



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
MELALUI *MODIFIED OCTAGONAL U-BEND*
DENGAN DAN TANPA *GUIDE VANE***

LOUIS ZALDHY LAZUARDHY PURNAMA PUTRA
NRP 2111 100 159

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TM 141585

**A NUMERICAL STUDY OF FLOW CHARACTERISTIC
IN MODIFIED OCTAGONAL U-BEND WITH AND
WITHOUT GUIDE VANE**

LOUIS ZALDHY LAZUARDHY PURNAMA PUTRA
NRP 2111 100 113

Academic Supervisor
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng., Ph.D.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

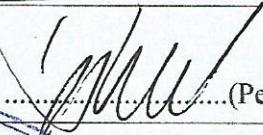
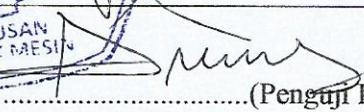
**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
MELALUI 90° OCTAGONAL RADIUS ELBOW
DENGAN DAN TANPA GUIDE VANE**

TUGAS AKHIR

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

Oleh

**LOUIS ZALDHY LAZURADHY P. P.
NRP. 2111100113**

<u>Prof. Ir.Sutardi, M.Eng. Ph.D</u> (NIP. 196412281990031002)	(Pembimbing)
<u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST, M.Eng</u> (NIP.197104051997021001)	(Penguji I)
<u>Vivien Suphandani, ST, M.Eng. Ph.D</u> (NIP.198105292003122001)	(Penguji II)
<u>Nur Ikhwan, ST, M.Eng</u> (NIP. 196709151995121001)	(Penguji III)

**SURABAYA
Juli 2015**

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELALUI *MODIFIED OCTAGONAL U-BEND* DENGAN DAN TANPA *GUIDE VANE*

Nama Mahasiswa : Louis Zaldhy L. P. P.
NRP : 2111 100 113
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng.,
Ph.D.

Abstrak

Dalam sistem ducting terdapat banyak penggunaan bend yang mana akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut disebabkan karena adanya perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut. Nilai penurunan tekanan (pressure drop) pada aliran yang melalui bend tersebut dipengaruhi oleh besarnya radius kelengkungan dan sudut belok dari bend, yang menyebabkan terjadinya separasi dan aliran sekunder (secondary flow) pada bend. Separasi aliran juga dapat menyebabkan timbulnya vortex, hal tersebut akan menyebabkan kerugian energi aliran (headloss) yang lebih besar sehingga perlu dilakukan usaha meminimalisasi pressure drop yang terjadi di dalam bend.

Model uji yang akan digunakan di dalam studi ini berupa modified octagonal U-bend dengan dan tanpa guide vane. Fluida yang mengalir adalah udara yang incompressible, viscous, steady dan mempunyai profil kecepatan uniform pada sisi inlet dengan empat variasi bilangan Reynolds yaitu $1,6 \times 10^5$, $2,4 \times 10^5$, $4,8 \times 10^5$, dan $6,4 \times 10^5$. Penelitian dilakukan secara numerik 3D menggunakan piranti lunak Computation Fluid Dynamics (CFD) komersial dengan model turbulensi $k-\epsilon$ Realizable.

Dari hasil studi ini diperoleh profil kecepatan pada setiap cross section yang ditentukan, pressure coefficient (C_p) di sepanjang aliran pada sisi outer wall dan inner wall, perbandingan antara C_p pada inlet dengan outlet, dan rincian

visualisasi aliran untuk melihat apakah terjadi separasi aliran, adverse pressure gradient, dan vortex.

Kata kunci : modified octagonal U-bend, guide vane, pressure drop, secondary flow, head loss, vortex, flow separation, adverse pressure gradient.

A NUMERICAL STUDY OF FLOW CHARACTERISTIC IN MODIFIED OCTAGONAL U-BEND WITH AND WITHOUT GUIDE VANE

Student Name : Louis Zaldhy L. P. P.
Student ID : 2111 100 113
Departement : Teknik Mesin
Academic Supervisor : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng.,
Ph.D.

Abstract

In ducting system there are many bend application which is will causing pressure drop losses in the flow. It happened because in the channel there is a flow direction changing. The pressure drop in the flow through bend affected by radius ratio and bend degree, that causes separation and secondary flow. Flow separation also causing vortex developing, it will lead to greater headloss, so it is necessary to attempt to minimize pressure drop in an bend.

In this study, used a modified octagonal U-bend with and without guide vane as a test model. The fluid flow defined as incompressible, viscous, steady, and have uniform velocity profile at inlet section with four Reynolds number variation, that is 1.6×10^5 , 2.4×10^5 , 4.8×10^5 , and 6.4×10^5 . This study was computed 3D numerically using commersial Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation software with $k-\epsilon$ Realizable turbulence model.

The result of this study were velocity profile at each section which has been specified, pressure coefficiebt along the stream at outer and inner wall, comparison between inlet and outlet pressure coefficient, and details of flow visualization to see whether there are separation flow, adverse pressure gradient, and vortex.

Keyword : *modified octagonal U-bend, guide vane, pressure drop, secondary flow, head loss, vortex, flow separation, adverse pressure gradient.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat serta hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELALUI *MODIFIED OCTAGONAL U-BEND* DENGAN DAN TANPA *GUIDE VANE*

Tugas Akhir ini merupakan bagian dari kurikulum Jurusan Teknik Mesin ITS, yang harus ditempuh oleh mahasiswa. Penulis menghaturkan terimakasih atas terselesaikannya laporan Tugas Akhir ini kepada:

1. Orang tua beserta keluarga yang telah memberikan dukungan moral maupun materi.
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Laporan Tugas Akhir. Terimakasih atas bimbingannya dan waktunya dalam membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
3. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.Eng., Ph.D., Nur Ikhwan, S.T., MT, dan Dr. Wawan Aries Widodo, ST., M.T, selaku dosen penguji tugas akhir. Terima kasih atas saran dan kritik dalam penulisan tugas akhir.
4. Putu Suwarta, ST., M.Sc. dan Wahyu Wijanarko, ST., M.Sc. selaku dosen wali penulis. Terimakasih atas bimbingan dan motivasi yang diberikan setiap perwalian.
5. Ir. Bambang Pramujati, MSc, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI ITS.
6. Teman-teman Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida Teknik Mesin ITS, terima kasih atas segala dukungannya.
7. Teman-teman Mesin Music Club atas segala kesan dan kenangan indahannya selama menjadi pengurus.

8. Teman-teman Teknik Mesin ITS, yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, terimakasih atas segala dukungannya.

Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan dalam penyusunan laporan ini. Oleh karena itu saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata, semoga laporan ini dapat bermanfaat sebagai wacana bagi mahasiswa Teknik Mesin-ITS.

Surabaya, Juli 2015
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	6
2.1 Persamaan Euler Dalam Koordinat <i>Streamline</i>	6
2.2 Bilangan Reynolds	8
2.3 <i>Pressure Coefficient (C_p)</i>	9
2.4 Aliran di Dalam <i>Elbow</i>	9
2.4.1 Mekanisme terjadinya separasi aliran	10
2.4.2 Mekanisme terjadinya aliran sekunder di dalam <i>elbow</i>	11
2.5 Karakteristik Aliran di Dalam <i>Square Elbow</i>	12
2.6 Perbandingan Aliran di Dalam <i>Square Elbow</i> Dengan <i>Square Radius Elbow</i>	14
2.7 Pengaruh Penambahan <i>Guide Vane</i> Pada Aliran Melalui <i>Elbow</i>	16
2.8 Penentuan Jarak Pengukuran <i>Pressure Coefficient</i>	18
2.9 <i>Grid Independency</i>	19
2.10 <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes Turbulence Model</i> ..	19
2.10.1 Spalart-almaras.....	20
2.10.2 Model <i>k-ε</i>	20
2.10.3 Model <i>k-ω</i>	21
2.10.4 <i>Reynolds stress model (RSM)</i>	21

2.11 Perbandingan Berbagai Model Turbulensi Pada <i>Elbow</i>	22
2.12 Kondisi Batas	23
2.12.1 <i>Flow inlet</i> dan <i>exit boundaries</i>	23
2.12.2 <i>Wall, repeating, dan pole boundaries</i>	25
2.12.3 <i>Internal ccess zones</i>	26
2.12.4 <i>Internal face boundaries</i>	27
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Geometri <i>bend</i>	29
3.2 Analisis Dimensi.....	31
3.3 Metode Numerik.....	34
3.3.1 Tahap <i>pre-processing</i>	34
3.3.2 Tahap <i>post-processing</i>	40
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Distribusi Profil Kecepatan.....	45
4.2 Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> (C_p)	51
4.2.1 Searah <i>streamline</i>	51
4.2.2 Distribusi C_p pada kelengkungan <i>bend</i>	56
4.3 Visualisasi Aliran.....	58
BAB V PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	75

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Error</i> dalam memprediksi tekanan statis melalui 90° <i>rectangular bend</i> pada masing masing permodelan turbulensi	22
Tabel 3.1	Analisis <i>grid independency static pressure</i> pada posisi <i>centerline</i> ($x/L=0$) untuk <i>bend</i> tanpa <i>guide vane</i>	42
Tabel 3.2	Analisis <i>grid independency static pressure</i> pada posisi <i>centerline</i> ($x/L=0$) untuk <i>bend</i> dengan <i>guide vane</i>	42
Tabel 4.1	Perbandingan nilai K dan ΔC_p (<i>inner-outer</i>) dari hasil penelitian numerik pada <i>modified octagonal U-bend</i> dengan dan tanpa <i>guide vane</i> untuk keempat bilangan Reynolds	54

(Hakaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> ..	5
Gambar 2.2 Separasi lapisan batas	8
Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan.....	9
Gambar 2.4 Aliran sekunder	10
Gambar 2.5 Struktur aliran pada <i>outer wall</i> untuk (a) $Re = 100$; (b) $Re = 300$; (c) $Re = 500$; (d) $Re = 1000$; (e) $Re = 1500$ dan pada <i>inner wall</i> untuk (f) $Re = 100$; (g) $Re = 300$; (h) $Re = 500$; (i) $Re = 1000$; (j) $Re = 1500$	11
Gambar 2.6 Penambahan <i>pressure drop vs Re number</i> di dalam <i>micro-channels</i>	12
Gambar 2.7 Daerah aliran sekunder pada <i>mid-plane</i> dari geometri <i>elbow</i>	13
Gambar 2.8 Kontur vortisitas pada aliran fluida melalui 90° <i>square radius elbow</i>	13
Gambar 2.9 Kontur tekanan statis (N/m^2) <i>elbow</i> dengan tiga <i>guide vane</i>	15
Gambar 2.10 Kontur kecepatan aliran melalui <i>U-bend</i> (a) untuk kasus dasar dan (b) untuk kasus menggunakan <i>guide vane</i>	16
Gambar 2.11 Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada konfigurasi <i>median vertical plane elbow</i> dengan $Vd = 40$ m/s, pada <i>uncertainty</i> $U = \pm 2\%$	17
Gambar 3.1 Geometri <i>modified octagonal U-bend</i>	26
Gambar 3.2 <i>Meshing</i> pada <i>modified octagonal U-bend</i> tanpa <i>guide vane</i>	31
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> pada <i>modified octagonal U-bend</i> dengan <i>guide vane</i>	32
Gambar 3.4 Diagram alir penelitian	33
Gambar 4.1 Penempatan posisi <i>cross section</i>	36
Gambar 4.2 Distribusi profil kecepatan (m/s) masing-masing <i>cross section modified octagonal U-bend</i> dengan	

	tanpa <i>guide vane</i> untuk <i>section</i> a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6; g) 7; h) 8; i) 9; j) 10	37
Gambar 4.3	<i>Velocity (m/s) magnitude contour bend</i> untuk (a) tanpa <i>guide vane</i> dan (b) dengan <i>guide vane</i>	38
Gambar 4.4	Distribusi <i>C_p inner</i> dan <i>outer wall modified octagonal U-bend</i> pada bilangan $Re_1 = 1,6 \times 105$ dan $Re_2 = 6,4 \times 105$ untuk variasi (a) tanpa <i>guide vane</i> dan, (b) dengan <i>guide vane</i>	39
Gambar 4.5	<i>Bend loss coefficients (K) vs Re number</i> pada <i>modified octagonal U-bend</i>	42
Gambar 4.6	Grafik jumlah sudut dan <i>blade angular Extension</i>	43
Gambar 4.7	<i>Pathline</i> dengan pewarnaan berdasarkan <i>velocity magnitude (m/s)</i> untuk <i>modified octagonal U-bend</i> (a) dengan <i>guide vane</i> dan (b) tanpa <i>guide vane</i> . 44	44
Gambar 4.8	<i>Velocity (m/s) vector</i> pada <i>modified octagonal U-bend</i> dengan <i>guide vane</i> pada <i>cross section 6, 7, dan 8</i>	45
Gambar 4.9	<i>Velocity (m/s) vector</i> pada <i>modified octagonal U-bend</i> dengan <i>guide vane</i> pada <i>cross section 6, 7, dan 8</i>	47

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini sudah banyak sekali bangunan ataupun fasilitas yang menjadikan aspek *heating, ventilating, and air conditioning* (HVAC) sebagai suatu salah satu instalasi yang perlu perhatian khusus. HVAC menjadi penting bisa dikarenakan alasan keselamatan ataupun alasan ekonomi. Banyak fakta menunjukkan bahwa konsumsi energi pada gedung-gedung perkantoran maupun perumahan keluarga sebagian besar digunakan hanya untuk *air conditioning*, bahkan hingga melebihi 50% konsumsi energi listrik. Fakta tersebut menunjukkan betapa besarnya kontribusi HVAC dalam konsumsi energi listrik. Oleh karena itu dalam instalasi HVAC perlu didesain seefisiennya untuk mengurangi adanya kehilangan energi.

Dalam HVAC terdapat suatu sistem yang bernama *ductwork*. *Duct* digunakan dalam HVAC untuk menyalurkan atau membuang udara. Sistem *duct* memberikan dampak yang cukup besar dalam konsumsi energi yang disebabkan adanya kehilangan energi selama penyaluran udara pada sistem *duct* tersebut. Hal yang dilakukan dalam mendesain sistem *duct* adalah perencanaan (*laying out*), optimalisasi, dan mengurangi potensi *pressure losses*.

Pada sistem *duct*, penggunaan *bend* merupakan salah satu bagian yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan aliran yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan pada *bend* terdapat perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut. *Square bends* seringkali digunakan pada instalasi *heating, ventilating, and air conditioning* (HVAC). Tentunya *square bends* ini berintegrasi dengan instalasi yang lainnya untuk memenuhi salah satu fungsi dari HVAC tersebut. Selain digunakan pada HVAC, *square bends* ini juga sering diaplikasikan pada instalasi *power engineering*. Sebagai contohnya adalah *gaseous fuel supplies*, instalasi *exhaust*, dan banyak lainnya.

Dalam suatu aliran melalui pipa lurus dan *rectangular ducts*, medan tekanan dalam suatu *cross section* dapat menunjukkan tingkat homogenitas yang dapat dikatakan cukup homogen. Namun pada suatu aliran melalui pipa lurus dan *rectangular ducts* yang dipasangkan dengan suatu *bend*, medan kecepatan dan tekanannya kompleksitasnya cukup rumit. Gaya gesek yang bekerja cukup besar, terutama pada *bend* menyebabkan gradien tekanan yang cukup besar mulai dari *inner* hingga *outer wall*.

Instalasi *bend* dapat juga menimbulkan adanya *vortex*, zona *vortex* yang terbentuk secara langsung pada daerah sebelum dan sesudah *bend*. Selain itu juga akan menyebabkan *secondary flows* pada area *bend* dan juga *pressure losses*. Telah diketahui bahwa dua hal tersebut menyebabkan kerugian, banyak hal yang telah dilakukan dalam rangka meminimalisasi terjadinya *secondary flows* dan *pressure losses*. Sebagai salah satu contohnya adalah penggunaan *guide vane* dalam area *bend*, *guide vane* itu sendiri merupakan *fixed aerofoil* yang akan mengarahkan suatu fluida melalui *bend* pada *ducts* dengan kehilangan energi yang minimal.

Penelitian mengenai aliran melalui *bend* telah dilakukan oleh **Xiong dan Chung (2008)** mengenai pengaruh *miter bend* terhadap penurunan tekanan dan struktur aliran dalam saluran *micro-fluidic*. Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa struktur aliran mikro yang melalui *bend* dari saluran mikro dibagi menjadi 3 kategori. Ketika nilai $Re < 100$, tidak terjadi aliran balik dan separasi. Ketika $Re > 100$, muncul *vortex* dan separasi aliran serta berkembang lebih besar lagi. Lalu ketika $Re > 1000-1500$, bentuk dan ukuran dari *inner* dan *outer vortex* menjadi hampir konstan. Untuk penambahan *pressure drop* pada *miter bend* dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama adalah untuk $Re < 100$ dimana tidak ada *eddies* dan penambahan *pressure drop* sangatlah kecil untuk sepanjang saluran. Lalu kelompok kedua adalah untuk nilai bilangan Reynolds yang melebihi nilai transisi yaitu sekitar 100-300, pada saat itu terjadi separasi aliran dan muncul formasi *vortex* pada dinding bagian dalam dan luar dari *miter bend*.

Penelitian tentang guide vane telah dilakukan **Liou dan Lee (2001)** mengenai pengaruh penambahan guide vane terhadap friction factor. Dari hasil penelitian menunjukkan dengan menambah satu guide vane maka friction factor akan menurun. Namun ketika ditambah dua atau tiga guide vane nilai friction factor yang terjadi cenderung meningkat.

Selain itu penelitian mengenai analisis aliran turbulen melalui *square-sectioned duct* dengan *90° elbow* terpasang telah dilakukan oleh **Rup dan Sarna (2011)**. Pada penelitian tersebut menghadirkan hasil dari investigasi aliran udara melalui *square-section duct* dengan pemasangan *bend* secara teoritis dan juga eksperimental. Integrasi numerik dari persamaan kontinuitas, persamaan gerak dan juga persamaan model turbulen dilakukan menggunakan FLUENT. Sebagai hasil dari perhitungan numerik, diperoleh medan kecepatan *time-averaged*, tekanan, dan juga komponen dari tekanan tensor turbulen. Hasil numerik yang diperoleh diverifikasi dan dibandingkan dengan hasil dari eksperimen.

1.2 Rumusan Masalah

Sebelumnya telah dijelaskan bahwa akibat adanya efek dari belokan pada *square bend* akan terjadi *pressure drop* dan juga struktur aliran yang berubah pada bagian belokan, yakni separasi aliran dan juga vortex baik pada bagian dinding dalam maupun luar belokan. Hal-hal tersebut tentunya tidak diinginkan karena merupakan suatu kerugian energi. Oleh sebab itu perlu dilakukan upaya untuk meminimalisasi adanya kerugian tersebut. Salah satunya adalah dengan penambahan *guide vane* yang akan mengarahkan aliran menjadi lebih halus dari pada tanpa *guide vane* yang secara tiba-tiba aliran akan membelok.

Dalam upaya mengurangi penurunan tekanan, maka ditambahkan *guide vanes* pada *modified octagonal U-bend*. Berdasarkan penelitian sebelumnya perlu diperhatikan bahwa meskipun penambahan *guide vane* harapannya akan mengurangi

penurunan tekanan, namun dalam penambahan *guide vane* berpengaruh pula terhadap penambahan besarnya *friction factor*. Sehingga perlu ditentukan jumlah *guide vane* yang paling optimal. Lalu bentuk dari *guide vane* itu sendiri juga perlu diperhatikan. Dalam penelitian ini *guide vane* dibuat dengan ketebalan yang sangat tipis atau didefinisikan hanya berupa *face* pada piranti lunak simulasi CFD komersial bertujuan untuk mempermudah dalam *meshing*.

Penggunaan bilangan Reynolds yang lebih besar pada sebuah *modified octagonal U-bend* akan cenderung menyebabkan *bend loss coefficient* menjadi semakin kecil, karena semakin besar bilangan Reynolds maka kemampuan aliran untuk melawan gesekan dan tekanan balik (*adverse pressure*) juga akan semakin besar. Namun di lain hal, bilangan Reynolds yang semakin besar juga dapat menyebabkan penambahan *pressure drop* yang lebih besar, hal ini terjadi karena *vortex* yang tercipta pada *inner* dan *outer wall* menjadi semakin besar. Permasalahan terkait dengan aliran di dalam *modified octagonal U-bend* dapat diringkas sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan *guide vane* terhadap distribusi tekanan pada sisi *inner wall* dan *outer wall*?
2. Bagaimana pengaruh penambahan *guide vane* terhadap perubahan profil kecepatan aliran?
3. Bagaimana pengaruh dari adanya *bend* terhadap *pressure drop* dan struktur aliran?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi yang diperoleh dari pengukuran dasar dan perhitungan numerik mengenai aliran turbulen melalui sebuah *modified octagonal U-bend* untuk dua kasus bilangan Reynolds dengan variasi tanpa menggunakan *guide vane* dan menggunakan *guide vande*, dengan parameter sebagai berikut:

1. Profil kecepatan pada setiap *cross section* yang ditentukan
2. *Pressure coefficient (Cp)* di sepanjang aliran pada sisi *outer wall* dan *inner wall*
3. Rincian dari visualisasi aliran pada *modified octagonal U-bend* untuk melihat apakah terjadi separasi aliran, *adverse pressure gradien*, dan aliran sekunder.

1.4 Batasan Masalah

Dalam rangka memfokuskan ruang lingkup penelitian agar tidak melenceng dari tujuan penelitian, maka perlu adanya batasan masalah sebagai berikut:

1. Kondisi aliran pada *inlet test section* adalah *uniform, incompressible, dan steady*.
2. Efek perpindahan panas diabaikan
3. Kekasaran permukaan dinding diabaikan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II KAJIAN PUSTAKA

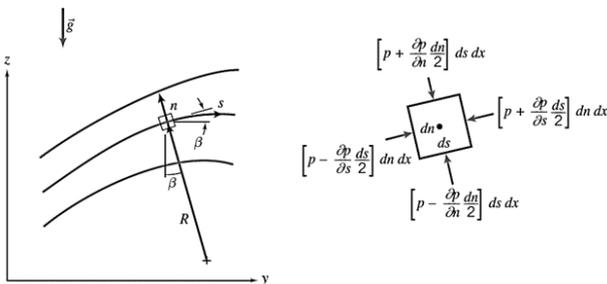
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang berhubungan dengan penelitian ini serta dilengkapi pula dengan referensi mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang mendukung. Teori ini digunakan sebagai landasan untuk menganalisis dalam penelitian ini.

2.1 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*.

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

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 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox et al, 2010)

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

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

persamaan (2.2) 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.

Untuk persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut,

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

persamaan (2.3) 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.

2.2 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan salah satu faktor dalam proses terbentuknya suatu aliran. Semakin besar bilangan Reynolds, maka aliran yang terbentuk akan semakin turbulen. Aliran turbulen memiliki bentuk lebih blunt dibandingkan dengan aliran laminar, sehingga momentum aliran turbulen di dekat dinding lebih besar. Hal ini mengakibatkan aliran lebih tahan terhadap tegangan geser dan adverse pressure gradient. Persamaan bilangan Reynolds dapat dituliskan sebagai berikut,

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} \quad (2.4)$$

dimana: ρ : massa jenis fluida
 U_{ref} : central velocity fluida pada inlet test section
 D_h : diameter hidorlik
 μ : viskositas kinematis fluida

2.3 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,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.5)$$

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 .

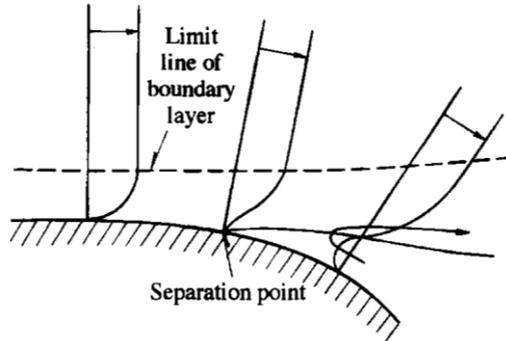
Dalam pengujian suatu model, *pressure coefficient* secara tidak langsung digunakan untuk menyatakan besarnya *pressure drop*. *Pressure coefficient* pada *elbow* didefinisikan sebagai selisih antara tekanan statis pada dinding dengan tekanan statis referensi dibagi dengan dinamis yang diukur pada inlet.

2.4 Aliran di Dalam Pompa

Pada 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 juga *secondary flow*. Akan dijelaskan lebih lanjut tentang mekanisme terjadinya separasi dan *secondary flow* di dalam *elbow*.

2.4.1 Mekanisme terjadinya separasi aliran

Dalam sebuah aliran dimana tekanan mengalami penurunan searah dengan arah aliran, fluida akan mengalami percepatan dan lapisan batas menipis. Dalam suatu saluran yang mengalami kontraksi, tekanan memiliki gradien yang negatif yang dapat membuat aliran stabil sementara itu turbulensi secara bertahap menurun. Sebaliknya, hal-hal yang sangat berbeda dalam aliran yang memiliki gradien tekanan yang positif dimana tekanan meningkat searah dengan arah aliran, seperti pada aliran divergen atau aliran pada dinding yang melengkung seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Separasi lapisan batas (Nakayama, 1999)

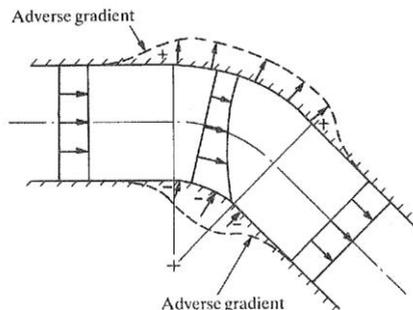
Pada gambar 2.2, terlihat bahwa fluida yang berjarak cukup jauh dari dinding memiliki kecepatan yang tinggi dan juga inersia yang besar. Oleh karena itu, aliran dapat melanjutkan ke arah *downstream* dan mampu juga untuk menghadapi tekanan *downstream* yang tinggi. Sedangkan fluida yang berdekatan dengan dinding memiliki kecepatan yang rendah, sehingga tidak dapat mengatasi tekanan untuk mencapai *downstream* karena hanya memiliki inersia yang kecil pula. Dengan demikian kecepatan aliran menjadi lebih kecil dan lebih kecil lagi

hingga pada akhirnya gradien kecepatannya menjadi nol. Titik ini disebut sebagai titik separasi.

Setelah terjadinya separasi, gradien kecepatan menjadi negatif sehingga menghasilkan aliran balik (*backflow*). Dalam area sekitar titik separasi, suatu vortisitas akan berkembang dan aliran akan menjadi turbulen. Berkembangnya vortisitas menyebabkan terbentuknya *vortex*, adanya *vortex region* akan mengurangi luas penampang efektif yang dilalui aliran utama, sehingga aliran mengalami percepatan. Akibatnya terjadilah *pressure drop*. Untuk alasan ini, kerugian energi menjadi meningkat. Fenomena seperti inilah yang terjadi pada sebuah *elbow*, pada *elbow* aliran salah satu dinding akan menjauhi arah aliran, bahkan dapat terjadi dengan tiba-tiba.

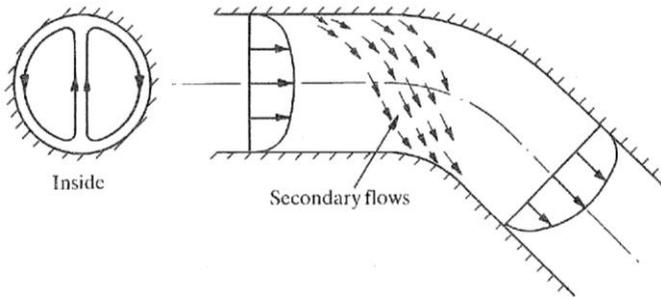
2.4.2 Mekanisme terjadinya aliran sekunder di dalam *elbow*

Aliran yang melalui *elbow* tentunya akan berubah arah, begitu pula dengan tekanan statis dan distribusi kecepatannya pun akan ikut berubah, setidaknya dua *adverse pressure gradient* akan timbul seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Setelah itu aliran sekunder akan muncul dan lengkung akan menyebabkan turbulensi pada struktur aliran.



Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan (Miller, 1990)

Pada *elbow*, kecepatan bervariasi dari nol pada dinding hingga maksimum pada daerah inti, aliran aktual melalui belokan melibatkan distribusi energi yang tidak *uniform*. Perbedaan distribusi ini terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*, hal ini terjadi karena semakin kesisi luar maka tekanan statis akan semakin besar. Perbedaan tekanan pada kedua sisi inilah yang menyebabkan aliran yang melewati *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama. Aliran sekunder ini merupakan fenomena aliran tiga dimensi seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.4.



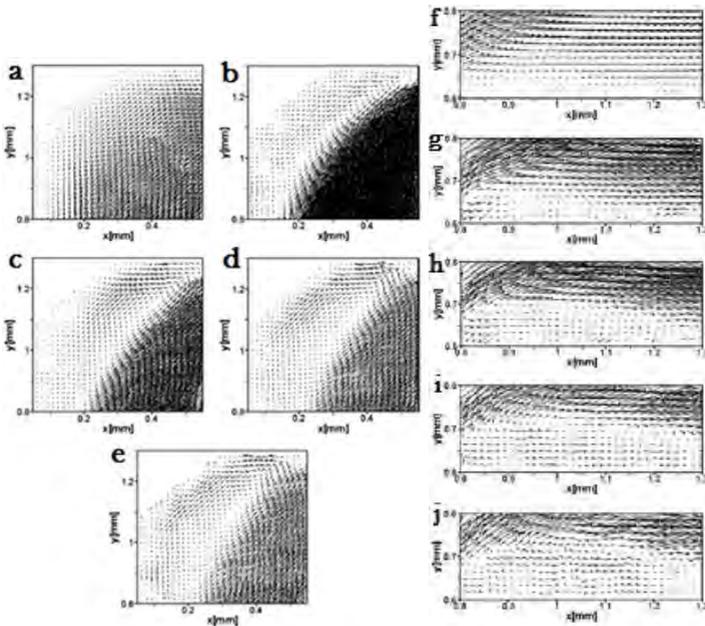
Gambar 2.4 Aliran sekunder (Miller, 1990)

Namun lain halnya dengan aliran sekunder yang terjadi pada *square elbow*. Pada *square elbow* mempunyai karakter khusus jika dibandingkan *circular elbow* dengan terjadinya aliran sekunder pada sisi sudut. Aliran sekunder terjadi karena pada *square elbow* terjadi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping sedangkan pada *circular elbow* tidak dijumpai. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi bawah dan samping inilah yang menyebabkan terjadinya aliran sekunder.

2.5 Karakteristik Aliran di Dalam *Square Elbow*

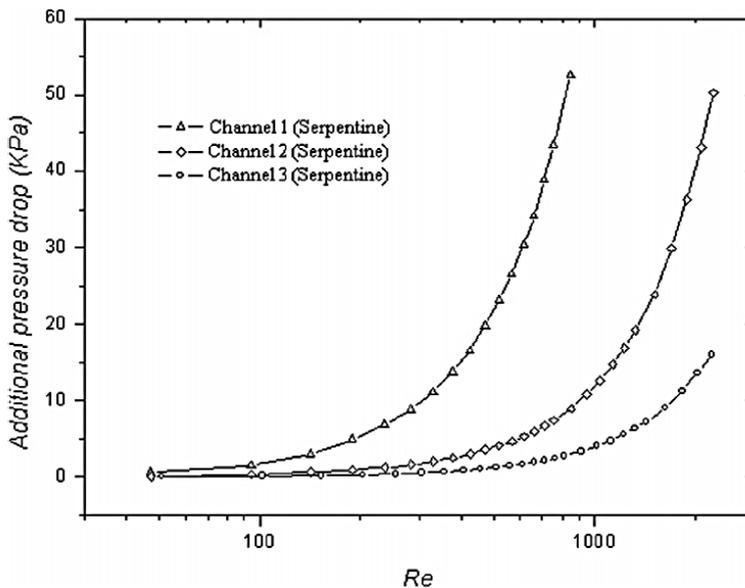
Xiong dan Chung (2008) telah melakukan penelitian mengenai efek dari adanya *miter bend* terhadap *pressure drop* dan juga struktur aliran pada saluran *micro-fluidic*. Pada

penelitiannya tersebut dapat dilihat bahwa pada bagian *outer wall* dan *inner wall* untuk bilangan Reynolds yang bervariasi muncul *vortex* (gambar 2.5). Dari gambar 2.5 terlihat bahwa struktur aliran mikro yang melalui *bend* dari saluran mikro dibagi menjadi 3 kategori. Ketika nilai $Re < 100$, tidak terjadi aliran balik dan separasi. Ketika $Re > 100$, muncul *vortex* dan separasi aliran serta berkembang lebih besar lagi. Lalu ketika $Re > 1000-1500$, bentuk dan ukuran dari *inner* dan *outer vortices* menjadi hampir konstan.



Gambar 2.5 Struktur aliran pada *outer wall* untuk (a) $Re = 100$; (b) $Re = 300$; (c) $Re = 500$; (d) $Re = 1000$; (e) $Re = 1500$ dan pada *inner wall* untuk (f) $Re = 100$; (g) $Re = 300$; (h) $Re = 500$; (i) $Re = 1000$; (j) $Re = 1500$. (Xiong dan Chung, 2008)

Lalu untuk penambahan *pressure drop* yang terjadi pada *micro-channels miter bends* dapat dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama adalah untuk $Re < 100$ di mana tidak terdapat *eddies* dan juga penambahan *pressure drop* sangatlah kecil untuk sepanjang saluran. Lalu kelompok lainnya adalah untuk aliran dengan bilangan Reynolds yang melebihi nilai transisi yang mana berkisar antara 100-300. Ketika bilangan Reynolds lebih besar dari nilai transisi, ditemukan terjadinya separasi aliran dan formasi *vortex* muncul pada sisi *inner* dan *outer wall*. *Vortex* ini menguat seiring dengan meningkatnya *Re number*, hal tersebut menyebabkan *pressure drop* meningkat tajam seperti yang terlihat pada gambar 2.6.

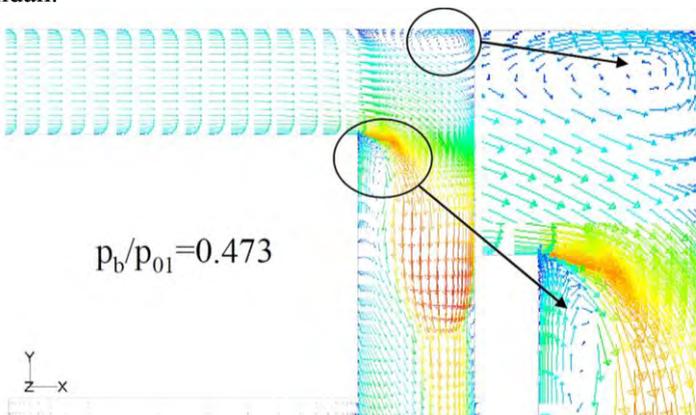


Gambar 2.6 Penambahan *pressure drop* vs *Re number* di dalam *micro-channels*. (Xiong dan Chung, 2008)

2.6 Perbandingan Aliran di Dalam *Square Elbow* Dengan *Square Radius Elbow*

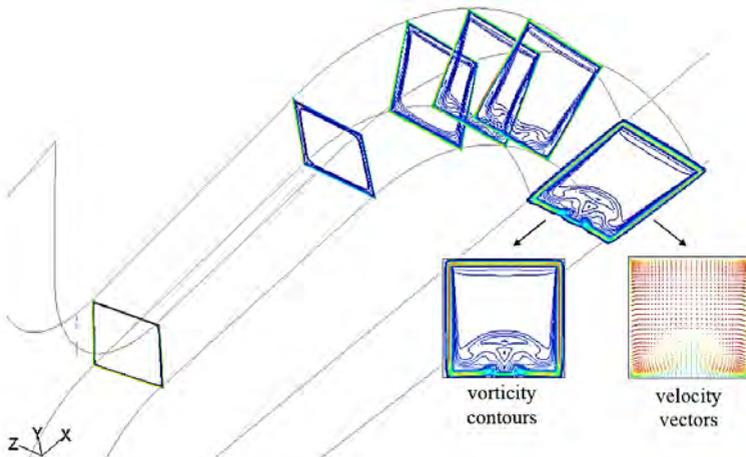
Suryan dkk. (2010) telah melakukan penelitian tentang studi karakteristik dari *compressible viscous flow* melalui *pipe bends*. Di dalam penelitiannya dilakukan komparasi antara dua jenis belokan, yaitu antara *90-degree square elbow* dengan *90-degree square radius elbow* yang diinvestigasi dengan metode komputasi fluida dinamik. Pada penelitian tersebut menggunakan piranti lunak FLUENT 6.3 untuk melakukan komputasi. Persamaan Navies-Stokes secara tiga dimensi dipecahkan dengan menggunakan dua persamaan dari SST *k- ω turbulence model*.

Seperti yang terlihat pada gambar 2.7 pada aliran fluida dengan kecepatan tinggi yang melalui *90° square elbow* terdapat aliran sekunder yang diakibatkan adanya belokan yang tajam. Aliran tersebut juga cenderung untuk tercekik ketika perubahan laju perubahan aliran massa dengan penurunan rasio tekanannya adalah kurang dari 0,1%. Pada geometri ini ditemukan adanya fenomena tercekik pada laju aliran massa yang lebih rendah bila dibandingkan dengan geometri dengan adanya radius. Begitu pula untuk koefisien *discharge* (C_d) pada geometri ini adalah rendah.



Gambar 2.7 Daerah aliran sekunder pada *mid-plane* dari geometri *elbow* (Suryan dkk., 2010)

Pada gambar 2.8 didemonstrasikan perkembangan dari daerah kecepatan rendah di sepanjang kurva bagian dalam. Pergerakan dari fluida dengan momentum yang lebih tinggi menuju kurva yang lebih luar juga ditunjukkan secara jelas pada gambar. Hal inilah yang menyebabkan aliran sekunder dan losses pada geometri *radius elbow*.



Gambar 2.8 Kontur vortisitas pada aliran fluida melalui 90° *square radius elbow* (Suryan dkk., 2010)

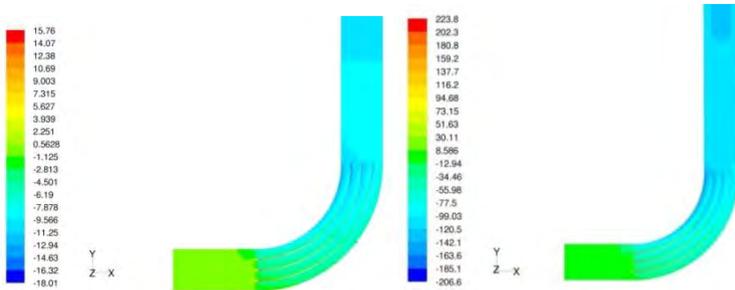
Berdasarkan penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa koefisien *discharge* pada geometri 90° *radius elbow* ditemukan lebih besar dari pada 90° *square elbow*. Lalu kehilangan energi pada 90° *square elbow* lebih besar dibandingkan pada 90° *radius elbow*. Hal tersebut teridentifikasi disebabkan oleh adanya aliran sekunder dan juga fenomena *choking*. Adanya fenomena *choking* menyebabkan luas daerah aliran efektif menjadi mengecil.

2.7 Pengaruh Penambahan *Guide Vane* Pada Aliran Melalui *bend*

Liou dan Lee (2001) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *friction factor* pada aliran melalui 60° *bend*. Penelitian dilakukan dengan menambah *inlet guide vane* pada *curved duct* di *side dump combustor* dengan variasi tanpa menggunakan *guide vane*, menggunakan 1 *guide vane*, menggunakan 2 *guide vane* dan menggunakan 3 *guide vane*. Secara horisontal *guide vane* membagi *curved duct* menjadi bagian yang sama dengan *Reynolds Number* (Re_c) adalah 2.6×10^4 . Dari hasil penelitian menunjukkan dengan menambah satu *guide vane* maka *friction factor* akan menurun. Namun ketika ditambah dua atau tiga *guide vane* nilai *friction factor* yang terjadi cenderung meningkat.

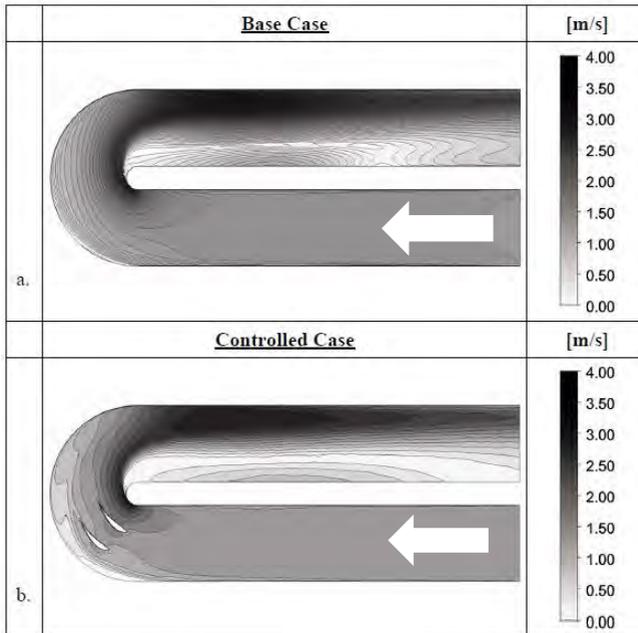
Studi mengenai pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* pernah dilakukan oleh **Sutrisno (2012)**. Sutrisno melakukan penambahan *partial guide vane* 5 mm pada aliran melalui 90° *rectangular elbow* dengan bilangan Reynolds sebesar $2,1 \times 10^4$ dan $8,4 \times 10^4$ dengan metode numerik dan eksperimen untuk mengetahui penurunan tekanan (*pressure drop*) disepanjang sisi *output* dan *input* di dalam 90° *rectangular elbow*.

Dari hasil kontur tekanan statis pada gambar 2.9 didapatkan bahwa pengaruh penambahan tiga *guide vane* justru meningkatkan penurunan tekanan aliran karena adanya penambahan friksi. Sehingga dalam upaya mengurangi *pressure drop* perlu ditentukan jumlah *guide vane* secara optimal.



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

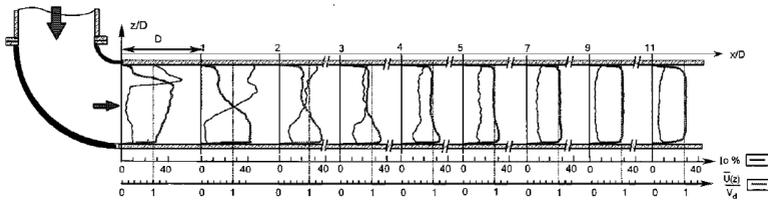
Güden (2014) melakukan analisis dari aliran melalui *U-bend* dengan dan tanpa *guide vane* yang berbentuk *airfoil*. Berdasarkan gambar 2.10 terlihat bahwa pola aliran di *bend exit* menjadi lebih seragam bila dikontrol dengan menggunakan *guide vane*. Salah satu kesimpulan yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah penggunaan *guide vane* dalam upaya mengontrol aliran disimpulkan sukses untuk mengeliminasi *Dean Vortices*, mereduksi intensitas turbulen, dan meningkatkan keseragaman aliran. Hal tersebut diduga dapat memberikan hasil berupa pengurangan tingkat kebisingan pada *duct*.



Gambar 2.10 Kontur kecepatan aliran melalui *U-bend* (a) untuk kasus dasar dan (b) untuk kasus menggunakan *guide vane* (Güden, 2014)

2.8 Penentuan Jarak Pengukuran *Pressure Coefficient*

Berdasarkan penelitian yang dilakukan **Danbon (2000)**, dapat terlihat pada gambar 2.11 bahwa profil kecepatan aliran melalui sebuah *elbow* kembali menuju simetris ketika mencapai jarak $6D$ dari outlet *elbow*, hal tersebut mengindikasikan bahwa pada jarak tersebut sudah tidak terdapat pengaruh *elbow* terhadap profil kecepatan. Hal tersebutlah yang akan mendasari penentuan titik yang akan digunakan untuk menentukan *pressure coefficient*.



Gambar 2.11 Profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada konfigurasi *median vertical place elbow* dengan $V_d = 40$ m/s, pada *uncertainty* $U = \pm 2\%$ (F. Danbon, 2000)

2.9 Grid Independency

Dalam melakukan studi numerik akan optimal apabila memperhatikan *grid independency*. Grid independency merupakan solusi konvergen yang ditentukan dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya mesh. Jadi dengan meningkatkan jumlah dari sel maka kemungkinan tidak akan mengubah dari *integrated quantities* dan *flow-filed solution*. *Grid independency* diindikasikan dengan menghaluskan *mesh*, hal tersebut terus dilakukan hingga solusi numerik yang dihasilkan sudah tidak terdapat perubahan secara signifikan.

2.10 Analisis Tanpa Dimensi

Sebuah *turbulence model* adalah prosedur komputasi untuk mendekati sistem dari persamaan *mean flow*. Untuk sebagian besar aplikasi didunia keteknikan, tidaklah perlu untuk melihat hasil detil dari fluktuasi turbulen, yang diperlukan hanyalah untuk mengetahui bagaimana turbulensi memberikan dampak terhadap *mean flow*. Oleh karena itu *turbulence model* haruslah secara luas dapat diaplikasikan, akurat, sederhana, dan ekonomis untuk dijalankan.

2.10.1 Spalart-alararas

Spalart-Allmaras merupakan model yang memecahkan persamaan konservasi tunggal untuk *turbulent viscosity*. Persamaan konservasi ini terdapat

transport term yang konvektif dan difusif. Model ini dikembangkan untuk digunakan pada kode tidak terstruktur yang mana biasa terdapat di industri *aerospace*. Model ini akurat dan ekonomis untuk aliran dengan separasi yang ringan dan *recirculation*. Sedangkan model ini lemah untuk aliran dengan separasi yang berat, aliran dengan gesekan bebas, dan *decaying turbulence*.

2.10.2 Model $k-\varepsilon$

Model $k-\varepsilon$ merupakan model turbulen dengan menggunakan dua persamaan, sehingga memungkinkan kecepatan turbulen dan skala panjang ditentukan secara independen. Model $k-\varepsilon$ difokuskan untuk mekanisme yang memberikan efek terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa) k . Lalu ε merupakan laju disipasi dari k .

- **Standard $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini menggunakan persamaan *transport* dalam penyelesaian model untuk model untuk k dan ε . Model ini dapat digunakan untuk menyelesaikan *bouyancy*, *heating*, dan *compressibility*. Model ini tidak sesuai untuk aliran kompleks yang meliputi separasi dan *strong stream curvature*.
- **RNG (Renormalization-group) $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini merupakan variasi dari model *standard $k-\varepsilon$* . Model ini sesuai untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds rendah dan untuk memprediksi aliran dengan efek *swirling*.
- **Realizable $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini mempunyai beberapa batasan matematis pada bilangan Reynolds, namun konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Model ini mempunyai kelebihan yaitu lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran suatu *jet* atau *nozzle*. Dengan menggunakan model

ini dapat memberikan performa bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, separasi, *recirculation*, dan lapisan batas yang mempunyai gradian tekanan yang besar.

2.10.3 Model $k-\omega$

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Dalam model ω ini, sebuah *inverse time scale* terkait dengan turbulensi. Karakteristik numerik dari model ini cukup serupa dengan model $k-\varepsilon$. Dalam model ini ω merupakan *specific dissipation rate*.

- **Standard $k-\omega$** : Pemodelan ini menggunakan dua persamaan *transport model* untuk memecahkan k dan ω . Model ini juga dapat digunakan untuk aliran dengan bilangan Reynolds yang rendah. Model ini dapat menampilkan transisi aliran dari yang awalnya laminar menjadi turbulen. Lalu model ini juga dapat pula menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.
- **SST (Shear-stress transport) $k-\omega$** : Model ini merupakan variasi dari model *standard $k-\omega$* yang dikembangkan untuk memadukan formulasi model *standard $k-\omega$* yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model $k-\omega$ yang memiliki keunggulan dalam aliran *free stream*.

2.10.4 Reynolds stress model (RSM)

Model ini menggunakan tujuh persamaan dalam pendekatannya, sehingga merupakan model turbulensi yang paling teliti. RSM mendekati persamaan RANS dengan menyelesaikan persamaan *transport* tambahan untuk enam *independent Reynolds stresses*. RSM akurat untuk memprediksi aliran kompleks seperti aliran *cyclone*, aliran berotasi, dan aliran yang terseparasi berat.

2.11 Perbandingan Berbagai Model Turbulensi Pada Bend

Nur Ikhwan (2009) telah melakukan komparasi aliran melewati rectangular elbow dengan menggunakan model turbulensi Spallart-Allmaras, $k-\omega$, $k-\varepsilon$, dan *Reynolds Stress Model* (RSM).

Tabel 2.1 Error dalam memprediksi tekanan statis melalui 90° rectangular bend pada masing masing permodelan turbulensi (Nur Ikhwan, 2009)

No	Hasil Eksperimen/Simulasi	% Error
1	Eksperimen (Eddy, 2000)	-
2	Spalart-Allmaras	7,53
3	$k-\varepsilon$ Standard	4.52
4	$k-\varepsilon$ RNG	4,66
5	$k-\varepsilon$ Realizable	4,39
6	$k-\omega$ Standart	5,76
7	$k-\omega$ SST	4,99
8	RSM	4,44

Dari ketujuh model turbulensi yang digunakan untuk memprediksi tekanan statis dinding 90° rectangular bend, dapat terlihat bahwa yang memiliki hasil paling baik adalah model turbulensi *Realizable $k-\varepsilon$* . Model *Realizable $k-\varepsilon$* dikatakan yang terbaik dikarenakan memiliki persentasi error yang terkecil, sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan model turbulensi yang lain dalam simulasi aliran pada 90° rectangular bend.

2.12 Kondisi Batas

Berikut ini adalah beberapa kondisi batas yang tersedia dalam piranti lunak simulasi CFD komersial antara lain:

2.12.1 *Flow inlet dan exit boundaries*

- ***Pressure inlet***: kondisi batas ini biasa digunakan untuk mendefinisikan tekanan fluida pada aliran pada *inlet*, beserta dengan seluruh properti aliran lainnya. Kondisi batas ini sesuai untuk perhitungan aliran *incompressible* maupun *compressible*. Kondisi batas *pressure inlet* dapat digunakan ketika tekanan *inlet* diketahui namun laju aliran tidak diketahui. Situasi ini muncul dalam banyak situasi praktis, termasuk aliran *bouyancy-driven*. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk mendefinisikan pada batas “bebas” dalam aliran eksternal.
- ***Velocity inlet***: kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran, beserta dengan seluruh properti aliran skalar yang relevan pada *inlet* aliran. Properti *total* (stagnasi) dari aliran tidak tetap, jadi akan meningkat terhadap nilai apapun yang diperlukan untuk menyediakan distribusi kecepatan yang diinginkan. Kondisi batas ini dimaksudkan untuk aliran *incompressible*, dan kondisi ini berguna dalam aliran *compressible* yang akan mengarahkan ke hasil nonfisik karena kondisi ini mengizinkan kondisi stagnasi pada halangan *solid*, karena hal ini dapat menyebabkan properti *inflow stagnation* menjadi sangat tidak seragam.
- ***Mass flow inlet***: kondisi batas ini digunakan untuk menyediakan laju aliran massa yang telah dirumuskan atau distribusi fluks massa pada *inlet*. Secara fisik, menentukan fluks massa memungkinkan tekanan total bervariasi dalam

menanggapi solusi *interior*. Hal ini berbeda dengan kondisi batas *pressure inlet*, dimana tekanan total adalah tetap sedangkan fluks massa bervariasi.

- ***Inlet vent***: kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan sebuah *inlet vent* dengan sebuah *loss coefficient* tertentu, arah aliran, *ambient pressure*, dan suhu ambien.
- ***Intake fan***: kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan sebuah aliran eksternal dari *intake fan* dengan *pressure jump* tertentu, arah aliran, *ambient pressure*, dan *ambient temperature*.
- ***Pressure outlet***: Kondisi batas ini membutuhkan spesifikasi dari tekanan statis (*gauge*) pada *outlet boundary*. Nilai dari tekanan statis yang telah ditentukan digunakan hanya ketika bekerja pada aliran *subsonic*, tekanan yang telah ditentukan tidak akan lagi digunakan, tekanan akan diekstrapolasikan dari aliran dalam *interior*. Seluruh kuantitas aliran lainnya diekstrapolasikan dari *interior*.
- ***Pressure far-field***: kondisi batas ini digunakan dalam pemodelan kondisi aliran bebas tak hingga, dengan *free-stream Mach number* dan kondisi statis yang ditentukan. Kondisi batas ini seringkali disebut dengan kondisi batas karakteristik, karena menggunakan informasi karakteristik (*Riemann invariants*) untuk menentukan variabel aliran pada batas. Kondisi batas ini berlaku hanya jika kepadatan dihitung dengan menggunakan hukum gas ideal, selain itu tidak disarankan menggunakan kondisi batas ini.
- ***Outflow***: kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar yang mana kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui sebelum solusi masalah aliran dilakukan. Kondisi batas ini tidak dapat digunakan dalam kasus aliran *compressible*,

aliran *unsteady* dengan densitas bervariasi meskipun merupakan aliran *incompressible*, dan masalah yang melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.

- **Outlet Vent:** Kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan keluaran dari *vent* dengan sebuah *loss coefficient* tertentu, *ambient pressure*, dan *ambient temperature*.
- **Exhaust fan:** Kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan keluaran dari *vent* dengan sebuah *pressure jump* tertentu, dan *ambient pressure*

2.12.2 *Wall, repeating, dan pole boundaries*

- **Wall:** Kondisi batas ini digunakan untuk daerah fluida dan padat terikat. Dalam aliran viskos, kondisi batas tanpa slip diberlakukan pada dinding secara *default*, tetapi dapat juga menentukan komponen kecepatan tangensial dalam hal gerakan translasi atau rotasi dari batas dinding, atau model “slip” dinding dengan menentukan gesekan.
- **Symmetry:** kondisi batas ini digunakan ketika ketertarikan geometri secara fisik, pola yang diekspektasikan dari solusi aliran/termal, memiliki kesimetrisan *mirror*. Kondisi ini dapat juga menggunakan model *zero-shear slip walls* dalam aliran viskos. Perlu berhati-hati dalam menentukan lokasi batas simetri. Pada garis tengah dari geometri *axisymmetric*, perlu digunakan tipe *axis boundary* dari pada kondisi batas simetris.
- **Periodic:** kondisi batas ini digunakan ketika geometri fisik yang diperhatikan dan pola perkiraan dari solusi aliran/termal mengalami pengulangan alami secara periodik. Pada piranti lunak tersebut terdapat dua tipe kondisi, yang pertama tidak mengizinkan *pressure drop* di *periodic planes*, sedangkan tipe kedua mengizinkan adanya *pressure*

drop pada kondisi periodik secara translasional, memungkinkan model untuk menjadi aliran periodik “*fully-developed*”.

- **Axis:** kondisi batas ini harus digunakan sebagai garis tengah dari geometri *axisymmetric*. Hal ini juga dapat digunakan untuk garis tengah segi empat atau hexahedral jaringan silinder-polar. Definisi kondisi batas pada *axis boundaries* tidak diperlukan.

2.12.3 Internal cell zones

- **Fluid:** sebuah zona fluida merupakan sebuah kelompok sel yang mana seluruh persamaan aktifnya telah terungkap. Satu-satunya *input* yang diperlukan untuk zona fluida adalah tipe dari material fluida.
- **Solid:** sebuah zona *solid* merupakan sebuah kelompok sel yang mana hanya permasalahan konduksi kalor yang terpecahkan, tidak ada persamaan aliran yang terungkap. Material diperlakukan seperti padatan atau juga seperti fluida, tetapi ini diasumsikan bahwa tidak terjadi konveksi. Satu-satunya *input* yang diperlukan untuk zona *solid* adalah tipe dari material *solid*. Haruslah diindikasikan bahwa material yang manakah yang terkandung zonda *solid*, sehingga properti material yang sesuai yang akan digunakan. Oilhan *input* memungkinkan untuk mengatur tingkat laju kalor bangkitan volumetris (*heat source*) atau nilai pasti dari suhu. Selain itu juga dapat menentukan pergerakan untuk zona *solid*. Jika terdapat batas periodik rotasional yang berdekatan dengan zona *solid*, perlu ditentukan sumbu rotasinya. Jika memodelkan radiasi menggunakan model DO, dapat ditentukan apakah ada atau tidak material yang berpartisipasi dalam radiasi.

2.12.4 *Internal face boundaries*

- ***Fan***: model ini merupakan model parameter *lumped* yang dapat digunakan untuk menentukan dampak dari penggemar dengan karakteristik yang dikenal pada beberapa medan aliran ayang lebih besar. Jenis batas *fan* yang memungkinkan untuk dapat memberikan *input* sebuah kurva *fan* empiris yang mana mengatur antara *head (pressure rise)* dan laju aliran (kecepatan) sepanjang sebuah elemen *fan*. Model *fan* tidak memberikan gambaran akurat mengenai rincian aliran melalui bilah *fan*. Sebaliknya memprediksi jumlah aliran melalui *fan*. *Fan* dapat digunakan dalam hubungannya dengan sumber aliran lain, atau sebagai satu-satunya sumber aliran dalam simulasi. Dalam kasus terakhir, laju aliran sistem ditentukan oleh keseimbangan antara kerugian dalam sistem dan kurva *fan*.
- ***Radiator***: model ini merupakan sebuah model yang parameternya disamakan untuk elemen pertukaran panas (contoh: radiator atau kondensor), tersedia dalam piranti lunak ini. Jenis batas radiator memungkinkan anda untuk menentukan baik penurunan tekanan dan koefisien perpindahan panas sebagai fungsi dari kecepatan normal radiator.
- ***Porous jump***: kondisi ini digunakan untuk model dengan “membran” tipis yang diketahui memiliki karakteristik kecepatan. Hal ini pada dasarnya adalah penyederhanaan satu dimensional dari model *porous media* yang tersedia untuk zona sel. Contoh penggunaan untuk kondisi *porous jump* meliputi pemodelan *pressure drop* melalui layar dan filter, dan pemodelan radiator bila tidak memerhatikan perpindahan panas. Model sederhana ini harus digunakan bila memungkinkan karena lebih kuat dan menghasilkan konvergensi yang lebih baik.

- **Wall:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan suatu permukaan menjadi dinding atau halangan.
- **Interior:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan suatu permukaan menjadi *interior*, maksudnya adalah aliran mampu untuk melalui kondisi batas ini.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah diuraikan di atas, dapat disimpulkan bahwa pada geometri *radius bend* memiliki keunggulan bila dibandingkan dengan geometri *square bend*, keunggulan tersebut diantaranya adalah *loss coefficient* pada *radius bend* lebih kecil bila dibandingkan dengan *square bend*. Selain itu, luasan area vortex yang terjadi pada *radius bend* lebih kecil dibandingkan dengan *square bend*. Dalam upaya meminimalisasi kerugian energi dapat dilakukan penambahan *guide vane* pada *bend*, sehingga dapat mengurangi *friction factor*. Namun, dalam penambahan *guide vane* haruslah optimal agar tidak justru menambahkan *friction factor* akibat adanya jumlah *guide vane* yang terlalu banyak. Oleh karena itu, penelitian ini diperlukan untuk mengaji parameter-parameter yang memengaruhi karakteristik aliran dan *pressure drop* pada *modified octagonal U-bend* dengan menggunakan dan tanpa *guide vane*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

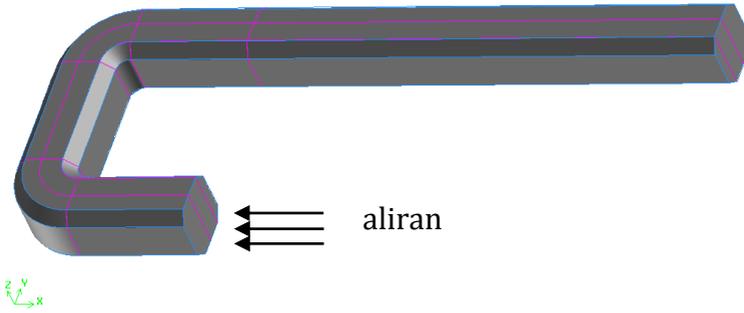
METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai metode penelitian yang akan digunakan, yaitu metode penelitian numerik. Metode penelitian numerik menggunakan piranti lunak simulasi CFD komersial untuk menganalisis karakteristik aliran, yang meliputi distribusi tekanan dan kecepatan dalam suatu *bend*.

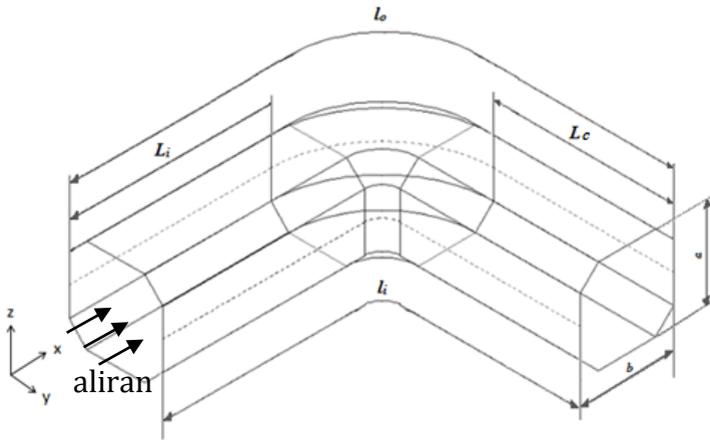
3.1 Geometri *bend*

Bend pada penelitian ini berupa *modified octagonal U-bend*, pada penelitian ini *U-bend* yang digunakan merupakan *U-bend* yang termodifikasi dengan konfigurasi kombinasi antara dua 90° *elbow* yang dihubungkan *straight channel*. Pada penelitian ini menggunakan *modified octagonal U-bend* dengan dan tanpa *guide vane*. Geometri *bend* dan penempatan *guide vane* diilustrasikan oleh gambar 3.1. Spesifikasi dari *test section* penelitian ini adalah sebagai berikut:

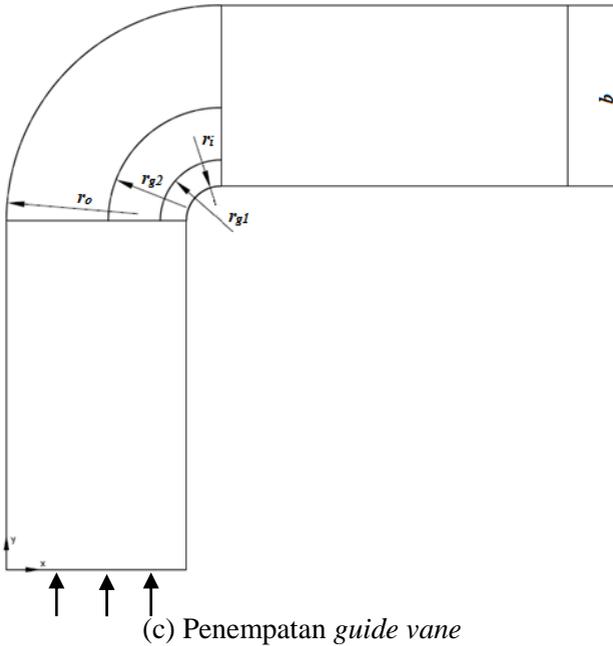
- *Bend* : *modified octagonal U-bend*
- Panjang *inlet bend* (L_i) : 1000 mm
- Panjang *straight channel* (L_s) : 1000 mm
- Panjang *outlet bend* (L_o) : 5000 mm
- Tinggi dan lebar ($a \times b$) : 518,8 x 518,8 mm
- *Inner radius* (r_i) : 100 mm
- *Outer radius* (r_o) : 618,8 mm
- *Guide vane 1 radius* (r_{g1}) : 175 mm
- *Guide vane 2 radius* (r_{g2}) : 325 mm
- *Hydraulic diameter* (D_h) : 409 mm



(a) *Isometric view*



(b) *90° bend section*



Gambar 3.1 Geometri *modified octagonal U-bend*

3.2 Analisis Dimensi

Berdasarkan geometri penelitian, kemudian dilakukan analisis dimensi untuk mengetahui pengaruh parameter pada penelitian *modified octagonal U-bend*. Analisis pada penelitian ini diperlukan untuk mengetahui korelasi antara parameter-parameter yang saling mempengaruhi.

Hubungan parameter akan ditemukan dalam bentuk parameter-parameter tanpa dimensi. Metode analisis ini dikenal dengan *Buckingham π -Theorem*. Analisis dimensi digunakan untuk mengetahui variabel apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran melalui *modified octagonal U-bend* dengan

variasi dua bilangan Reynolds. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran adalah:

Δp	=	perbedaan tekanan statis lokal dan referensi
ρ	=	massa jenis fluida
μ	=	viskositas absolut fluida
u	=	kecepatan lokal
a	=	Lebar <i>cross section bend</i>
b	=	Tinggi <i>cross section bend</i>
U_{ref}	=	kecepatan <i>freestream</i> pada inlet <i>bend</i>
r_i	=	<i>inner radius</i>
r_o	=	<i>outer radius</i>
r	=	posisi pada arah normal terhadap <i>streamline</i>
l_i	=	panjang total <i>inner bend</i> searah <i>streamline</i>
l_o	=	panjang total <i>outer bend</i> searah <i>streamline</i>
L_i	=	panjang <i>inlet bend</i>
L_o	=	panjang <i>outlet bend</i>
x_i	=	posisi searah <i>streamline</i> pada <i>inner wall bend</i>
x_o	=	posisi searah <i>streamline</i> pada <i>outer wall bend</i>
z	=	sumbu vertikal saluran
D_h	=	diameter hidrolis

θ = sudut *bend*

n = jumlah *guide vane*

Dengan menganggap u dan Δp sebagai *dependent parameter* maka dapat dituliskan persamaan:

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

$$\Delta p = f_2(\rho, \mu, a, b, U_{ref}, r_i, r_o, r, D_h, l_i, l_o, \theta, x_i, x_o, z, n, L_i, L_o) \quad (3.2)$$

Berdasarkan teori *Buckingham Pi* maka diperoleh 12 grup tak berdimensi untuk kedua *dependent parameter* u dan Δp sebagai berikut :

1. Kecepatan tak berdimensi

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{x_i}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, n, \theta, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}\right) \quad (3.3)$$

2. Koefisien tekanan (C_p)

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (3.4)$$

$$= f_2\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{x_i}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, n, \theta, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}\right) \quad (3.5)$$

Dari kelompok tak berdimensi yang telah diperoleh, terdapat parameter yang konstan karena harganya sudah ditentukan yaitu $\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \theta, n, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}$.

Maka dari itu, parameter yang konstan tersebut dapat dikeluarkan dari fungsi grup tak berdimensi. Dalam penelitian ini digunakan bilangan Reynolds berdasarkan D_h , sehingga diperoleh $Re_{D_h} = \frac{\rho U_{ref} D_h}{\mu}$. Dari analisis-analisis tersebut maka diperoleh persamaan tak berdimensi sebagai berikut:

1. Kecepatan tak berdimensi

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_3 \left(\frac{x_i}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{r}{b} \right) \quad (3.6)$$

2. Koefisien tekanan (C_p)

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} = f_4 \left(\frac{x_i}{D_h}, \frac{x_o}{D_h}, \frac{r}{b} \right) \quad (3.7)$$

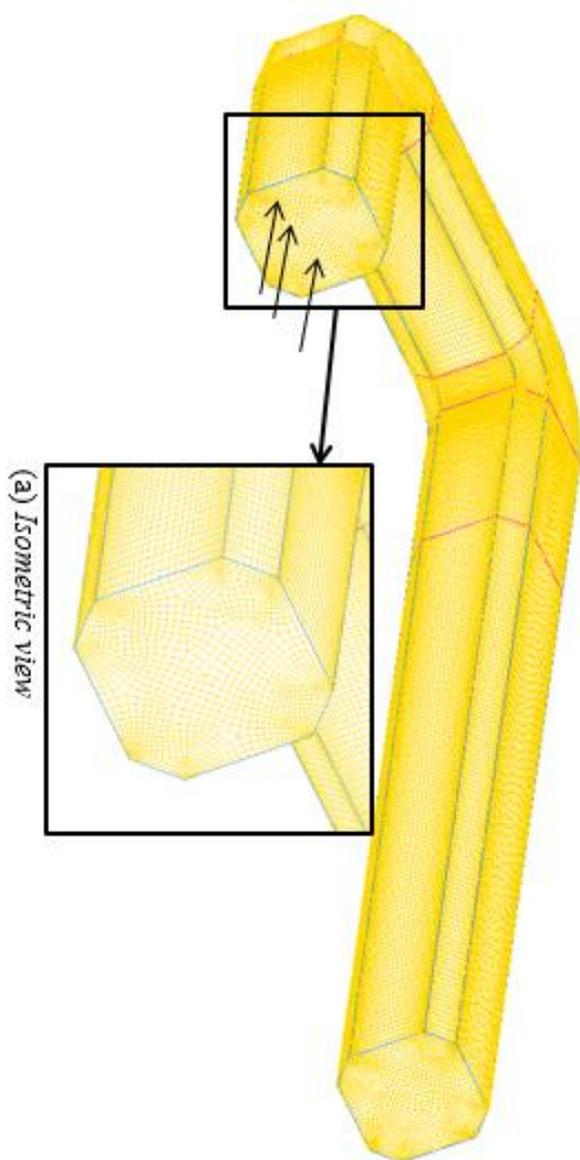
3.3 Metode Numerik

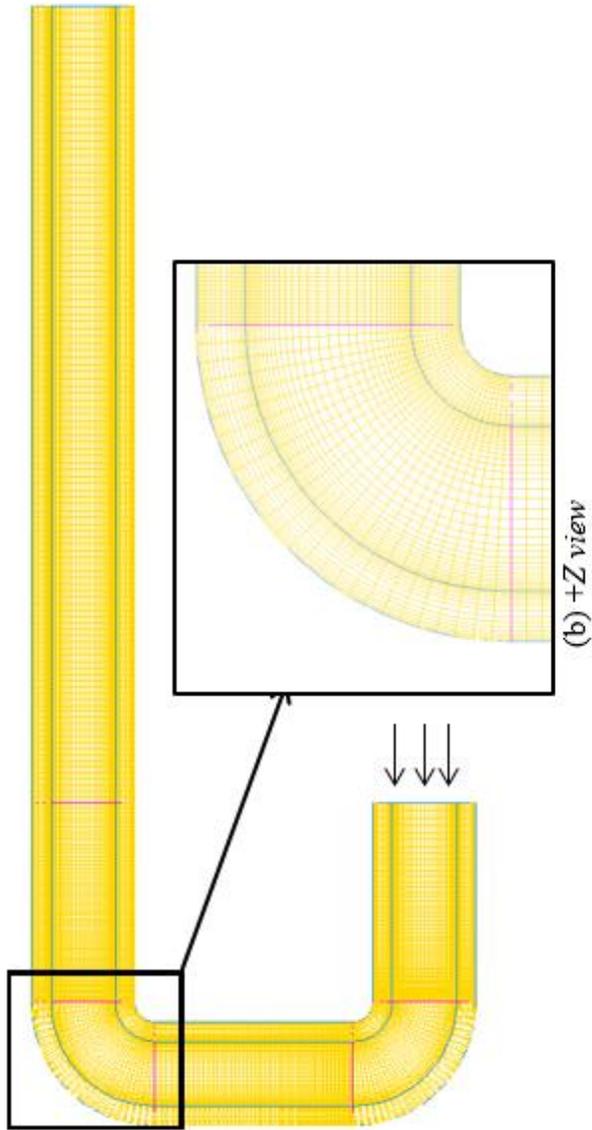
Penelitian ini *software* Piranti lunak simulasi CFD komersial untuk melakukan pendekatan numerik dan untuk membuat model awal dan melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada penelitian numerik dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap *pre-processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

3.3.1 Tahap *pre-processing*

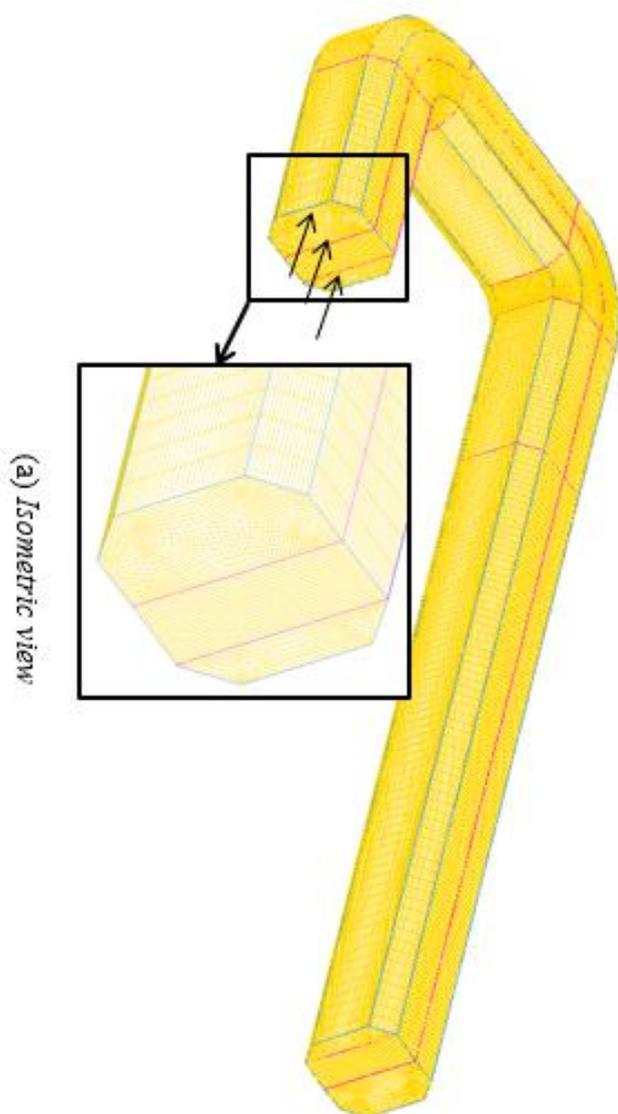
- a) Membuat model berupa *modified octagonal U-bend* yang mengacu terhadap geometri seperti gambar 3.2. Model *modified octagonal U-bend* dibuat dalam dua variasi, yaitu *bend* yang menggunakan *guide vane* dan *bend* yang tidak menggunakan *guide vane*. Dalam penelitian ini, dilakukan penambahan geometri pada bagian sebelum *inlet bend*, penambahan tersebut dimaksudkan untuk mendefinisikan profil kecepatan yang telah terpengaruh oleh adanya *bend* sebelum memasuki inlet area *test section*. Begitu pula untuk bagian setelah *outlet bend* ditambahkan geometri berupa pertambahan panjang dari *outlet bend* sepanjang 3 m, hal ini dimaksudkan agar penggunaan definisi *boundary condition outflow* dapat diterapkan
- b) Pembuatan *meshing* dilakukan untuk setiap variasi penggunaan *guide vane*. *Meshing* dilakukan dengan

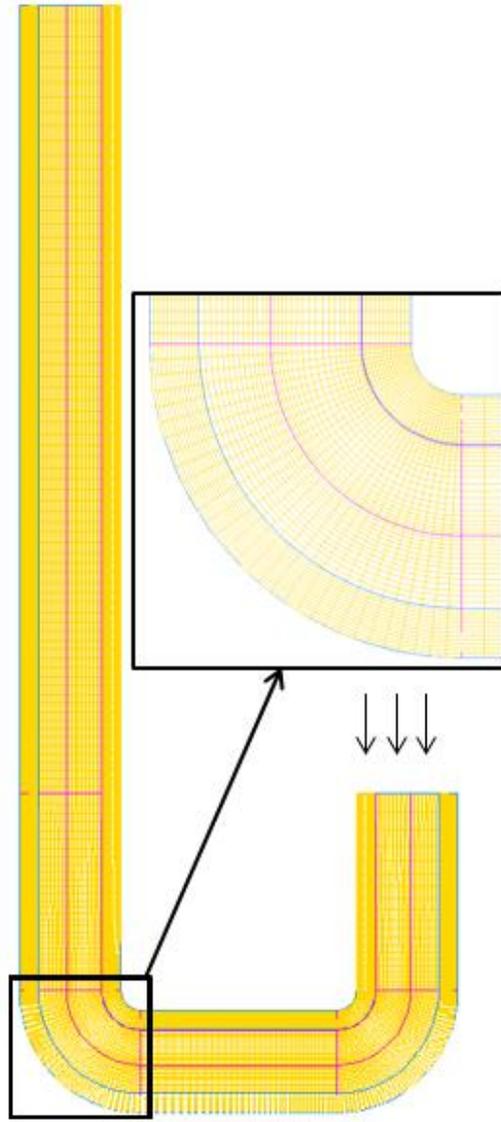
membagi volume menjadi 3 bagian, yaitu *upstream channel inlet*, *bend*, dan *downstream channel outlet*. *Meshing* volume yang digunakan dengan tipe *hexahedral-map*. Metode *meshing* yang digunakan adalah *grading* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada semua dinding, baik *inner wall* maupun *outer wall*. Hal ini dilakukan sebagai efek adanya *wall function*. Hasil dari *meshing bend* dengan dan tanpa menggunakan *guide vane* diilustrasikan oleh gambar 3.2 dan 3.3.





Gambar 3.2. Meshing pada *modified octagonal U-bend tanpa guide vane*





(b) +Z view

Gambar 3.3 Meshing modified octagonal U-bend dengan guide vane

- c) Mendefinisikan kondisi batas dilakukan dengan maksud untuk menentukan batasan dan parameter-parameter yang mungkin terjadi pada aliran. Kondisi batas *inlet* adalah *velocity inlet*. Kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Lalu untuk kondisi batas *inner wall*, *outer wall*, dan juga *guide vane* didefinisikan sebagai *wall*.

3.3.2 Tahap *post-processing* menggunakan piranti lunak simulasi CFD komersial

a) *Grid*

Langkah pertama yang dilakukan pada *software* Piranti lunak simulasi CFD komersial adalah *read* untuk data hasil *meshing*. Kemudian dilakukan *grid checking*. Setelah itu ditentukan dalam mm.

b) *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver* dan penentuan *turbulence model* yang digunakan. *Turbulence model* yang digunakan untuk penelitian ini adalah *k-ε Realizable* berdasarkan penelitian Nur Ikhwan (2009).

c) *Materials*

Merupakan penetapan jenis material yang akan digunakan yaitu udara dengan *density* (ρ) 1,182kg/m³ dan *viskositas* (μ) 1,848 x 10⁻⁵ N.s/m².

d) *Operating Conditions*

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar 101325 pascal.

e) *Boundary Conditions*

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji pada *inlet* maupun *outlet*. Daerah *inlet* merupakan *upstream*

channel inlet dan *outlet* adalah *downstream channel outlet*.

f) *Solution*

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

g) *Initialize*

Merupakan langkah perhitungan untuk mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi, *initialize* dihitung dari *velocity inlet*.

h) *Monitor Residual*

Merupakan proses iterasi sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-6} yang berarti proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga lebih kecil dari 10^{-6} .

i) *Iterate*

Langkah kelanjutan dari *monitor residual* adalah *iterate*, yang merupakan langkah perhitungan pada Piranti lunak simulasi CFD komersial. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai *convergence criterion* sebesar 10^{-6} .

j) *Grid independency*

Untuk mendapatkan ketepatan data pada langkah *post processing*, perlu dilakukan *grid independency*. *Grid independency* dapat menentukan tingkat serta struktur grid terbaik dan paling efisien agar hasil pemodelan mendekati data eksperimen.

Tabel 3.1 Analisis *grid independency static pressure* pada posisi *centerline* ($x/L=0$) untuk *bend* tanpa *guide vane*

Meshing	Total Grid	Static Pressure (Pa)
A	85155	-7,57
B	265860	-26,47
C	534359	-34,45
D	686759	-34,01
E	1215383	-35,24

Tabel 3.2 Analisis *grid independency static pressure* pada posisi *centerline* ($x/L_1=0$) untuk *bend* dengan *guide vane*

Meshing	Total Grid	Static Pressure (Pa)
F	74254	-7,57
G	246750	-26,47
H	503754	-34,44
I	650868	-34,00
J	1159080	-35,23

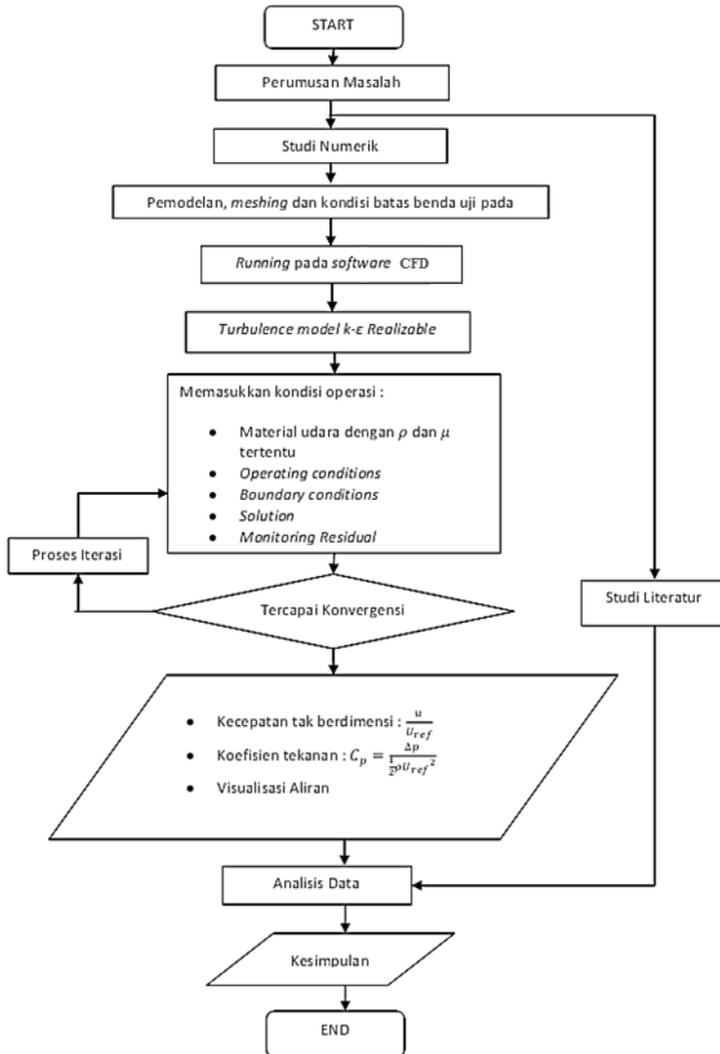
Tabel 3.1 dan tabel 3.2 menunjukkan bahwa variasi *meshing* model uji pada pemodelan 3D *modified octagonal U-bend* untuk kasus tanpa dan dengan menggunakan *guide vane* pada $Re_{Dh} = 6,4 \times 10^5$. Berdasarkan tabel 3.1,

meshing A merupakan *meshing* yang paling renggang dengan jumlah *grid* 85155, sedangkan *meshing* E adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *grid* 1215383. Dan berdasarkan tabel 3.2, *meshing* F merupakan *meshing* yang paling renggang dengan jumlah *grid* 74254, sedangkan *meshing* J adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *grid* 1159080. Selisih nilai *static pressure* antara *meshing* C, D, dan E di bawah dari 1%, begitu pula untuk *meshing* H, I, dan J juga di bawah dari 1%, sehingga dipilihlah variasi *meshing* C dan H untuk melakukan solusi numerik pada pemodelan piranti lunak simulasi CFD komersial. Karena dengan jumlah *grid* yang lebih sedikit sudah dapat menghasilkan nilai *pressure coefficient* yang relatif sama.

k) *Post Processing*

Dari hasil yang telah diperoleh, dapat divisualisasikan melalui tampilan *grid display*, plot kontur (tekanan, kecepatan), plot *vector* dll. sesuai dengan kebutuhan analisis.

Secara singkat prosedur penelitian numerik pada *modified octagonal U-bend* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *flowchart* yang ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir penelitian

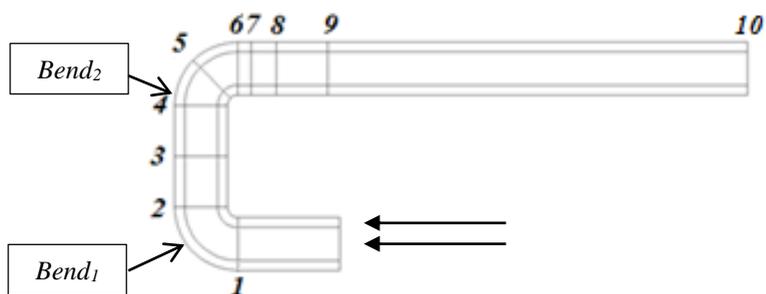
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditampilkan data, grafik dan penjelasan dari hasil studi numerik. Hasil studi ditampilkan dan dibahas dalam beberapa sub bab meliputi kecepatan pada penampang melintang (*cross section*) yang telah ditentukan, *pressure coefficient* (C_p) pada bagian *outerwall* dan *innerwall*, dan visualisasi aliran. Kemudian akan dilanjutkan pembahasan pada masing-masing variasi yaitu *modified octagonal U-bend* dengan dan *tanpa guide vane*.

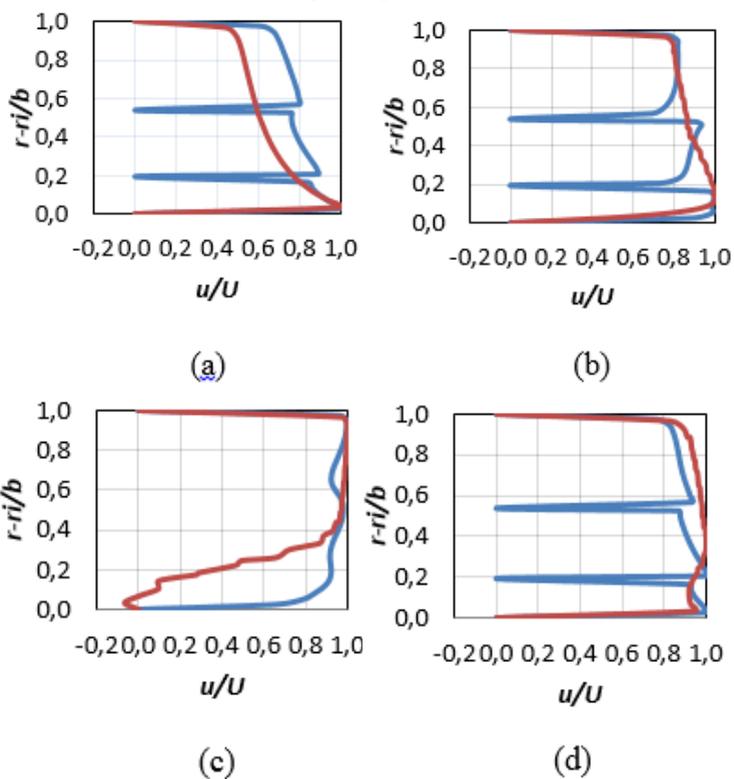
Secara garis besar pembahasan hasil dan analisa pada penelitian ini dibagi menjadi dua variasi, yaitu pembahasan hasil numerik dan visualisasi aliran pada *modified octagonal U-bend* dengan dan tanpa *guide vane*. Dalam setiap bagian diuraikan dengan hasil numerik dalam 4 macam bilangan Reynolds, yaitu sebesar $1,6 \times 10^5$, $2,4 \times 10^5$, $4,8 \times 10^5$, dan $6,4 \times 10^5$.

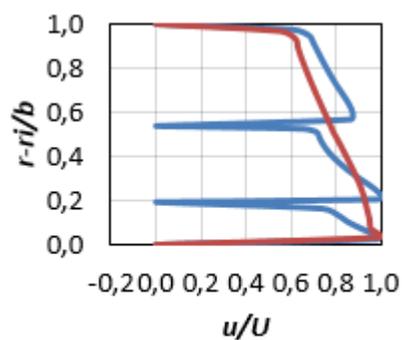
4.1 Distribusi Profil Kecepatan

Distribusi tekanan pada aliran yang melintas pada setiap posisi di dalam *modified octagonal U-bend* akan mempengaruhi profil kecepatan yang terjadi pada posisi tersebut. Gambar 4.2 memperlihatkan kondisi profil kecepatan searah radial *bend* tanpa *guide vane*. Distribusi kecepatan disajikan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U) fungsi posisi tegak lurus *streamline* tak berdimensi ($(r-r_i)/b$), dimana u adalah kecepatan lokal dan U merupakan kecepatan *maksimum* pada *section* yang sama. Selanjutnya r merupakan radius kelengkungan outer sedangkan r_i merupakan radius kelengkungan inner dimana $(r-r_{in})/b = 0$ adalah sisi *inner* dan $(r-r_{in})/b = 1$ adalah sisi *outer*, b didefinisikan sebagai lebar penampang *bend*. Berikut ini akan dibahas perkembangan *velocity profile* setiap *section*. Penempatan setiap *cross section* dapat dilihat pada gambar 4.1.

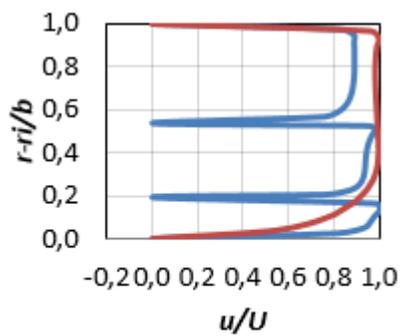


Gambar 4.1 Penempatan posisi *cross section*

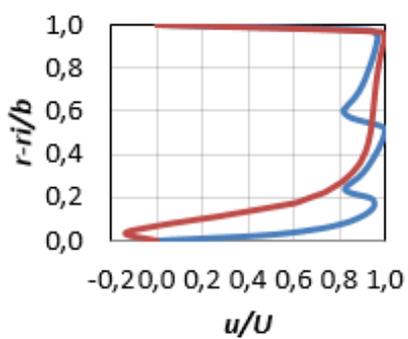




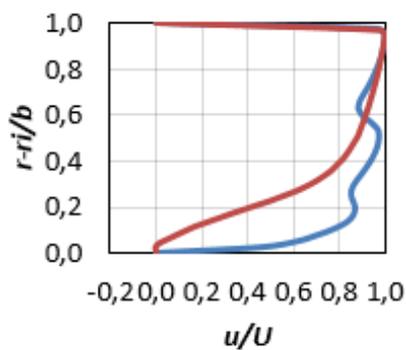
(e)



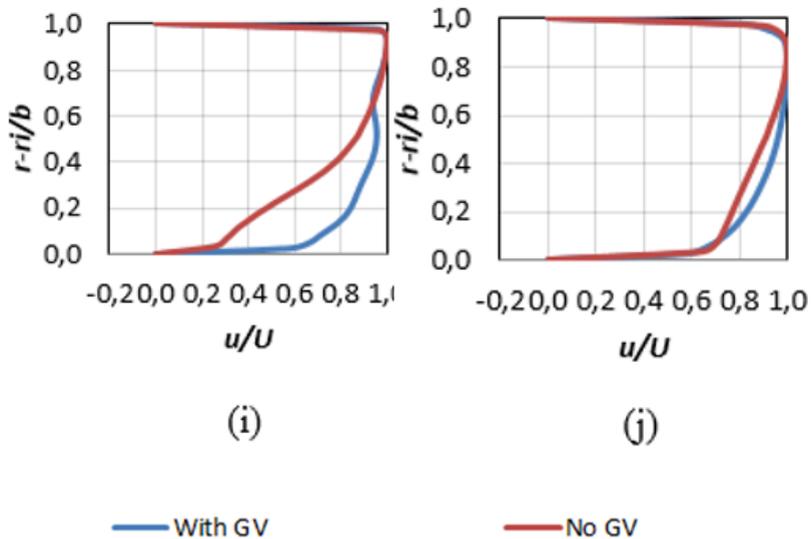
(f)



(g)



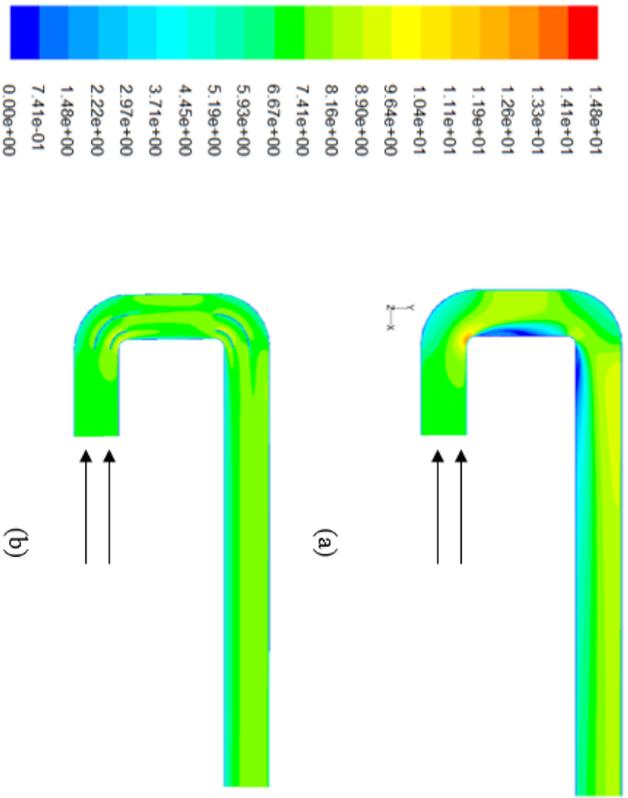
(h)



Gambar 4.2 Distribusi profil kecepatan (m/s) masing-masing *cross section modified octagonal U-bend* dengan tanpa *guide vane* untuk section a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6; g) 7; h) 8; i) 9; j) 10

Pada gambar 4.2 secara umum profil kecepatan di sepanjang sisi *upstream* sampai *downstream* dijelaskan sebagai berikut: saat masuk *test section*, profil kecepatan sudah mengalami perubahan karena telah melalui *bend* yang pertama seperti yang terlihat pada gambar 4.2 (a), selain itu pada gambar 4.2 (b) dapat terlihat bahwa terjadi *backflow* pada sisi *inner wall*. Pada saat tepat masuk daerah *bend* kedua (*cross section* 3), profil kecepatan cenderung mengalami defleksi ke sisi *inner*, ditunjukkan dengan adanya ketidaksimetrisan pada profil kecepataannya. Pada sudut 45° *bend* atau *cross section* 5 profil kecepatan secara jelas mengalami defleksi, dimana kecepatan maksimum bergeser menuju sisi *inner*. Tepat keluar *bend*, yaitu pada *cross section* 6 terjadi aliran balik pada sisi *inner*, hal ini mengindikasikan adanya *vortex*. Semakin menjauhi *bend*,

kecepatan maksimum kembali terdefleksi menuju sisi *outer*. Selanjutnya profil kecepatan mengalami proses *recovery* (*recovery process*) untuk mencapai kondisi normal, sebagaimana profil kecepatan pada *straight duct*. Proses *recovery* dilakukan untuk mencapai kestabilan profil pada sisi *inner* dan *outer*. Secara berangsur-angsur profil kecepatan di sisi *inner* mengalami *developing* dengan mendesak profil kecepatan pada sisi *outer*. Untuk dapat melihat aliran secara lebih umum dapat dilihat pada gambar 4.3.



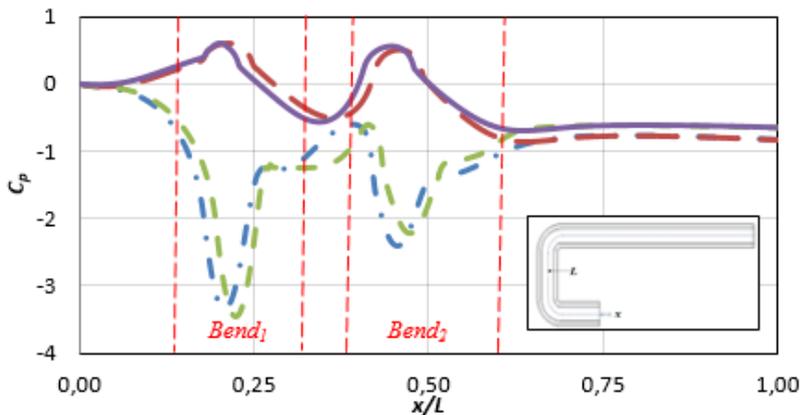
Gambar 4.3 Velocity (m/s) magnitude contour bend untuk (a) tanpa guide vane dan (b) dengan guide vane

4.2 Distribusi Pressure Coefficient (C_p)

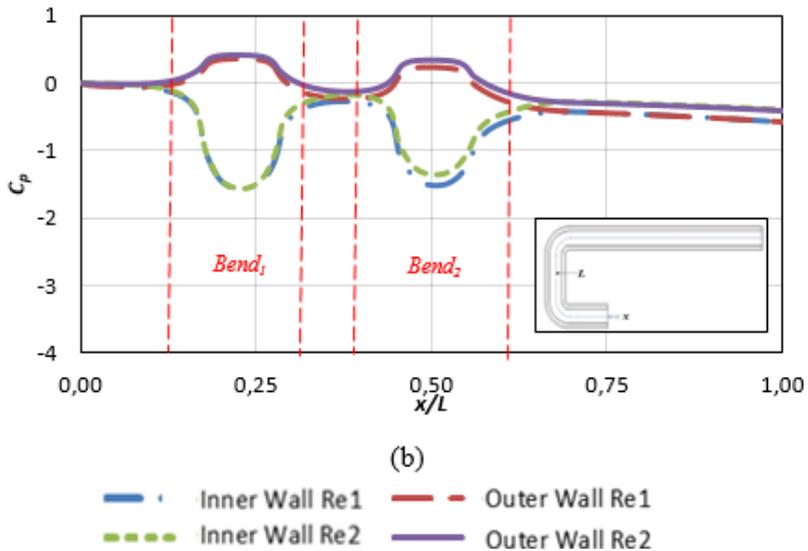
Untuk mendiskripsikan persamaan gerak pada aliran fluida disepanjang streamline dapat dibagi menjadi dua yaitu aliran searah *streamline* (s) dan tegak lurus *streamline* (r). Berikut ini akan dijelaskan distribusi koefisien tekanan searah dan tegak lurus *streamline*.

4.2.1 Searah *Streamline* (s)

Dalam pembahasan ini, grafik distribusi yang disajikan meliputi dua *bend*, untuk variasi dengan dan tanpa *guide vane* serta variasi bilangan Reynolds. Karakteristik aliran dijelaskan dengan mengacu kepada distribusi *wall pressure coefficient* (C_p) sebagai representasi dari distribusi tekanan.



(a)



Gambar 4.4 Distribusi C_p inner dan outer wall modified octagonal U-bend pada bilangan $Re_1 = 1,6 \times 10^5$ dan $Re_2 = 6,4 \times 10^5$ untuk variasi (a) tanpa guide vane dan, (b) dengan guide vane

Pada gambar 4.4 menjelaskan hasil penelitian distribusi wall pressure coefficient (C_p) pada modified octagonal U-bend dengan dan tanpa guide vane. Pada bend dengan guide vane dapat terlihat bahwa nilai C_p maksimum outer wall yang terjadi lebih rendah dibandingkan dengan bend tanpa guide vane, lalu untuk nilai C_p minimum inner wall yang terjadi mempunyai nilai yang lebih besar dari pada bend tanpa guide vane. Hal ini menunjukkan bahwa untuk bend dengan menggunakan guide vane memiliki rentang antara nilai C_p maksimum dan minimum yang lebih kecil dibandingkan dengan bend tanpa guide vane.

Distribusi nilai C_p sisi inner untuk semua bend cenderung mengalami penurunan yang signifikan yang

menandakan bahwa pada daerah tersebut terjadi penurunan tekanan atau *adverse pressure gradient* ($\frac{\partial p}{\partial x} < 0$) yaitu suatu kondisi daerah dengan gradien tekanan negatif akibat dari radius kelengkungan *bend* yang kecil sehingga aliran fluida tidak bisa mengikuti kontur saat berbelok. Distribusi nilai C_p sisi outer untuk semua *bend* cenderung mengalami kenaikan yang signifikan yang menandakan bahwa pada daerah tersebut terjadi kenaikan tekanan atau *favorable pressure gradient* ($\frac{\partial p}{\partial x} > 0$) yaitu suatu kondisi daerah dengan gradien tekanan positif.

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

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

$$p_{inlet} - p_{outlet} = \Delta C_p \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 \quad (4.2)$$

$$\frac{p_{inlet}}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_{outlet}}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + h_{lm} \quad (4.3)$$

Asumsi:

- luas penampang sama, maka $v_1 = v_2$

- ketinggian sama pada posisi horizontal, maka $z_1 = z_2$

$$\frac{p_{inlet}}{\rho} = \frac{p_{outlet}}{\rho} + h_{lm} \quad (4.4)$$

$$p_{inlet} - p_{outlet} = K \rho \frac{U_{ref}^2}{2} \quad (4.5)$$

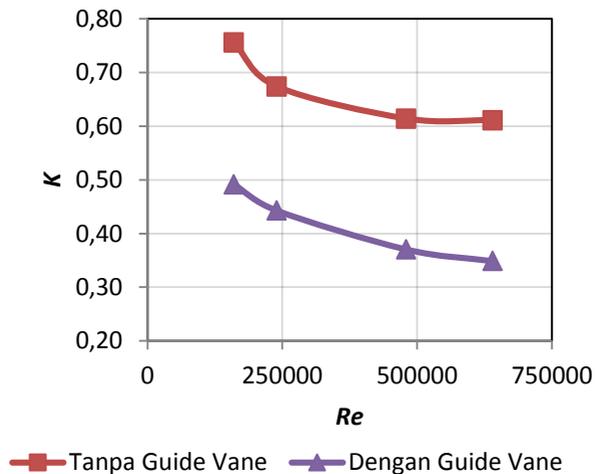
Berdasarkan persamaan (4.2) dan (4.5) maka dapat direpresentasikan bahwa ΔC_p antara *inlet* dan *outlet bend* secara tidak langsung menunjukkan *bend loss coefficients* (K) pada *bend*, dengan semakin kecilnya nilai *bend loss coefficients* maka semakin kecil juga nilai *headloss* pada *bend* tersebut. Nilai *bend loss coefficients* (K) dan ΔC_p (*inner-outer*) pada *modified octagonal U-bend* ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1. Perbandingan nilai K dan ΔC_p (*inner-outer*) dari hasil penelitian numerik pada *modified octagonal U-bend* dengan dan tanpa *guide vane* untuk keempat bilangan Reynolds.

Variasi	Bilangan Reynolds	K_{bend2}	ΔC_p (<i>inner-outer</i>)
Tanpa <i>guide vane</i>	$1,6 \times 10^5$	0,7559	2,9084
	$2,4 \times 10^5$	0,6737	2,8946
	$4,8 \times 10^5$	0,6140	2,7436
	$6,4 \times 10^5$	0,6109	2,7701
Dengan <i>guide vane</i>	$1,6 \times 10^5$	0,4916	1,7490
	$2,4 \times 10^5$	0,4427	1,7511
	$4,8 \times 10^5$	0,3704	1,7215
	$6,4 \times 10^5$	0,3487	1,7028

Pada tabel 4.1 dapat terlihat bahwa nilai ΔC_p (*inner-outer*) tidak berubah secara signifikan seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds. **Xiong dan Chung (2008)** menyatakan bahwa pada penelitiannya ketika nilai $Re < 100$, tidak terjadi aliran balik dan separasi. Ketika $Re > 100$, muncul *vortex* dan separasi

aliran serta berkembang lebih besar lagi. Lalu ketika $Re > 1000-1500$, bentuk dan ukuran dari *inner* dan *outer vortices* menjadi hampir konstan. Pada penelitian ini diduga bilangan Reynolds yang digunakan telah mencapai batas dimana sudah tidak akan ada perkembangan *vortex* lebih lanjut. Sedangkan timbulnya *vortex* diawali oleh adanya ΔC_p (*inner-outer*). Sehingga hal ini bersesuaian seperti penelitian yang telah dilakukan **Xiong dan Chung (2008)**.



Gambar 4.5 Bend loss coefficients (K) vs Re number pada *modified octagonal U-bend*

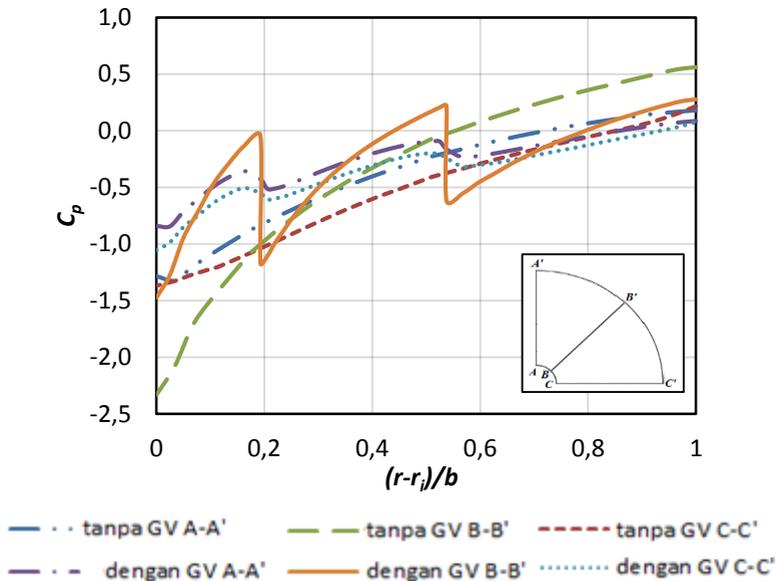
Seperti yang terlihat pada gambar 4.5, penambahan *guide vane* pada *modified octagonal U-bend* dapat menurunkan nilai K secara signifikan. Selain itu peningkatan bilangan Reynolds menyebabkan penurunan nilai K , hal ini disebabkan karena kemampuan aliran dalam melawan *adverse pressure* semakin tinggi. Namun pada bilangan Reynolds tertentu, peningkatan

bilangan Reynolds sudah tidak akan menyebabkan penurunan nilai K secara signifikan.

4.2.2 Distribusi C_p pada kelengkungan *bend*

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

Berdasarkan persamaan (2.3) semakin besar jari-jari kelengkungan maka tekanan yang dimiliki juga semakin besar, begitu juga sebaliknya. Oleh karena itu akan terjadi perbedaan tekanan antara dinding *inner* dengan dinding *outer*. Besarnya perbedaan antara dinding *inner* dengan *outer* akan meningkatkan potensi terjadinya separasi.



Gambar 4.6 Distribusi C_p tegak lurus *streamline* untuk $bend_2$ dengan dan tanpa *guide vane*

Grafik distribusi C_p yang ditunjukkan pada gambar 4.6 memberikan informasi bahwa dalam penambahan dan tanpa penambahan *guide vane* cenderung menunjukkan pola yang cukup berbeda. Pada potongan A-A' pada pada tanpa *guide vane* didapatkan selisih C_p sebesar 0,14 sedangkan pada $bend_2$ dengan *guide vane* didapatkan selisih C_p yang lebih kecil sebesar 0,92. Pada potongan B-B' didapatkan selisih C_p pada tanpa *guide vane* sebesar 2,89 sedangkan pada $bend_2$ dengan *guide vane* didapatkan selisih C_p yang lebih kecil sebesar 1,75. Pada potongan C-C' didapatkan selisih C_p pada tanpa *guide vane* sebesar 1,58 sedangkan pada $bend_2$ dengan *guide vane* didapatkan selisih C_p yang lebih kecil sebesar 1,13. Berdasarkan gambar 4.6 tersebut, maka dapat diketahui bahwa pada $bend_2$ tanpa *guide vane* memiliki selisih nilai C_p (*inner-outer*) yang

lebih besar, hal tersebutlah yang menyebabkan *bend* tanpa *guide vane* terjadi separasi aliran.

4.3 Visualisasi Aliran

Pada sub-bab ini akan disampaikan visualisasi dan analisis mengenai aliran fluida melalui *modified octagonal U-bend* yang dibuat pada piranti lunak simulasi CFD komersial.. Dari visualisasi aliran tersebut akan diperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai karakteristik aliran yang terjadi pada *modified octagonal U-bend*.

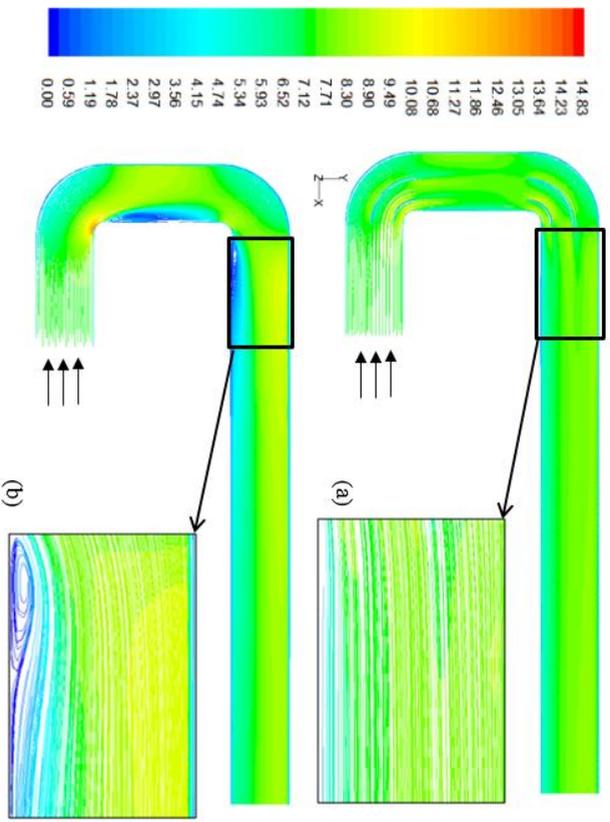
Berdasarkan gambar 4.7 dapat terlihat visualisasi aliran yang terjadi untuk *bend* dengan dan tanpa *guide vane*. Untuk *bend* tanpa *guide vane* dapat terlihat bahwa pada sisi *inner wall outlet bend* mulai terjadi separasi maka terjadilah aliran sekunder yang menyebabkan terjadinya *vortex*. Pada *bend* dengan menggunakan *guide vane* tidak terlihat adanya *vortex*. Distribusi aliran sekunder pada gambar 4.7 (b) menunjukkan adanya *vortex flow* pada section 6 terdapat pada sisi *inner* di bagian *corner*. Daerah midspan merupakan daerah yang jauh dari pusat *vortex* sehingga tidak begitu terpengaruh oleh lapisan batas dinding dengan lapisan batas radius luar dan lapisan batas dinding radius dalam. Pada daerah sudut pertemuan antara upper dan dinding radius dalam, dapat dilihat adanya aliran sekunder yang ditandai dengan adanya vektor kecepatan yang secara tiba-tiba berputar menuju dinding. Pada gambar 4.7 juga menunjukkan bahwa penggunaan *guide vane* dalam upaya mengontrol aliran disimpulkan sukses untuk meningkatkan keseragaman aliran, hal ini menguntungkan karena dapat mengurangi tingkat kebisingan pada *duct* sesuai dengan penelitian **Güden (2014)**.

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

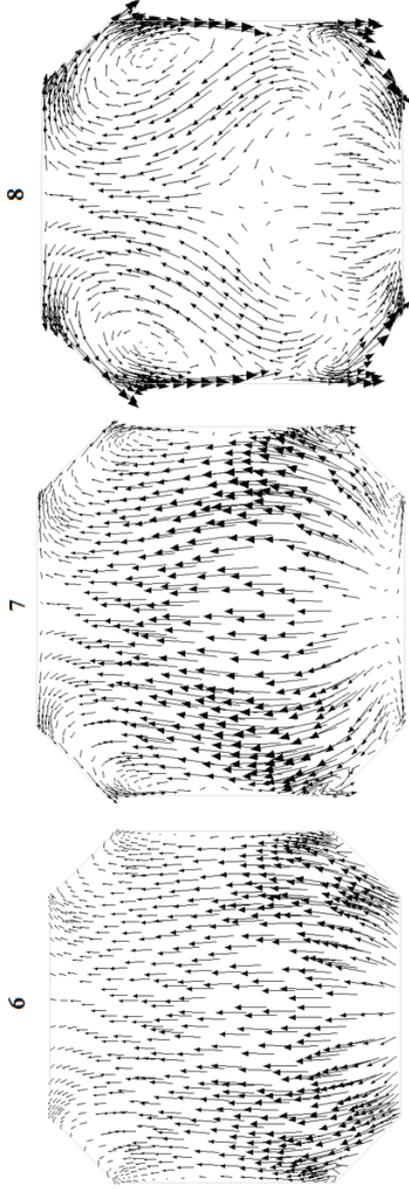
dinding nilai kecepatannya semakin besar. Kondisi ini memungkinkan seolah-olah aliran berotasi di dalam pengembangan dua *boundary layer* pada arah yang berbeda akan menghasilkan *vortex* yang terpilin. Dengan adanya *vortex* terpilin dari aliran sekunder maka akan mengakibatkan *pressure drop* aliran. *Vortex* terpilin ini dapat mengurangi *effective flow area* dan menyebabkan terjadinya *blockage effect*.

Pada gambar 4.8 (b) dapat terlihat bahwa terdapat adanya unsur kecepatan ke arah sumbu z yang cukup besar yakni dari sisi *inner wall* ke *outer wall*, hal ini menunjukkan adanya aliran sekunder. Hal tersebut menyebabkan adanya *vortex* tepat setelah daerah *bend₂* pada sisi *inner wall*. Selain itu juga terdapat adanya aliran sekunder di kedelapan sudut dari *octagonal bend₂*, namun aliran sekunder yang terjadi masih lebih baik bila dibandingkan dengan aliran sekunder yang terjadi pada siku *rectangular bend* (gambar 2.5). Seperti yang terlihat pada gambar 4.8 (c) dan (d), semakin menjauhi *bend₂* komponen kecepatan ke arah y dan z akan semakin kecil.

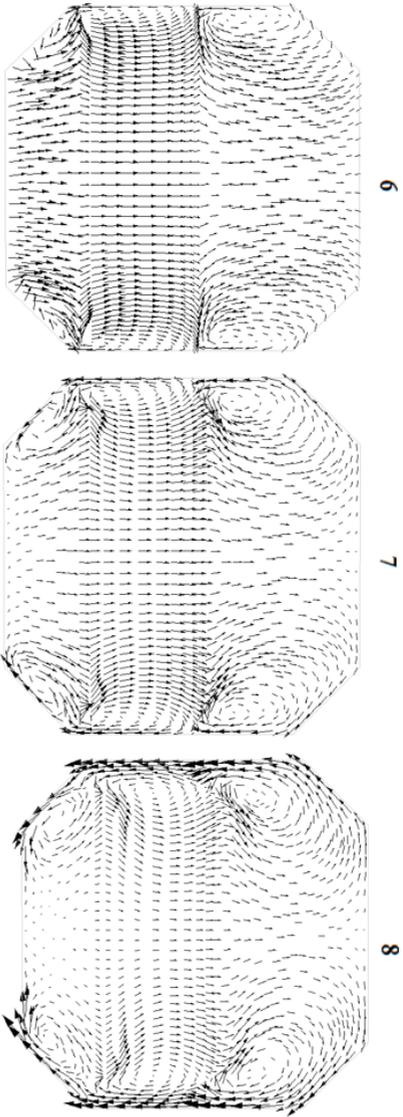
Pada gambar 4.9 (b) dapat terlihat bahwa terdapat adanya unsur kecepatan ke arah sumbu z pada sisi *inner wall* ke *outer wall*, hal ini menunjukkan adanya aliran sekunder, namun pada *bend* dengan *guide vane* aliran sekunder tersebut tidak sampai menyebabkan adanya *vortex* pada sisi *inner wall*. Seperti halnya *bend* tanpa *guide vane*, terdapat pula adanya aliran sekunder di kedelapan sudut dari *octagonal bend*, namun aliran sekunder yang terjadi di sudut pada *bend* dengan *guide vane* lebih banyak dibandingkan dengan tanpa *guide vane*. Hal ini dikarenakan penambahan *guide vane* menyebabkan semakin banyak adanya *sudut* pada saluran. Seperti yang terlihat pada gambar 4.9 (c) dan (d), semakin menjauhi *bend* komponen kecepatan ke arah y dan z akan semakin kecil.



Gambar 4.7 Parhline dengan pewarnaan berdasarkan *velocity magnitude (m/s)* untuk *modified octagonal U-bend* (a) dengan *guide vane* dan (b) tanpa *guide vane*



Gambar 4.8 Velocity vector pada modified octagonal U-bend tanpa guide vane pada cross section 6, 7, dan 8



Gambar 4.9 Velocity vector pada modified octagonal U-bend dengan guide vane pada cross section 6, 7, dan 8

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis numerik yang telah dilakukan mengenai karakteristik aliran melalui *modified octagonal U-bend* dengan dan tanpa *guide vane* untuk studi kasus menggunakan bilangan Reynolds sebesar $1,6 \times 10^5$, $2,4 \times 10^5$, $4,8 \times 10^5$ dan $6,4 \times 10^5$, didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Profil kecepatan pada *modified octagonal U-bend* dengan *guide vane* lebih cepat untuk kembail menjadi simetris
2. Penambahan *guide vane* dan peningkatan bilangan Reynolds pada aliran melalui *modified octagonal U-bend* mengurangi *pressure drop losses*. Peningkatan bilangan Reynolds pada aliran melalui *modified octagonal U-bend* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap ΔC_p (*inner-outer*).
3. Pada aliran melalui *modified octagonal U-bend* tanpa *guide vane* terjadi separasi aliran pada sisi *inner wall* dari *outlet bend* sehingga menimbulkan *vortex*, sedangkan pada *modified octagonal U-bend* dengan *guide vane* tidak terdapat *vortex*. Lebih banyak aliran sekunder secara melintang pada *modified octagonal U-bend* dengan *guide vane* dibandingkan tanpa *guide vane*. Pada *bend* dengan menggunakan *guide vane* meningkatkan keseragaman aliran.

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai

pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan validasi secara eksperimen agar didapatkan distribusi data yang aktual. Untuk mempermudah *meshing*, *guide vane* dibuat berupa *face* dan diperpanjang dari *inlet* hingga *outlet* dan didefinisikan sebagai *interior* pada bagian selain *bend*
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan variasi jarak penempatan *guide vane* pada *modified octagonal U-bend*, rentang bilangan Reynolds yang lebih jauh, beberapa konfigurasi *U-bend* yang berbeda agar dapat dibandingkan, dan variasi *turbulence model*.

DAFTAR PUSTAKA

- Danbon, F. dan Sollicec, C. 2000. **Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque**. Nantes: Ecole des Mines de Nantes, Département Systèmes.
- Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2010. **Introduction to Fluid Mechanics, 7th edition**. New York: John Wiley and Sons.
- Güden, Y. 2014. **Analysis and Control of Complex Flows in U-Bends Using Computational Fluid Dynamics**. Ankara: Middle East Technical University, Master of Science in Mechanical Engineering Department
- Ikhwan, Nur. 2009. **Benchmarking Akurasi Pemodelan Turbulensi Dalam Mensimulasikan Aliran Unisotropic Turbulence**. Surabaya: Project Grant QUE Project, sub-Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
- Liou, T.M. Lee, H.L. dan Liao, C.C. 2001. **Effect of Inlet Guide Vane Number in a Side-Dump Combuster Inlet**. Taiwan: Elsevier.
- Miller, D.S. 1990. **Internal Flow System, 2nd edition**. Bedford: BHRA.
- Nakayama Y., dan Boucher R.F. 1998. **Introduction to Fluid Mechanics**. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Rup, K., dan Sarna, P. 2011. **Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow**. Cracow: Elsevier.
- Sutrisno, M.D. 2008. **Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Tiga Buah Guide Vanes terhadap Pressure**

Drop Aliran di Dalam 90° Rectangular Elbow. Surabaya: Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Suryan, A., Kim, H.D., dan Setoguchi, T. 2010. **A Studi on Flow Characteristic of Compressible Viscous Flow through Pipe Bends.** Dhaka: 13th Asian Congress of Fluid Mechanics.

Xiong, R., dan Chung, J.N. 2008. **Effects of Miter Bend on Pressure Drop and Flow Structure in Micro-Fluidic Channels.** Gainesville: International Journal of Heat and Mass Transfer 51.

BIODATA PENULIS



Louis Zaldhy Lazuardhy Purnama Putra lahir di Jakarta pada tanggal 18 Maret 1994. Anak ketiga dari tiga bersaudara. Riwayat pendidikan penulis dimulai di TK Islam Al-Hasanah Tangerang (1998-1999), SD Islam Al-Hasanah Tangerang (1999-2005), SMPN 134 Jakarta (2005-2008), SMA Negeri 78 Jakarta (2008-2011), dan dilanjutkan di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Di Jurusan Teknik Mesin ini Penulis mengambil Bidang Studi Konversi Energi. Selama menempuh pendidikan di bangku kuliah, penulis banyak mengikuti kegiatan di dalam kampus, baik dalam mengikuti kepanitiaan ataupun organisasi. Penulis pernah menjabat sebagai ketua divisi *event* di Mesin Music Club, ketua pelaksana Indonesia Energy Marathon Challenge 2014, *steering committee* Mechanical City 2014, dan lain lain.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)