingan *pressure coefficient* dengan penelitian terdahulu

Pada gambar 4.11 ditampilkan *pressure coefficient* sepanjang *elbow* 90° hasil dari perbandingan penelitian kali ini dengan hasil dari peneliti terdahulu. Seperti sebelumnya terdapat perbedaan *pressure coefficient* antara hasil penelitian ini dan hasil penelitian terdahulu oleh Rup dan Sarna (2011), dan Hardian (2017). Pengukuran *pressure coefficient* yang dilakukan oleh Rup dan Sarna menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $9,21 \times 10^4$, sedangkan pada penelitian ini dan penelitian Hardian (2017) digunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $8,74 \times 10^4$. Terlihat bahwa pada gambar 4.11, nilai *pressure coefficient* pada Rup dan Sarna (2011) baik pada sisi *inner* maupun sisi *outer* memiliki nilai *pressure coefficient* yang lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian ini. Pada penelitian Rup & Sarna (2011) didapatkan ΔC_p terbesar pada sudut 35° sebesar 1,53. Sementara penelitian Hardian (2017) memiliki hasil yang hamper mirip dengan penelitian ini pada sisi

outer, dan lebih rendah pada sisi *inner*. Pada penelitian Hardian (2017) didapatkan ΔC_p terbesar pada sudut 50° sebesar 1,06. Hasil penelitian kali ini didapatkan ΔC_p terbesar pada sudut 65° sebesar 0,9. Dari perbandingan ketiga penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa penelitian kali ini paling optimal karena memiliki nilai ΔC_p terkecil, dimana menandakan *pressure drop* yang terjadi pada *elbow* 90° dengan penambahan SDB ($l = 0,5D_h$) paling kecil diantara ketiga penelitian.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan dibahas pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan *square disturbance body* sebagai bodi pengganggu dapat menurunkan nilai *pressure drop* dibandingkan dengan tanpa menggunakan *square disturbance body*, namun untuk beberapa variasi nilai *pressure drop* justru lebih besar. Penurunan nilai *pressure drop* paling optimal pada variasi SDB $l = 0,5D_h$, yang mampu menurunkan nilai rata-rata *pressure drop* sebesar 13,2%. Sedangkan pada variasi SDB ($l = 0,1D_h$) justru mengalami peningkatan *pressure drop* sebesar 24,8%.
2. Penambahan *square disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *minor loss coefficient elbow 90°* yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan *square disturbance body*. Pada variasi SDB ($l = 0,1D_h$) memiliki nilai rata-rata *minor loss coefficient elbow 90°* sebesar 0,24. Sementara variasi SDB ($l = 0,5D_h$) memiliki rata-rata nilai *minor loss coefficient elbow 90°* paling rendah sebesar 0,04.
3. Perbedaan nilai *Pressure Coefficient* cukup signifikan terjadi pada *elbow 90°* dengan saluran tanpa *square disturbance body* dan dengan *square disturbance body*. Perbedaan tersebut terjadi pada sisi *inner* maupun sisi *outer elbow 90°* di setiap variasi penambahan *square disturbance body*. Didapatkan bahwa ΔC_p variasi SDB ($l = 0,1D_h$) terbesar didapatkan pada sudut kelengkungan 45° sebesar 1,2258. Sementara pada variasi SDB ($l = 0,5D_h$) nilai ΔC_p terbesar berada pada sudut kelengkungan 65° sebesar 0,9013. Hal tersebut mengindikasikan bahwa *pressure drop* yang ada pada *elbow 90°* dengan penambahan SDB ($l =$

$0,5D_h$) lebih kecil dibandingkan dengan SDB ($l = 0,1D_h$) maupun tanpa penambahan *square disturbance body*.

4. Pengamatan profil kecepatan dilakukan pada bidang horizontal dan vertikal menunjukkan bahwa dengan penambahan SDB, *recovery* aliran pada bagian *downstream* dapat terjadi lebih cepat. Pada sisi *inner*, terjadi perlambatan aliran karena adanya *backflow* yang ditimbulkan oleh separasi aliran. Penambahan SDB dapat menyebabkan penundaan separasi aliran karena *shear layer* yang dihasilkan SDB memberikan momentum aliran yang lebih kuat untuk melawan *advers pressure*. Serta dapat diamati pula intensitas turbulensi pada sisi *inner outlet elbow 90°* tertinggi terjadi pada saluran dengan penambahan SDB ($l = 0,1D_h$) sebesar 17%, dan nilai intensitas turbulensi terendah pada SDB ($l = 0,5D_h$) sebesar 2,8%. Meskipun begitu nilai rata-rata kecepatan pada *outlet elbow 90°* pada SDB ($l = 0,5D_h$) paling tinggi dibanding variasi lain, yaitu sebesar 5,001 m/s.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

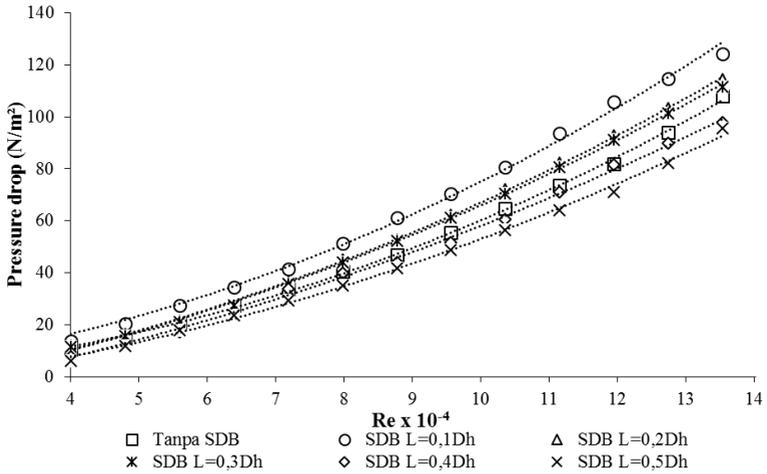
1. Diperlukan adanya peremajaan instalasi penelitian maupun alat ukur untuk menunjang keakuratan pengambilan data.
2. Pengaturan suhu, kelembapan, dan kebersihan lingkungan kerja diperlukan agar pengganggu tidak mempengaruhi proses pengambilan data.
3. Diperlukan simulasi numerik (CFD) untuk memperkuat hasil penelitian yang telah dilakukan dan melihat fenomena lain yang tidak bisa dilihat pada penelitian ini.
4. Diperlukan adanya penelitian dengan variasi penambahan *disturbance body* dalam bentuk yang lain agar dapat menambahkan dan memperlengkap hasil penelitian tentang *square duct* dengan *elbow 90°* yang ditambahkan *disturbance body* sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

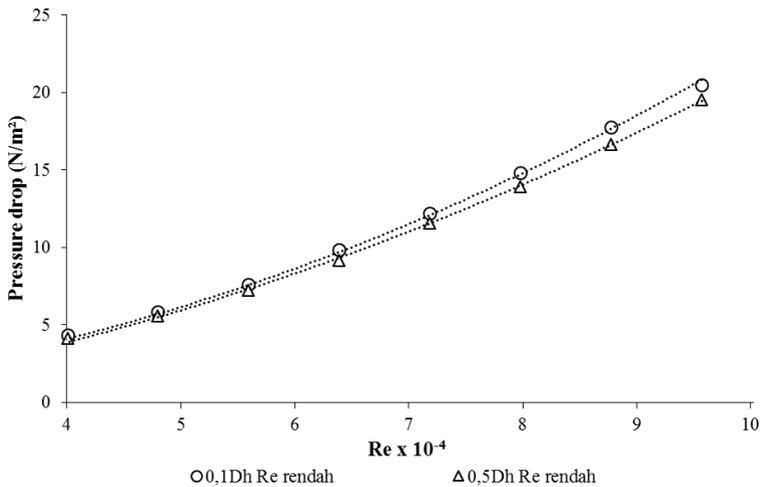
- [1] Deng, Shi-Ming, & Burnett, John. "A Study of Energy Performance of Hotel Buildings in Hong Kong". **Energy and Buildings** 31, 7-12. **2000**.
- [2] Dutta, Prasun & Nandi, Nityananda. "Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends". **Mechanics and Mechanical Engineering** Vol. 19, No 1, 5–16. **2015**.
- [3] Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition**. New York : John Wiley & Sons Inc.
- [4] Hardian, Aqhfa, S. F . 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Jarak Inlet Disturbance Body Terhadap Aliran Melalui Square Duct Dengan Elbow 90°**. Tugas Akhir, Teknik Mesin ITS Surabaya.
- [5] Ozgoren, Muammer. "Flow Structure in The Downstream of Square and Circular Cylinders". **Flow Measurement and Instrumentation** 17, 225-235. **2006**.
- [6] Rup, K., & Sarna, P. "Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow". **Flow Measurement and Instrumentation** 22, 383-391. **2011**.
- [7] Samani, M., & Bergstrom, D. J. "Effect of a Wall On The Wake Dynamics of an Infinite Square Cylinder". **International Journal of Heat and Fluid Flow** 55, 158-166. **2015**.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

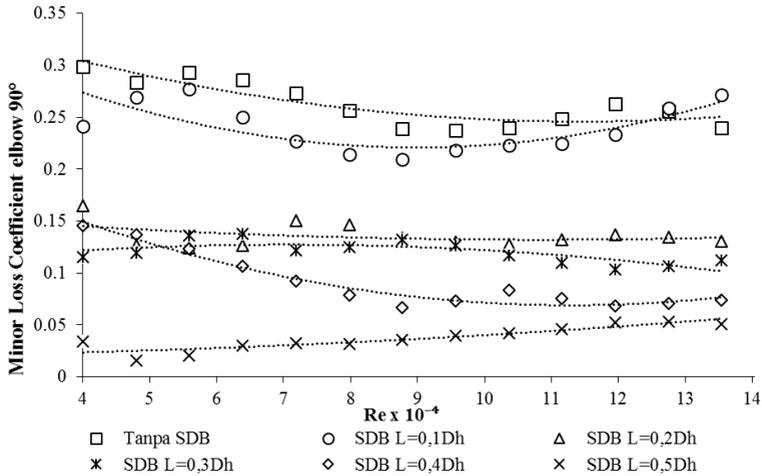
LAMPIRAN



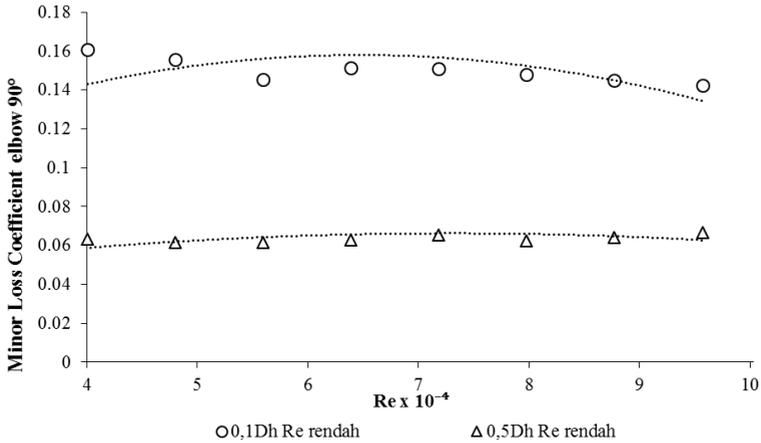
Gambar 1. *Pressure drop* tanpa SDB, $l = 0,1D_h$; $l = 0,2D_h$; $l = 0,3D_h$; $l = 0,4D_h$; dan $l = 0,5D_h$ dengan $3,97 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,35 \times 10^5$



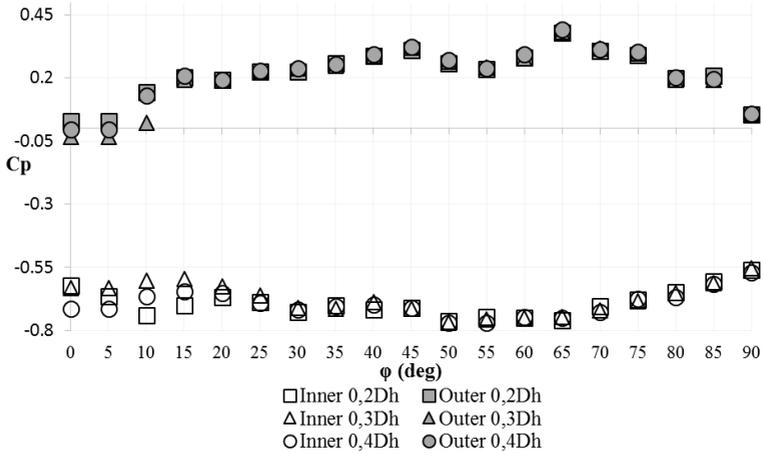
Gambar 2. Pressure drop SDB $l = 0,1D_h$; dan $l = 0,5D_h$ dengan $1,58 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 9,53 \times 10^4$



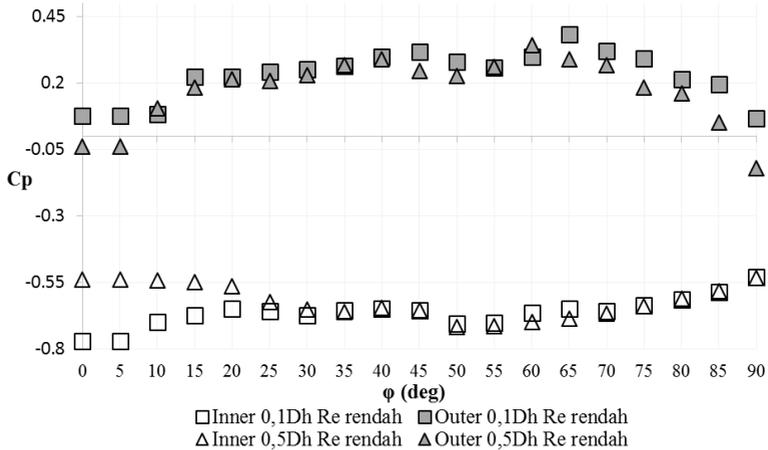
Gambar 3. Minor loss coefficient tanpa SDB, $l = 0,1D_h$; $l = 0,2D_h$; $l = 0,3D_h$; $l = 0,4D_h$; dan $l = 0,5D_h$ dengan $3,97 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 1,35 \times 10^5$



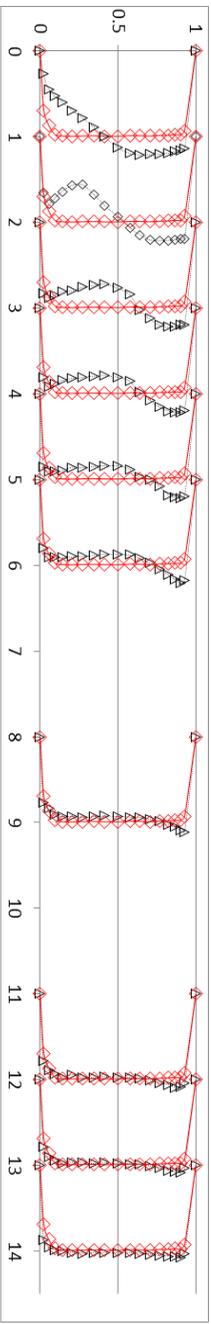
Gambar 4. *Minor loss coefficient* SDB $l = 0,1D_h$; dan $l = 0,5D_h$ dengan $1,58 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 9,53 \times 10^4$



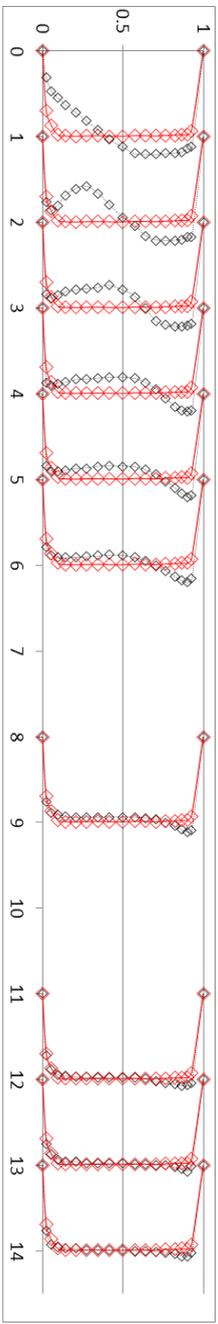
Gambar 4. *Pressure coefficient* SDB $l = 0,2D_h$; $l = 0,3D_h$; $l = 0,4D_h$ dengan $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$




Gambar 5. *Pressure coefficient* SDB $l = 0,1D_h$; dan $l = 0,5D_h$; dengan $Re_{Dh} = 5,56 \times 10^4$



(a)




(b)



(c)

Gambar 6. Profil Kecepatan bidang horizontal pada *downstream* (a) SDB $l = 0,2D_h$;

(b) SDB $l = 0,3D_h$; (c) SDB $l = 0,4D_h$ dengan $Re_{d_h} = 8,74 \times 10^4$



Gambar 7. Profil Kecepatan bidang vertikal pada *downstream* (a) SDB $l = 0,2D_h$; (b) SDB $l = 0,3D_h$; (c) SDB $l = 0,4D_h$ dengan $R_{eDh} = 8,74 \times 10^4$

BIODATA PENULIS



Rizky Akbar Fauzi merupakan anak ke-2 yang dilahirkan dari rahim seorang ibu bernama Sulis Lenawati, dan ayah Yulianto, pada tanggal 3 April 1994 di Jakarta. Penulis menyelesaikan pendidikan dasarnya di SDN Ciracas 03 Pagi, Jakarta Timur tahun pada 200-2006, kemudian melanjutkan pendidikan di MTs N 7 Model Jakarta pada tahun 2006-2009, dimana penulis sempat aktif dalam ekstrakurikuler Band dan pernah menjadi Juara 2 lomba Band tingkat SMP se DKI Jakarta.

Pendidikan tingkat atas penulis diselesaikan di SMA Islam Nurul Fikri Boarding School, Serang, Banten pada tahun 2009-2012. Dengan konsep sekolah berasrama, penulis aktif melakukan kegiatan-kegiatan yang positif seperti OSIS, *Discipline Team*, Tapak Suci, Basket, Robotika, dan Karya Ilmiah, penulis tercatat pernah meraih Juara 2 Basket Libala se kabupaten Serang, medali perunggu Silat Tapak Suci se Banten, dan termasuk peringkat 10 besar dalam satu angkatan.

Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Mesin FTI ITS tahun 2012-2017. Selama menjalani perkuliahan penulis aktif dalam berbagai kegiatan yang memberikan pengalaman serta jaringan yang luas. Dalam organisasi mahasiswa penulis tercatat aktif sebagai Wakil Ketua Himpunan Mahasiswa Mesin periode 2014-2015, Staff LDJ Ash-Saff periode 2013-2014, dan Menteri Kebijakan Kampus BEM ITS Berani periode 2015-2016. Penulis aktif mengikuti pelatihan LKMM Pra-TD sampai TL, pelatihan nasional Forum Indonesia Muda ke-16, dan National Leadership Camp 2014. Penulis juga tercatat sebagai penerima beasiswa Rumah Kepemimpinan angkatan 7, mengikuti Asean University Youth Summit 2015 di

Keddah, Malaysia, dan pernah Juara 1 Futsal FOG & Juara 1 ITS Futsal Championship 2014.

Dalam dunia perkuliahan penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida, asisten praktikum Mekanika Fluida 1 & 2, dan grader mata kuliah menggambar mesin. Penulis juga pernah melakukan Kerja Praktek di PT. GMF AeroAsia pada tahun 2016. Memiliki motto hidup “your dreams are up high in the sky, fly then!” menjadikan penulis memiliki karakter pekerja keras, semangat belajar tinggi, bertanggung jawab dan visioner.

Kontak: rizky.akbar.fauzi12@gmail.com