



TUGAS AKHIR - TM 091585

STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN CINCIN PADA SISI *UPSTREAM* PIPA *CIRCULAR* DENGAN PEMBESARAN PENAMPANG (SUDDEN ENLARGMENT)

KHOIRUL BUDIYANTO
NRP. 2113 106 015

Dosen Pembimbing
Dr. WAWAN ARIES WIDODO, ST, MT.

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



TUGAS AKHIR - TM 091585

**STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN CINCIN
PADA SISI *UPSTREAM* PIPA *CIRCULAR* DENGAN
PEMBESARAN PENAMPANG (*SUDDEN ENLARGMENT*)**

KHOIRUL BUDIYANTO
NRP. 2113 106 015

Dosen Pembimbing
Dr. WAWAN ARIES WIDODO, ST, MT.

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



FINAL PROJECT - TM 091585

**NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDITIONAL
RING IN THE UPSTREAM SIDE OF SUDDEN
ENLARGEMENT PIPE**

**KHOIRUL BUDIYANTO
NRP 2113 106 015**

**Counsellor
Dr. WAWAN ARIES WIDODO, ST, MT.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya
2017**

STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN CINCIN PADA SISI UPSTREAM PIPA CIRCULAR DENGAN PEMBESARAN PENAMPANG (SUDDEN ENLARGMENT)

Nama Mahasiswa : Khoirul Budiyanto
NRP : 2113 106 015
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT.

Abstrak

Dalam sistem perpipaan terdapat banyak penggunaan pipa *circular* dengan pembesaran penampang yang mana akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut disebabkan karena adanya separasi atau perubahan arah aliran fluida pada *step downstream* yang melalui saluran tersebut. Nilai penurunan tekanan (*pressure drop*) pada aliran yang melalui pipa tersebut dipengaruhi oleh besarnya ukuran *step* antara *upstream* dan *downstream*, yang menyebabkan terjadinya separasi dan aliran sekunder (*secondary flow*) pada *downstream*. 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 pipa dalam circular dengan pembesaran penampang.

Model uji yang akan digunakan di dalam studi ini berupa gangguan aliran (*bump*) pada sisi *upstream* pipa. Fluida yang mengalir adalah udara dengan kecepatan 2 m/s pada suhu ruangan yang *incompressible*, *viscous*, *steady* dan mempunyai profil kecepatan uniform pada sisi inlet dengan Re_D sebesar 11200. Penelitian dilakukan secara numerik 3D menggunakan piranti lunak *Computation Fluid Dynamics* (CFD) komersial dengan model turbulensi $k-\epsilon$ *Realizable*.

Hasil pada studi ini didapatkan jika tanpa *bump* maka jarak *reattachment* pada z/h *downstream* sebesar 6.398.

Sedangkan berturut-turut jika ditambahkan bump dengan variasi jarak dari step z/h sebesar -0.8, -1.6, -2.4 dan -3.2 maka didapatkan hasil jarak *reattachment* sebesar 6.246, 4.815, 4.741 dan 4.816

Kata kunci : sudden enlargment, k- ϵ Realizable, pressure drop, secondary flow

Numerical Study Of the effect of additional ring in the upstream side of sudden enlargement pipe

Name :Khoirul Budiyanto
NRP :2113 106 015
Department :Teknik Mesin FTI – ITS
Counsellor :Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT.

ABSTRACT

In the piping system there are many uses of circular pipe with sudden enlargement. Sudden Enlrgment pipe will cause pressure loss on the flow. This is due to separation or back flow on downstream through the pipe. Pressure drop the pipe is influenced by comparison of inlet and outlet pipe diameter. Separation of flow can cause vortex. It will cause loss of energy. It is necessary to minimize the pressure drop.in the sudden enlargement pipe line.

In final project will be carried out a research effect addition of disturbance body on the upstream side enlargent pipe. The fluid flow is air at speed 2 m/s, incompressible, viscous, steady and uniform velocity profile at inlet pipe . On inlet side with a Re_D 11200. 3D numerical simulation was conducted by using Computation Fluid Dynamic (CFD) software with $k-\varepsilon$ realizableturbulence model and discrization type use second order.

The result is without bump the reattachment at z/h was 6.398. If added bump with variation of distance at z/h downstream -0.8, -1.6, -2.4, and -3.2 is 6.246, 4.815, 4.741 and 4.816. At the distance $z/h = -2.4$ gives the shortest reattachment.

Key words : sudden enlargment, $k-\varepsilon$ Realizable, pressure drop, secondary flow

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

**STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN
CINCIN PADA SISI *UPSTREAM* PIPA *CIRCULAR*
DENGAN PEMBESARAN PENAMPANG (*SUDDEN
ENLARGMENT*)**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

Khoirul Budiyanto

NRP. 2113106015

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA
NIP. 196001291897011001
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD.
NIP. 196412281990031002
4. Vivien Suphandani, ST, M.Eng. PhD.
NIP. 197804012002121001



SURABAYA

JULI, 2017

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur hanya milik Allah SWT, Tuhan penguasa alam, yang selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir. Dalam penulisan tugas akhir ini tidak semata-mata karena kemampuan penyusun, melainkan karena adanya bantuan dari berbagai pihak yang telah memberikan dorongan moral, pikiran dan tenaga untuk membantu penyusunan tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu pada kesempatan ini saya ucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak, Ibu tercinta (Sunardi dan Uni Purnamawati Alm) yang telah memberikan dorongan dan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas dan tak terbalaskan, serta doa restunya.
2. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyumbangkan waktu, tenaga, serta pikirannya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Bapak Bambang Pramujati, ST., MT., PhD. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Bapak dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini.
5. Semua Bapak dan Ibu dosen Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu selama kuliah. Juga untuk seluruh karyawan Teknik Mesin atas pelayanannya.
6. Ferdi Selaku patner tugas akhir. Juga seluruh angkatan 2013 Lintas Jalur atas canda dan tawanya selama kuliah dan teman seperjuangan selama asistensi.
7. Seluruh warga Mesin ITS serta berbagai pihak yang belum tertulis dan yang tidak mungkin disebutkan satu

persatu yang telah berperan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

8. Pak Sujianto dan Pak Soegeng selaku direksi PT Orela yang sudah memberikan dukungan dan beasiswa kuliah.
9. Teman teman PT Orela Shipyard Pak Dwi Arisandi, Pak Gurit, Mas Aris, Mas Didik, dan teman Head Office semuanya yang sudah support untuk memback up posisi saya ketika kuliah sampai tugas akhir selesai.
10. Istri tercinta Putri Sekar Asmarati yang sudah memberikan semangat untuk segera lulus sebelum mempunyai momongan.

Akhir kata semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan, oleh karena itulah segala kritik dan saran sangat kami harapkan.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid pattern across the entire page.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

Abstrak	i
<i>Abstract</i>	iii
Lembar Pengesahan.....	v
Kata Pengantar	vii
Daftar Isi.....	ix
Daftar Gambar.....	xiii
Daftar Tabel.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Dasar Teori	5
2.1.1 Bilangan Reynolds	5
2.1.2 Persamaan Euler Dalam Koordinat <i>Streamline</i>	6
2.1.3 <i>Pressure coefficient</i> (C_p).....	8
2.1.4 Aliran Didalam pipa circular pembesaran penampang	8
2.1.4.1 Mekanisme Terjadinya Separasi.....	9
2.1.4.2 Aliran Sekunder.....	10
2.1.4.3 Fenomena <i>Boundary Layer</i>	10
2.1.5 Penurunan Tekanan (<i>Pressure Drop</i>).....	11
2.1.6 Model Turbulensi	13
2.1.6.1 <i>Spalart-Almaras</i>	13
2.1.6.2 Model $k-\varepsilon$	13
2.1.6.3 Model $k-\omega$	14
2.1.6.4 <i>Reynolds Stress Number</i>	15
2.1.7 Kondisi Batas	15

2.1.7.1	<i>Flow Inlet dan Exit Boundaries</i>	15
2.1.7.2	<i>Wall, Repeating, dan Pole Boundaries</i> ...	16
2.1.7.3	<i>Internal Cell Zones</i>	16
2.1.7.4	<i>Internal Face Boundaries</i>	16
2.2	Penelitian Terdahulu.....	17
2.2.1	Karakteristik Aliran pada pipa circular pembesaran penampang.....	17
2.2.2	Simulasi Aliran pipa circular pembesaran penampang.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		23
3.1	Geometri pipa circular pembesaran penampang.....	23
3.2	Metode Numerik.....	24
3.3.1	<i>Tahap Pre-Processing</i>	24
3.3.2	<i>Tahap Post Processing</i>	26
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Analisa aliran pada pipa circular pembesaran penampang tanpa <i>circular bump</i>	31
4.2	Analisa aliran pipa <i>circular</i> pembesaran penampang (<i>sudden enlargement</i>) tanpa <i>bump</i> tanpa dan dengan penambahan <i>bump</i>	36
4.2.1	Panjang <i>Reattachment</i>	36
4.2.2	Distribusi Profil Kecepatan	39
4.2.3	Distribusi Intensitas Turbulensi.....	44
4.2.4	<i>Coefficient Friction (Cf)</i>	47
4.2.5	<i>Coefficient of Pressure (Cp)</i>	49
BAB V PENUTUP.....		55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....		xviii
LAMPIRAN		

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid-like pattern across the entire page.

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Distribusi Kecepatan pada penampang pipa	5
Gambar 2.2.	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i>	7
Gambar 2.3.	Separasi pada step <i>downstream</i>	10
Gambar 2.4.	Kerugian koefisien untuk aliran melalui pipa dengan perubahan area secara mendadak	12
Gambar 2.5.	Grafik C_p terhadap x/h untuk perbedaan model turbulen dan <i>near-wall treatment</i>	18
Gambar2.6.	Perbandingan distribusi kecepatan pada sudut aliran pipa <i>circular</i> dengan pembesaran penampang yang diprediksi dengan model turbulen yang berbeda $\alpha=0^0$, $Re= 38000$	19
Gambar 2.7.	Aliran pada <i>Backward-Facing Step</i>	20
Gambar 2.8.	Vektor kecepatan disekitar pembesaran penampang	21
Gambar 2.9.	Vektor kecepatan pada outlet <i>Backward-Facing Step</i>	22
Gambar 3.1.	Geometri pipa <i>circular</i> dengan pembesaran penampang	24
Gambar 3.2	Variasi jarak bodi pengganggu	25
Gambar 3.3.	<i>Meshing</i> benda uji tampak isometric	26
Gambar 3.4.	<i>Meshing</i> benda uji tampak X+	26
Gambar 3.5.	Domain pipa <i>sudden expansion</i>	27

Gambar 3.6. Grafik <i>grid independency</i>	29
Gambar4.1. Visualisasi kontur kecepatan pada pipa <i>circular</i> pembesaran penampang (<i>sudden enlargement</i>) tanpa <i>bump</i>	33
Gambar 4.2. Titik <i>Reattachment</i>	34
Gambar 4.3. Visualisasi kontur tekanan statis	34
Gambar 4.4. Grafik <i>coefficient pressure</i> (C_p) pemodelan tanpa <i>bump</i>	35
Gambar 4.5. Grafik <i>coefficient friction</i> (C_f) pemodelan tanpa <i>bump</i>	36
Gambar4.6. <i>Resirkulasi</i> aliran tanpa menggunakan <i>bump</i> dan dengan variasi jarak <i>bump</i>	38
Gambar 4.7. Grafik panjang <i>reattachment</i>	39
Gambar4.8. Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> z/h , model pipa <i>circular</i> dengan pembesaran penampang tanpa dan dengan penambahan <i>bump</i>	42
Gambar4.9. Visualisasi kontur kecepatan model pipa <i>circular</i> dengan pembesaran penampang (<i>sudden enlargement</i>) tanpa <i>bump</i> dan dengan penambahan pengganggu <i>bump</i>	44
Gambar4.10. Perbandingan grafik intensitas turbulensi pada <i>cross section</i> $z = 0h$	45
Gambar4.11. Visualisasi kontur intensitas turbulensi tanpa <i>bump</i> dan dengan penambahan <i>bump</i>	48

Gambar4.12. Perbandingan grafik *Coefficient Friction* tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump*..... 49

Gambar4.13. Perbandingan grafik *Coefficient pressure* tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump*..... 51

Gambar4.14. Perbandingan tekanan statis pada tiap pemodelan geometri tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump*.....53

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

The background of the page is a repeating pattern of the ITS logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid pattern across the entire page.

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Hasil studi <i>reattachment point</i> untuk aliran turbulen.	17
Tabel 2.2. Perbandingan prediksi <i>reattachment length</i>	22
Tabel 3.1. Hasil <i>grid independensi</i> benda uji tanpa <i>bump</i>	28
Tabel 4.1. Perbandingan jarak <i>reattachment</i>	38
Tabel 4.2. Perbandingan nilai <i>pressure drop</i>	50

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid-like pattern across the entire page.

BAB I PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam berbagai studi aliran fluida terdapat suatu permasalahan aliran didalam saluran perpipaan. Salah satunya yang sering kita jumpai pada sistem perpipaan adalah *aliran sudden enlargement*. *Sudden enlargement* adalah sebuah saluran yang mengalami ekspansi atau pembesaran penampang secara tiba-tiba pada bagian *downstream*. Pada aplikasinya saluran *sudden enlargement* banyak digunakan pada sistem perpipaan yang menyusun sistem pembangkit listrik, sistem pada kapal laut dan pada industry umumnya. Seperti yang sering kita jumpai adalah pada sambungan pipa yang dilakukan dengan cara pengelasan antara pipa diameter kecil disambung dengan aksesoris pipa (*fitting*) berupa pembesaran penampang secara tiba-tiba (*sudden enlargement*) ke pipa diameter besar.

Pada saluran *sudden enlargement* banyak fenomena aliran yang sangat komplek terjadi yaitu seperti munculnya separasi, resirkulasi dan *vortex*. Separasi aliran mengakibatkan adanya *blockage* pada aliran utama yang berakhir pada pengurangan debit (*flow rate*). Resirkulasi aliran dan *vortex* menyebabkan adanya aliran balik (*back flow*) sehingga mengganggu aliran utama pada pipa. Pada Tugas akhir ini dipilih konstruksi pipa penampang pembesaran secara tiba-tiba (*sudden enlargement*) dengan dengan gangguan (*bump*) berupa cincin lingkaran. Fungsi dari *bump* tersebut adalah untuk mengurangi adanya aliran balik sehingga kerugian yang dimiliki konstruksi pipa dengan penampang secara tiba-tiba menjadi semakin kecil. Pemilihan variasi bentuk *bump* cincin lingkaran akan didasarkan pada pertimbangan bahwa pada sambungan pipa ini menggunakan pengelasan disekeliling diameter pipa. Penelitian yang dilakukan **Chong dkk (2013)** menggunakan studi numerik pipa *sudden enlargement* dengan memvariasikan jarak *downstream* dengan perbandingan panjang

downstream (lb) terhadap *shoulder* (h) sebanyak 1, 2, 3 & 4 yang disimulasikan dengan *Computasional Fluid Dinamic* (CFD).

Perhitungan akan dilakukan khusus untuk fluida pada daerah *wall*, *bump* dan ekspansi pada *sudden enlargment* dengan menggunakan program *Computasional Fluid Dinamic* (CFD). Program CFD yang menyediakan fleksibilitas mesh (*grid*) yang lengkap dan tidak terukur serta menggunakan volume hingga yang menyelesaikan kasus aliran fluida dimana terdapat fenomena-fenomena yang akan diamati. Diharapkan simulasi pada tugas akhir ini dapat digunakan untuk memahami pengaruh dan karakteristik *bump* pada sisi *upstream*

1.2 Perumusan Masalah

Perbedaan luas penampang pada sisi inlet dan outlet *sudden enlargement* mengakibatkan terjadinya perbedaan tekanan dan kecepatan aliran. Perubahan penampang secara tiba-tiba pada sisi *downstream* mengakibatkan terjadinya pola aliran yang membentuk sirkulasi dan *vortex*. Upaya untuk mereduksi *pressure drop* pada bentuk *sudden enlargement* dilakukan dengan menambahkan pengganggu berbentuk cincin yang melingkar pada sisi *upstream* berupa cincin kubus. Bodi pengganggu (*bump*) ditambahkan pada sisi *upstream* berupa cincin *bump* lingkaran dengan variasi jarak $S = 0,1d_1, 0,2d_1, 0,3d_1$ dan $0,4d_1$ terhadap *step*. Perbandingan jarak tersebut dapat menimbulkan turbulensi aliran pada *step downstream* sehingga bisa melawan gaya yang diakibatkan *adverse pressure gradient* sehingga dapat mempengaruhi jarak *reattachment* pada aliran di bagian *downstream*. Dengan adanya fenomena tersebut dapat mengurangi *losses* yang terjadi pada saluran *sudden enlargment*.

1.3 Batasan Masalah

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

- a. Fluida yang mengalir pada pipa adalah air udara yang bersifat *incompressible*, *viscous* dan *steady*.
- b. Pada posisi inlet pipa mempunyai profil kecepatan yang sama (*uniform*).
- c. Penelitian dilakukan pada kondisi tidak terjadi perpindahan panas antara fluida dengan sistem
- d. Nilai kekasaran pada permukaan pipa (*roughness*) tidak ada atau pipa baru dengan permukaan halus.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi dengan memvariasikan jarak *bump* pada *sudden enlargement*. Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Untuk mensimulasikan dan menganalisa aliran fluida melalui saluran *sudden enlargement* dengan penambahan bodi pengganggu berupa cincin pada sisi *upstream* saluran pipa.
- b. Mengetahui profil kecepatan pada saat sebelum step, downstream dan sesudah *step* (untuk melihat fenomena *secondary flow* yang terjadi)
- c. Mengetahui intensitas turbulensi pada saluran *sudden enlargement*.

Menganalisa pengaruh penambahan *bump* pada sisi *downstream* pipa *circular*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain :

- a. Mengetahui karakteristik aliran pada *sudden enlargement* dengan penambahan bodi pengganggu pada pipa berupa cincin.
- b. Memperpendek jarak *reattachment* pada bagian *downstream* pipa
- c. Melengkapi penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid-like pattern across the entire page.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

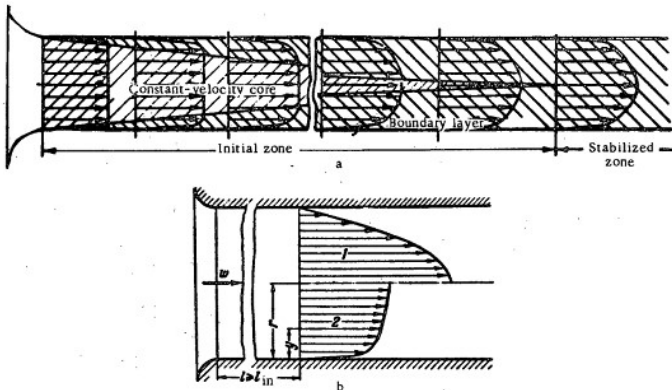
2.1.1 Bilangan Reynolds (Re)

Bilangan Reynolds (Re) adalah parameter non-dimensi yang menunjukkan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya gesek yang terjadi. Bilangan Reynolds merupakan parameter yang digunakan untuk menentukan tipe aliran yang terjadi termasuk kedalam aliran laminar ($Re < 2000$) atau aliran turbulen ($Re > 3000$). Secara umum untuk aliran di dalam pipa bilangan Reynolds dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.1)$$

Dimana :

- V = kecepatan fluida (m/s)
- D = diameter pipa (m)
- ν = koefisien gesek kinematis (m^2/s)



Gambar 2.1 Distribusi Kecepatan pada penampang pipa (Idelchick, 1960)

a = Deformasi aliran di zona awal, b = profil kecepatan di zona stabil, 1 = Aliran laminar, 2 = Aliran turbulen.

Apabila aliran berada di dalam pipa, maka bilangan *Nusselt* identik dengan bilangan *Reynolds* dimana persamaan (2.2) menjadi fungsi dari diameter (D). Selain perumusan di atas, bilangan *Nusselt* juga merupakan fungsi dari bilangan *Reynolds* dan bilangan *Prandtl*, seperti dijabarkan dalam persamaan di bawah :

$$Nu = f(Re, Pr) \dots \dots \dots (2.2)$$

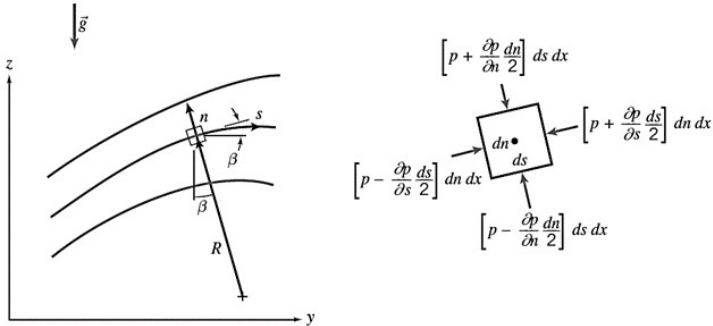
Perumusan *Nusselt* sebagai fungsi dari kedua parameter tersebut, tergantung pada kondisi aliran. Aliran tergolong aliran eksternal (di luar / tanpa dibatasi pembatas), atau internal (di dalam pembatas). Tipe aliran tergolong aliran laminar atau turbulen.

2.1.2 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*.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \dots \dots \dots (2.3)$$

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 2.2 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox, 2010)

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

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \dots\dots\dots (2.4)$$

persamaan (2.4) 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,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \dots\dots\dots (2.5)$$

persamaan (2.5) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan ke arah luar dari lengkung *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.

2.1.3 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,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \dots \dots \dots (2.6)$$

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.

2.1.4 Aliran didalam *Backward Facing Step*

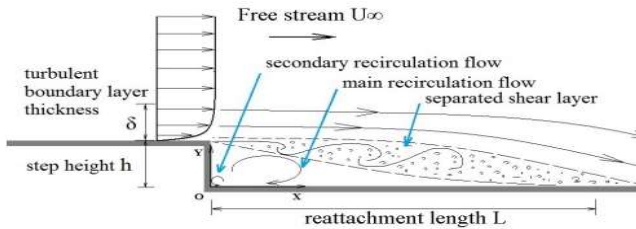
Perubahan luas penampang merupakan bagian dari sistem saluran perpipaan. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya *losses* pada saluran berupa separasi dan juga *secondary flow* yang akan berpengaruh terhadap aliran utama, tekanan dan debit air yang mengalir pada saluran. Aliran turbulen yang melalui *Backward-Facing Step* akan mengalami lokal separasi.

Terjadinya separasi ini pada dasarnya lebih didominasi oleh adanya efek pembesaran penampang aliran secara mendadak,

dari pada efek friksi yang ada pada aliran. Pembesaran penampang aliran ini akan membuat momentum aliran fluida menjadi lemah dan menimbulkan adanya *adverse pressure gradient* ($\partial/\partial x p$) atau sering disebut *back pressure*. Saat membesarnya penampang aliran, kecepatan fluida (*jet*) akan menurun sehingga tekanan dinamis fluida juga ikut menurun, sementara fluida memasuki daerah bertekanan tinggi (*high pressure region*), dimana *adverse pressure gradient* mulai terjadi. Kondisi inilah yang menyebabkan momentum fluida tidak lagi mampu melawan friksi dan tekanan balik (*back pressure*) yang berlawanan dengan arah aliran fluida inlet, sehingga aliran fluida akan terseparasi. Setelah aliran terseparasi, maka akan terjadi aliran balik (*back flow*) yang kemudian membentuk aliran sekunder (*vortex*) pada daerah di sekitar dinding yang berekspansi tersebut. Aliran fluida dapat pulih kembali, tetapi butuh panjang relaksasi (*reattachment length*) dan titik awal pulihnya aliran fluida ini disebut *reattachment point*.

2.1.4.1 Mekanisme Terjadinya Separasi

Terjadinya separasi pada dasarnya lebih didominasi oleh adanya efek pembesaran penampang aliran secara mendadak, dari pada efek friksi yang ada pada aliran. Pembesaran penampang aliran ini akan membuat momentum aliran fluida menjadi lebih lemah dan menimbulkan adanya *adverse pressure gradient* atau sering disebut *back pressure*. Saat membesarnya penampang aliran, kecepatan aliran fluida (*jet*) akan menurun sehingga tekanan dinamis fluida juga ikut menurun, sementara fluida memasuki daerah bertekanan tinggi (*high pressure region*), dimana *adverse pressure gradient* mulai terjadi. Kondisi inilah yang menyebabkan momentum fluida tidak lagi mampu mengikuti permukaan yang melebar, sehingga aliran akan terseparasi. Seperti ditampilkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.3 Separasi pada step *downstream* (Jongebloed, 2008)

2.1.4.2 Aliran Sekunder

Setelah aliran terseparasi, maka akan terjadi aliran balik (*back flow*) yang kemudian membentuk aliran sekunder (*vortex*) pada daerah disekitar dinding yang berekspansi. Aliran sekunder ini akan terus mengecil sampai titik *reattachment* tercapai.

2.1.4.3 Fenomena Boundary Layer

Adanya perbesaran penampang aliran bagian bawah yang kemudian menimbulkan aliran sekunder, akan merusak *boundary layer* dinding inlet bagian bawah. *Boundary layer* tidak akan terbentuk pada daerah yang mengalami aliran sekunder ini, yaitu daerah mulai terjadinya pembesaran penampang dimana aliran sekunder mulai terjadi, sampai pada titik pulihnya aliran fluida dimana aliran tepat tidak mengalami aliran sekunder lagi. *Boundary layer* baru akan terbentuk kembali mulai dari tercapainya titik *reattachment length*, kemudian akan terus mengembang sampai ke *outflow*. Sedangkan *boundary layer* pada dinding bagian atas sudah terbentuk mulai dari *inlet* dan terus mengembang sampai ke *outlet*. Jika diperhatikan, *boundary layer* bagian bawah lebih tebal dari pada *boundary layer* bagian atas. Hal ini dikarenakan adanya perbesaran penampang pada aliran disekitar dinding bagian bawah yang menimbulkan *vortex* menyebabkan terganggunya aliran (*disturbance*) sehingga aliran turbulen yang sudah berfluktuasi akan semakin berfluktuasi lagi.

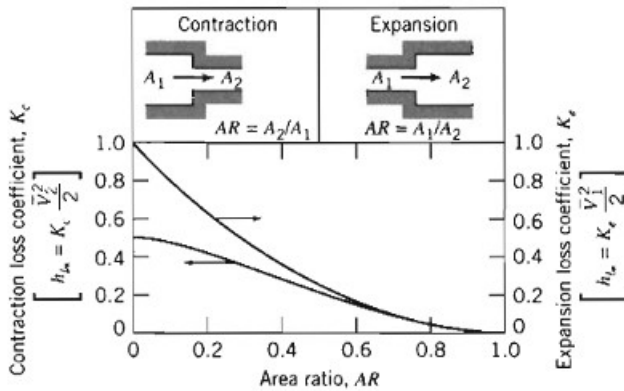
Hal inilah yang menyebabkan boundary layer berkembang menjadi lebih tinggi. Berbeda kondisinya dengan dinding bagian atas, dimana aliran jet yang keluar didaerah dekat dinding atas tidak mengalami gangguan berupa *vortex*, dinding bagian atas berfungsi sebagai dinding penuntun (*guidance wall*) sehingga aliran dapat dituntun dengan cukup teratur mengikuti kontur dinding tersebut.

2.1.5 Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)

Pressure drop didefinisikan sebagai perbedaan tekanan diantara dua titik atau dua poin yang dianalisa pada jalan aliran fluida. *Pressure drop* bisa diakibatkan oleh gaya gesek, tahanan utama terhadap aliran fluida dan tingkah laku fluida pada saat mengalir melewati serangkaian pipa. *Pressure drop* yang terjadi pada fluida yang melewati serangkaian pipa yang dianalisa berdasarkan V_{max} dan nilai *Reynold number* dapat ditunjukkan oleh persamaan sebagai berikut :

$$Cp = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2}\rho V_1^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Koefisien kerugian akibat aksesoris pipa (*fittings*) untuk ekspansi mendadak dan kontraksi dalam pipa melingkar diberikan pada gambar 2.4. Perhatikan bahwa kedua koefisien didasarkan pada kerugian $V^2/2$. Pada pipa dengan pembesaran penampang secara tiba-tiba berdasarkan persamaan $V_1^2/2$. Sedakan untuk pipa dengan pengecilan penampang secara tiba-tiba berdasarkan persamaan $V_2^2/2$. Kerugian yang disebabkan oleh perubahan area dapat dikurangi dengan memasang cincin *bump* (pengganggu) pada sisi *upstream* pipa.



Gambar 2.4 Kerugian koefisien untuk aliran melalui pipa dengan perubahan area secara mendadak (Fox, 2010)

Salah satu cara yang dilakukan untuk merencanakan aliran turbulen pada *backward-facing step* adalah menggunakan *passive control*. *Passive control* ini bertujuan untuk memperbaiki batas *shear layer* dari zona separasi dibelakang *height step*, sehingga dapat mengurangi jarak *reattachment point*. Gambar 2.3 menunjukkan karakteristik struktur aliran daerah *downstream* dari *height step* yang terdiri dari lapisan batas turbulen, separasi dari *shear layer*, area resirkulasi utama dan sekunder, serta jarak dari *reattachment point*-nya. Neumann dan Wengle (2003), menggunakan *passive control* berupa *bump* berbentuk persegi panjang dengan variasi *Direct Numerical Simulations (DNS)* dan *Large-Eddy Simulations (LES)*. Scharnowski et al. (2015), menggunakan *passive control* berupa *vortex generators* berbentuk *circular lobes* dengan skala ukuran yang sama. Kecepatan aliran yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah *transonic* yaitu pada *Mach number* 0,8 dan bilangan *Reynolds* $1,8 \times 10^5$ yang banyak diaplikasikan di bidang aeronautika. Ma et al. (2014), melakukan studi eksperimen dengan menggunakan *vortex generators* yang berbentuk *wedge* dan dipasang melintang di daerah *upstream* dari *height step*.

2.1.6 Model Turbulensi

Sebuah *turbulence model* adalah prosedur komputasi untuk mendekati sistem dari persamaan *mean flow*. Untuk sebagian besar aplikasi di dunia keteknikan, tidaklah perlu untuk melihat hasil detail 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.

2.1.6.1 Spalart-alararas

Spalart-Alamaras 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*.

2.1.6.2 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-ε*. 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 gradien tekanan yang besar.

2.1.6.3 Model $k-\omega$

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Dalam model $k-\omega$ 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-ω* yang dikembangkan untuk memadukan formulasi model *standard k-ω* yang stabil dan akurat pada daerah didekatat dinding dengan model $k-\omega$ yang memiliki keunggulan dalam *aliran free stream*.

2.1.6.4 Reynolds Strees Number (RSM)

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

2.1.7 Kondisi Batas

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

2.1.7.1 *Flow Inlet dan Exit Boundaries*

- ***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.

- ***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 melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.

2.1.7.2 *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.

2.1.7.3 *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*. Harus diindikasikan bahwa material yang manakah yang terkandung zona *solid*, sehingga properti material yang sesuaiilah yang akan digunakan. Pilihan input memungkinkan untuk mengatur tingkat laju kalor bangkitan volumetris (*heat source*) atau nilai pasti dari suhu. Seiaian 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.

2.1.7.4 *Internal Face Boundaries*

- **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.

2.2 Penelitian terdahulu

2.2.1 Karakteristik Aliran pada *Backward Facing Step*

Jongebloed (2008) melakukan studi numerik menggunakan fluent tentang separasi dan *reattachment point* pada aliran *backward facing step* dengan memvariasikan Reynolds number pada batas turbulen ($Re > 6600$).

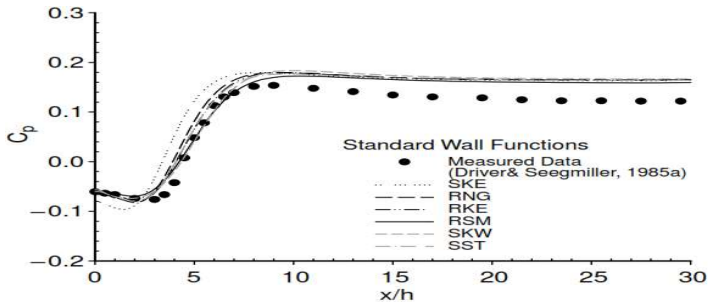
Tabel 2.1 Hasil studi *reattachment point* untuk aliran turbulen (Jongebloed, 2008)

Re	x_1/S
7000	6.92
7476	6.61
7830	6.54
8000	6.80
11400	7.01
17799	8.00
24480	8.60
average	7.21

Hasil yang dilakukan **Jongebloed** yang sesuai dengan penelitian **armaly dkk** adalah pada Re 17799 dengan $x_1/S = 8$.

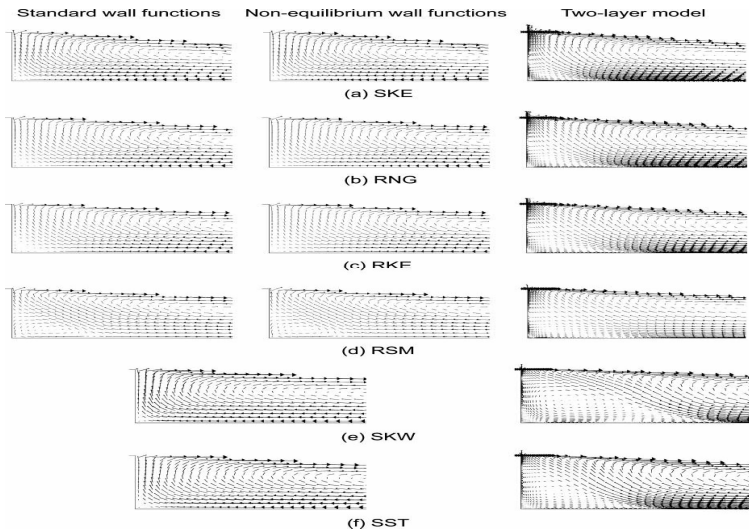
Kim dkk. (2005) telah melakukan penelitian mengenai perbandingan model turbulensi didekat dinding dengan *reynold number* 38000 pada *backward facing step*. Pada studi ini, *backward facing step* yang digunakan sebagai benda uji memiliki tinggi pada sisi *upstream* adalah 8h ($h = 0.0127$ m). *Standart wall function, non equilibrium wall functions* dan *two layer* dimodelkan dengan perbedaan 6 model turbulen (SKE, RNG, RKE, RSM, SKW, SST) pada Re yang tinggi (38000).

Gambar 2.5 memperlihatkan tren aliran perbandingan C_p terhadap x/h dibawah dapat dilihat bahwa *coefficient pressure* dimulai sekitar -0.07 pada $x/h=0$ kemudian mulai turun sampai $x/h = 3$. Setelah itu naik dengan tajam dan kemudian cenderung konstan kembali. Kenaikan tren grafik C_p terhadap x/h menandakan adanya pengaruh perbesaran penampang sehingga aliran menjadi terseparasi.



Gambar 2.5 Grafik C_p terhadap x/h untuk perbedaan model turbulen dan *near-wall treatment* $\alpha=0^\circ$, $Re=38000$

(Kim dkk, 2005)



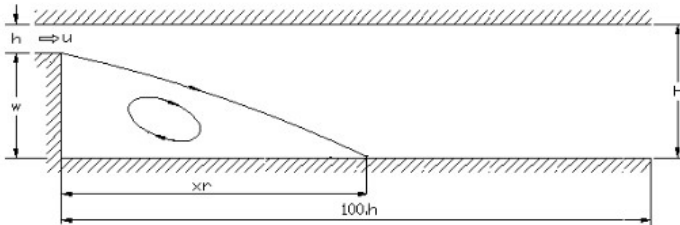
Gambar 2.6 Perbandingan distribusi kecepatan pada sudut aliran *backward facing step* yang diprediksi dengan model turbulen yang berbeda $\alpha=0^\circ$, $Re= 38000$ (Kim dkk, 2005)

Kesimpulan dari penelitian **Kim dkk (2005)** menyatakan bahwa untuk kasus ini dengan memakai model turbulen RNG dan RKE *non equilibrium wall function* menampilkan hasil yang baik untuk memprediksi panjang *reattachment* dan *coefficient pressure*.

2.2.2 Simulasi Aliran pada *Backward Facing Step*

Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan discretization scheme SUPG, dengan model turbulensi ke standard, RNG, NKE, GIR dan SZL yang menggunakan Wall Function untuk menyelesaikan aliran di dekat dinding. Geometri aliran yang digunakan sama seperti geometri simulasi yang dilakukan oleh Peng et al.,1997 (Gambar 2.7). Ekspansi rasio antara outlet dan inlet, H/h adalah 6, tinggi inlet (h) = 0.25 m, panjang inlet (p) = $0.5.h$, panjang geometri yang mengalami pembesaran penampang (L) = $100.h$, dan selisih antara tinggi outlet dan inlet.

Properties aliran yang digunakan adalah : Reynold Number (Re) = 5050 berdasarkan ketinggian inlet, dimana : $u = 10.1$ m/s, $\rho = 1$ kg/m.

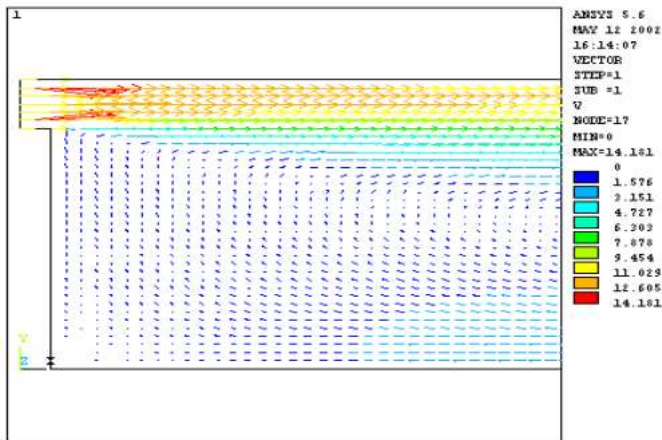


Gambar 2.7 Aliran pada *Backward-Facing Step* (Ikhwan, 2012)

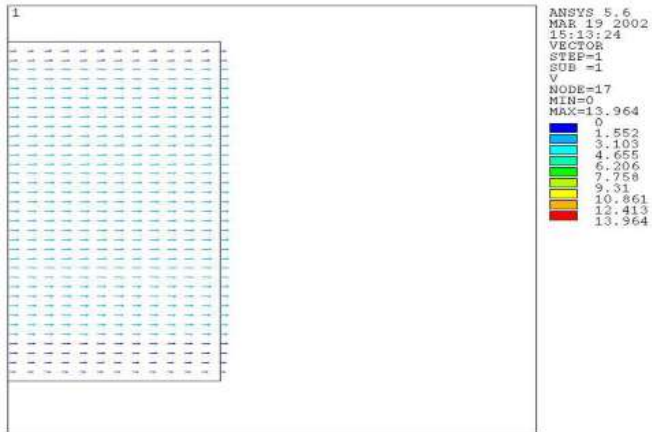
Gambar 2.7 menunjukkan vektor kecepatan pada kondisi awal terjadinya pembesaran penampang. Adanya pembesaran penampang aliran bagian bawah yang kemudian menimbulkan aliran sekunder, akan merusak boundary layer dinding inlet bagian bawah. Boundary layer tidak akan terbentuk pada daerah yang mengalami aliran sekunder ini, yaitu daerah mulai terjadinya pembesaran penampang dimana aliran sekunder mulai terjadi, sampai pada titik pulihnya aliran fluida dimana aliran tepat tidak mengalami aliran sekunder lagi. Boundary layer baru akan terbentuk kembali mulai dari tercapainya titik reattachment length, dan akan terus mengembang sampai ke outflow. Sedangkan, boundary layer dinding bagian atas sudah terbentuk mulai dari inlet dan terus mengembang sampai ke outlet.

Bila dibandingkan, boundary layer dinding bagian atas yang mulai berkembang dari inlet terhadap boundary layer dinding bagian bawah yang mulai berkembang dari titik reattachment length, ternyata bukan boundary layer dinding bagian atas yang lebih tebal dari boundary layer dinding bagian bawah. Hal ini dikarenakan adanya pembesaran penampang pada aliran di sekitar dinding bagian bawah yang menimbulkan vortex menyebabkan terganggunya aliran,

sehingga aliran turbulen yang sudah berfluktuasi (u' , v' , dan w') akan semakin berfluktuasi lagi. Hal inilah yang menyebabkan boundary layer berkembang menjadi lebih tinggi. Berbeda kondisinya dengan dinding bagian atas, dimana aliran jet yang keluar di daerah dekat dinding atas tidak mengalami gangguan berupa vortex, dan ditambah adanya dinding bagian atas yang berfungsi sebagai dinding penuntun (guidance wall) sehingga aliran dapat dituntun dengan cukup teratur mengikuti kontur dinding tersebut. Karena tidak ada gangguan yang cukup berarti inilah, maka boundary layer bagian atas yang terbentuk akan lebih tipis dibanding boundary layer dinding bagian bawah, sekalipun boundary layer dinding bagian bawah ini baru terbentuk saat tercapainya titik reattachment length. Tebal boundary layer pada dinding bagian atas dan bawah diwakili oleh gradient kecepatan pada ujung aliran (outlet) dari Backward-Facing Step (Gambar 2.9).



Gambar 2.8 Vektor kecepatan disekitar pembesaran penampang (Ikhwan, 2012)



Gambar 2.9 Vektor kecepatan pada outlet Backward-Facing Step (Ikhwan, 2012)

Tabel 2.2 Perbandingan prediksi reattachment length

(Ikhwan, 2012)

No	Hasil Eksperimen / Simulasi	Reattachment Length	% Error
1	Eksperimen (Restivo, 1979)	6.12 W	---
2	k- ω modifikasi Model (Peng et al., 1997)	6.4 W	4.6
3	LRN k- ϵ Model / (Sharma-Lauder, 1974)	6.2 W	1.3
4 *	k- ϵ Standard Model (Lauder – Spalding, 1972)	5.83 W	4.7
5 *	RNG Model	5.74 W	6.2
6 *	SZL Model	6.8 W	11.1
7 *	NKE Model	5.35 W	12.6
8 *	GIR Model	6.96 W	13.7
9 *	k- ϵ Model (modifikasi closure coefficient oleh HaMinh – Chassaing, 1977), untuk aliran melalui pipa yang mengandung adverse pressure gradient.	5.82 W	4.9

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid-like pattern across the entire page.

BAB III METODE PENELITIAN

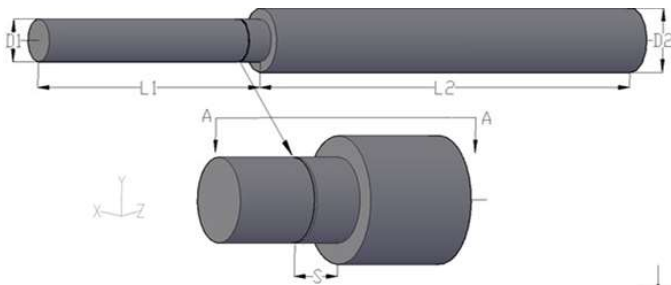
BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian membahas 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 pembesaran penampang secara tiba-tiba (*sudden enlargment*).

3.1 Geometri *Sudden Enlargment*

Pada penelitian ini menggunakan pipa *sudden enlargment* dengan memvariasikan jarak bodi pengganggu berupa cincin (*bump*). Seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.1. Spesifikasi benda uji dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Tinggi step (h) : $1h$
- Panjang sisi *upstream* (L_1) : $10h$
- Panjang sisi down stream (L_2) : $25h$
- Diameter inlet (D_1) : $8h$
- Diameter outlet (D_2) : $10h$
- panjang *cincin bump* (t) : $0,02 d_1$
- Variasi jarak cincin *bump* (S) : $0.1 d_1$, $0.2 d_1$,
 $0.3 d_1$, $0.4 d_1$



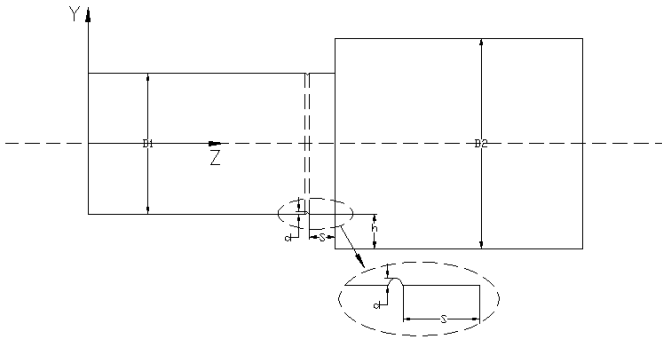
Gambar 3.1. Geometri pipa *sudden enlargment*

3.2 Metode Numerik

Penelitian ini menggunakan program CFD komersial untuk melakukan pendekatan numerik dan membuat model awal serta melakukan meshing pada model. Secara umum, urutan kerja pada penelitian ini dimulai.

3.3.1 Tahap *pre-processing*

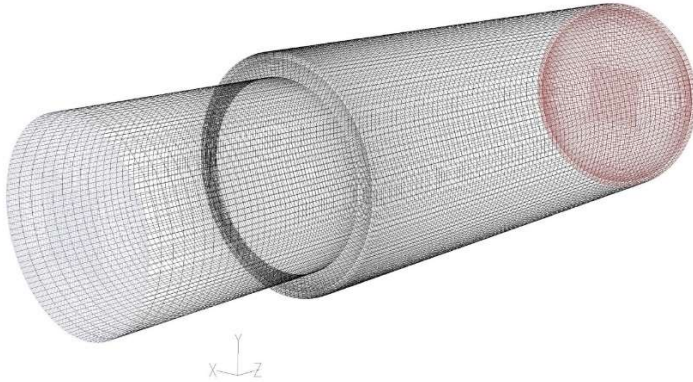
- a) Model benda uji (*sudden enlargement*) dibuat dengan mengacu pada geometri sesuai ukuran yang telah ditentukan. Penelitian ini memvariasikan jarak bodi pengganggu (S) : $0,01D_1$, $0,02D_1$, $0,03D_1$ dan $0,4 D_1$.



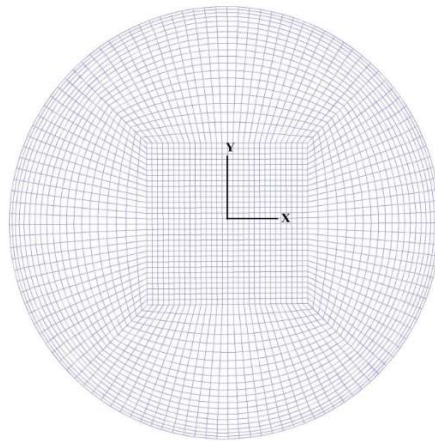
Gambar 3.2 Variasi jarak bodi pengganggu detail A

Gambar 3. 2 Pergeseran titik *eutectoid* pada diagram Fe-Fe₃C (garis kuning)

- a) Membuat meshing dengan distribusi mesh yang lebih rapat pada bagian dinding pipa down stream dan dinding pipa up stream.

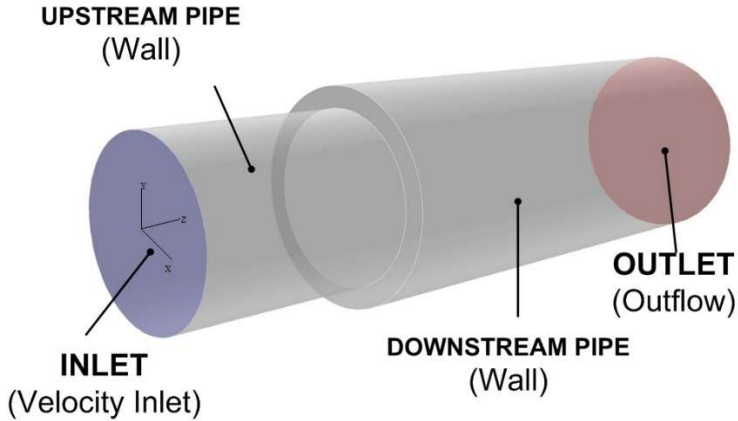


Gambar 3.3 *Meshing* benda uji tampak isometric



Gambar 3.4 *Meshing* benda uji tampak X+

- b) Mendefinisikan kondisi batas dengan maksud untuk menentukan batasan serta parameter-parameter yang digunakan pada penelitian ini. Kondisi *inlet* yaitu *velocity inlet*. Kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Sedangkan kondisi dinding yaitu berupa *wall*.



Gambar 3.5 Domain pipa *sudden enlargement*

3.3.2 Tahap Post Processing

Untuk penyelesaian metoda numerik digunakan bantuan software *Computasional Fluid Dinamic* (CFD). Langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan pemodelan adalah sebagai berikut:

a. Grid

Pada langkah ini, yang dilakukan adalah mengimport grid yang telah dibuat pada software *Computasional Fluid Dinamic* (CFD).. Pada proses pembuatan grid ini perlu diberikan grid independensi, yaitu proses penambahan meshing sampai hasil yang didapatkan sudah tidak berubah lagi walaupun jumlah *cell*-nya ditambah.

b. Models

Langkah ini merupakan pemodelan aliran (estimasi karakteristik aliran), penentuan model turbulen yang digunakan, penentuan besarnya konstanta yang digunakan serta menentukan *solver* yang digunakan. Pemodelan yang digunakan adalah $k-\varepsilon$ *Realizable*. Pemodelan ini dipilih karena bisa memberikan performa yang baik untuk aliran yang melibatkan separasi, resirkulasi, aliran pada jet atau *nozzle*.

c. Material

Dalam tahap ini dilakukan penentuan jenis material yang akan digunakan serta data-data properties dari material tersebut. Pada simulasi ini dipilih udara sebagai fluida kerja dengan densitas (ρ) = 1.225 kg/m³ dan viskositas kinematik (μ) = 1.78 x 10⁻⁵ m²/s.

d. Operating Condition

Operating condition menggunakan kondisi STP (*Standard Temperatur and Pressure*)

e. Boundary Condition

Boundary condition merupakan penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun kondisi batas turbulen pada *inlet* dan *outlet*. *Inlet* merupakan sisi aliran masuk, yang didefinisikan sebagai *velocity inlet (uniform velocity)*. Dinding saluran dan benda uji didefinisikan sebagai *wall* dan simetri. *Outlet* didefinisikan sebagai *outflow*.

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. Monitoring Residual

Monitoring Residual adalah tahap penyelesaian masalah, berupa proses iterasi hingga mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria konvergensi

untuk nilai continuity ditetapkan sebesar 10^{-5} , artinya proses iterasi dinyatakan konvergen setelah residualnya mencapai harga dibawah 10^{-5} .

i. Iterasi

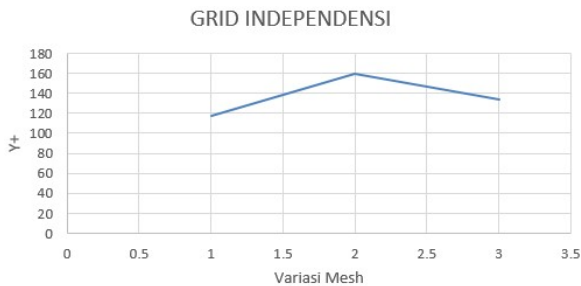
Iterasi adalah langkah untuk melakukan perhitungan pada fluent 6.3.26, diperlukan proses iterasi sampai menghasilkan solusi yang konvergen.

j. *Grid independency*

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

Tabel 3.1 Hasil *grid independensi* benda uji tanpa *bump*

NO	MESH	Y+	TOTAL FACE	VELOCITY (FACET AVERAGE)
1	MESHING 1	118.103	1875900	1.61948
2	MESHING 2	159.8271	2466300	1.93522
3	MESHING 3	134.0826	2701500	1.78223



Gambar 3.6 Grafik *grid independency*

Berdasarkan gambar 3.6 mesh 1 merupakan meshing yang paling renggang dengan jumlah *surface* 1875900, sedangkan mesh 3 merupakan meshing yang paling rapat dengan jumlah *surface* 2701500. Grafik diatas menjelaskan perbandingan antara nilai Y^+ dengan jumlah *cell* pada benda uji. Nilai Y^+ bagian *downstream*. Grafik memperlihatkan trend yang naik turun, namun berbeda pada mesh 3 yang memperlihatkan penurunan yang sangat curam dan puncak grafik pada mesh 2. Ini membuktikan bahwa semakin rapat meshing maka akan memberikan nilai Y^+ semakin Besar. Maka Oleh karena itu dipilihlah mesh yang rapat dengan nilai Y^+ masih berada diantara nilai 50-250 yang sesuai dengan nilai ambang batas.

k. Post Processing

Post processing merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh. Hasilnya akan ditampilkan berupa data kuantitatif dan data kualitatif.

Data Kuantitatif

- ✓ Grafik profil kecepatan
- ✓ Grafik intensitas turbulensi
- ✓ Grafik C_p fungsi (z/h)
- ✓ Grafik C_f fungsi (z/h)

Data Kualitatif

- ✓ Kontur
 - Kecepatan
 - Intensitas turbulensi
 - tekanan
- ✓ Vektor kecepatan
- ✓ Pathline

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, and the letters 'ITS' in white to the right of the shield. The logos are arranged in a grid pattern across the entire page.

BAB IV DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN

BAB IV

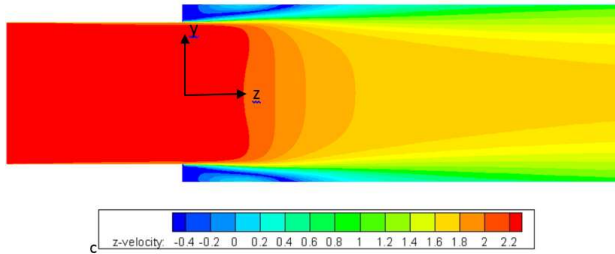
DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN

Bab ini akan menjelaskan mengenai analisa dan pembahasan hasil simulasi numerik pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa menggunakan *bump* dan dengan penambahan *bump* berupa *circular bump* pada sisi *upstream* pipa. Dari hasil yang didapatkan, nantinya akan dibandingkan bagaimana pengaruh yang ditimbulkan dari penambahan *circular bump*. *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 1.1236×10^4 . Data yang diperoleh dari hasil simulasi berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif dipresentasikan dalam bentuk grafik, yaitu profil kecepatan, distribusi *skin friction* (C_f), distribusi *pressure coefficient* (C_p). Sedangkan data kualitatif dipresentasikan dalam bentuk visualisasi aliran. Visualisasi ini bertujuan untuk memperjelas hasil yang didapatkan dari data kuantitatif, yaitu berupa kontur kecepatan, vektor kecepatan, kontur intensitas turbulensi, dan kontur tekanan statis.

4.1 Analisa aliran pada pipa *circular* pembesaran penampang tanpa *circular bump*

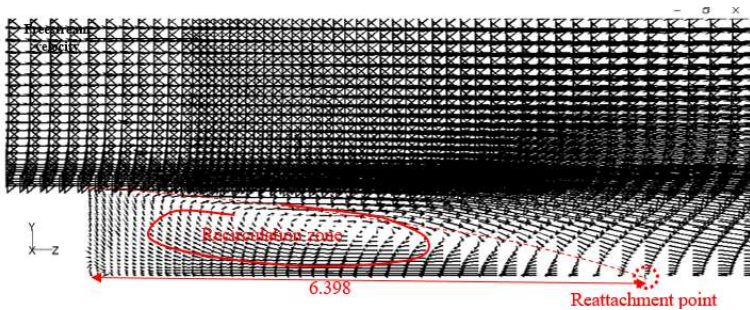
Sebelum membahas analisa aliran pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) dengan penambahan *circular bump* terlebih dahulu akan dibahas fenomena yang terjadi pada aliran pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump*. Fenomena aliran pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump* ini akan ditampilkan dengan beberapa data yang nantinya akan menjadi pembandingan pada benda uji pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) dengan penambahan *circular bump*. Data kualitatif akan ditampilkan berupa visualisasi aliran

yang terjadi pada aliran yang mengalir pada pemodelan pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*). Kemudian data kuantitatif yang akan ditampilkan berupa grafik profil kecepatan, distribusi *skin friction* (C_f), dan distribusi *pressure coefficient* (C_p).



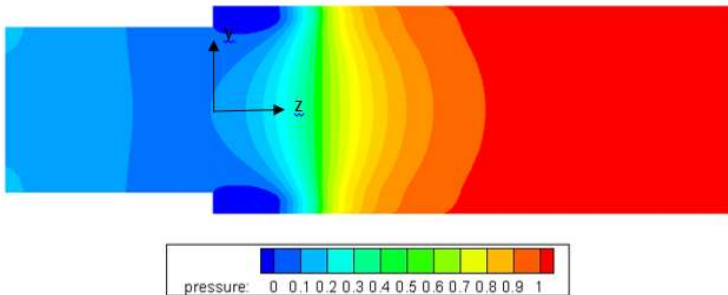
Gambar 4.1 Visualisasi kontur kecepatan pada pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump*

Gambar 4.1 merupakan tampilan kontur kecepatan dari pemodelan geometri pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump*. *Grade* warna merah menunjukkan kecepatan maksimum yang melintasi saluran *pipa* dan warna biru merupakan kecepatan minimum. Harga kecepatan maksimum yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 adalah sebesar 2.2 m/s dan kecepatan minimumnya adalah -0.4 m/s yang terdapat pada area didekat *downstream* bagian bawah. Area yang berwarna biru menginformasikan bahwa terjadinya separasi. Separasi ini merupakan kerugian energi. Aliran akan kembali pulih setelah terjadi transfer energi antara aliran yang berada pada daerah yang tidak terseparasi menuju daerah separasi. Pulihnya aliran ini ditandai dengan telah positifnya seluruh nilai profil kecepatan. Titik awal positifnya nilai profil kecepatan sering disebut sebagai titik *reattachment*. Jarak titik *reattachment* yang terjadi pada pemodelan geometri pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump* adalah pada 6.398. Jarak ini diukur mulai dari *step* hingga telah positifnya semua nilai profil kecepatan. Dapat dilihat gambar yang terdapat dibawah ini.



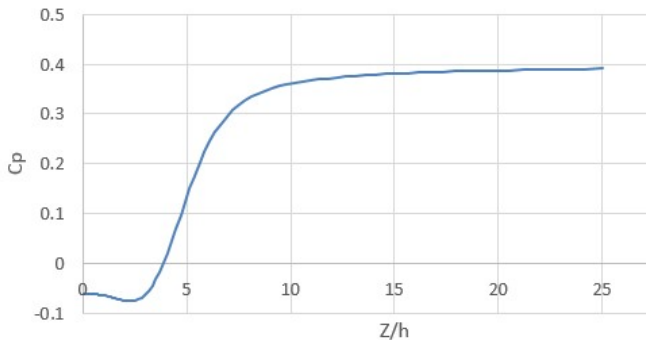
Gambar 4.2 Titik *Reattachment*

Gambar 4.2 menunjukkan vektor kecepatan pada pemodelan pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump*. Tanda lingkaran merah memperlihatkan aliran mengalami *reattachment*. Titik *reattachment* merupakan awal *boundary layer* akan terbentuk kembali, ditandai dengan profil aliran tidak lagi bernilai negatif. Daerah yang berada dibawah garis merah putus-putus merupakan daerah resirkulasi aliran, ditandai dengan arah vektor kecepatan yang bernilai negatif. Hal ini menandakan adanya pusaran aliran dengan kecepatan rendah atau aliran berbalik arah.



Gambar 4.3 Visualisasi kontur tekanan statis

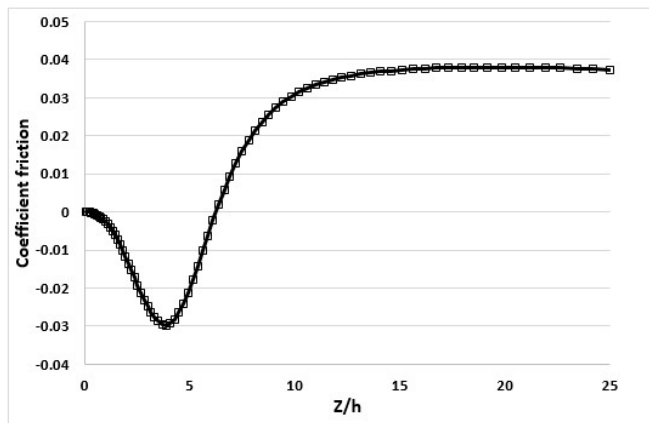
Gambar 4.3 merupakan kontur tekanan pada pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump*. Visualisasi kontur tekanan statis dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai C_p pada pemodelan geometri pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump* yang ditandai dengan *grade* warna yang terbentuk. Terlihat bahwa area setelah *step* mengalami penurunan tekanan yang ditandai dengan warna biru. Kemudian distribusi tekanan mengalami peningkatan searah sumbu Z yang ditandai dengan perubahan warna yang ditunjukkan dengan warna merah. Berikut ini merupakan grafik distribusi tekanan yang terjadi pada daerah *downstream*.



Gambar 4.4 Grafik *coefficient pressure* (C_p) pemodelan tanpa *bump*

Gambar 4.4 merupakan grafik *coefficient pressure* (C_p) pemodelan tanpa *bump* pada *lower wall* yang ditampilkan untuk memperjelas hasil visualisasi kontur tekanan pada bagian *downstream*. Perubahan luasan penampang mempengaruhi kecepatan dan tekanan yang terjadi pada penampang pipa. Kecepatan yang mengalami penurunan pada daerah *diverging area* menyebabkan *pressure drop*. Seperti pada grafik C_p yang berada diatas, C_p bernilai negatif pada titik $z/h = 0$ sampai $z/h = 3.7$ menandakan bahwa tekanan berada dibawah tekanan *inlet* yaitu dibawah 1.03 Pa. Nilai C_p minimum ini ditunjukkan dengan kontur

tekanan statik berwarna biru yang harganya sebesar -0.12 Pa. Nilai C_p nol menandakan nilai tekanan statis sama dengan tekanan *freestream* di *inlet*. Nilai C_p bernilai maksimum pada $z/h = 25$ dapat dilihat pada gambar 4.3 yang ditampilkan dengan warna merah. Adapun grafik mengalami penurunan dari $z/h = 0$ sampai $z/h = 25$, ini menandakan terjadinya percepatan aliran pada permukaan dinding bagian *downstream*. Besarnya *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan geometri pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa menggunakan *bump* adalah 1.15 Pa



Gambar 4.5 Grafik *coefficient friction* (C_f) pemodelan tanpa *bump*

Gambar 4.5 menunjukkan distribusi *skin friction* yang terjadi sepanjang *lower wall*. Distribusi *skin friction* yang terjadi sepanjang *lower wall* pada daerah *downstream*. Terlihat grafik mengalami penurunan kemudian mengalami kenaikan dan setelah itu konstan sampai outlet. Nilai C_f yang bernilai semua positif dimulai dari $z/h = 6.9$ sampai $z/h = 25$, pada z coordinate bernilai negatif pada posisi dari $z/h = 1$ sampai $z/h = 6.7$ menandakan aliran mengalami separasi. Adapun nilai $C_f = 0$ pada $z/h = 6.398$ menunjukkan titik *reattachment* aliran, karena daerah *lower wall*

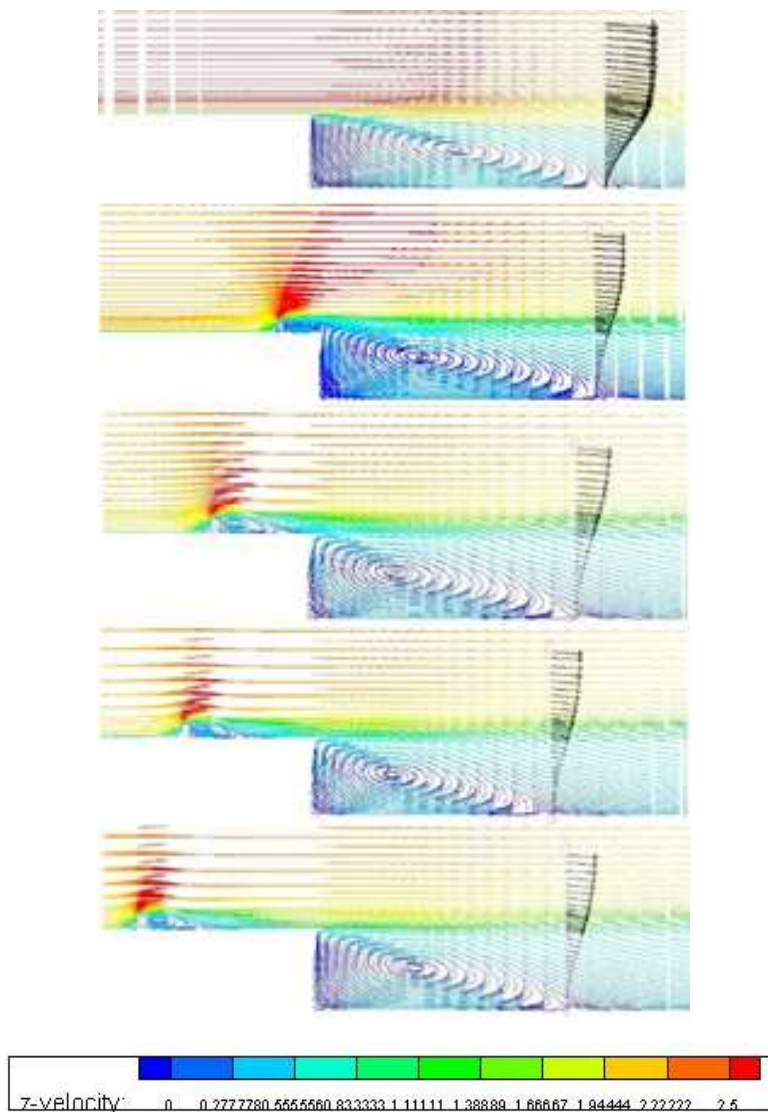
pada titik $x/h = 6.398$ memiliki kecepatan nol, ketika nilai C_f bernilai nol tidak terjadi tegangan geser pada dinding maka nilainya juga nol.

Dari beberapa data pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump* p yang didapatkan tadi dapat disimpulkan bahwa *diverging area* menyebabkan separasi aliran. Separasi aliran ini diakibatkan oleh aliran yang tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang terjadi pada daerah *diverging area*. Penambahan bodi pengganggu pada posisi *upstream* berupa *circular bump* diharapkan dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran, meningkatnya intensitas turbulensi berarti meningkatkan momentum aliran yang mengalir pada penampang pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) sehingga luas daerah separasi atau panjang titik *reattachment*nya dapat direduksi.

4.2 Analisa aliran pipa *circular* pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump* tanpa dan dengan penambahan *bump*

4.2.1 Panjang *Reattachment*

Dari hasil simulasi yang dilakukan dengan memvariasikan jarak *bump circular*, kemudian dibandingkan dengan pemodelan benda uji tanpa *bump* didapatkan hasil berupa panjang *reattachment* yang bisa dilihat pada gambar 4.6. Gambar 4.6 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan dari setiap aliran walaupun perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan. Dari penelitian ini yang akan dianalisa adalah panjangnya titik *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan benda uji sebagai akibat dari pengaruh variasi jarak pengganggu berupa *circular bump* pada bagian *upstream*.

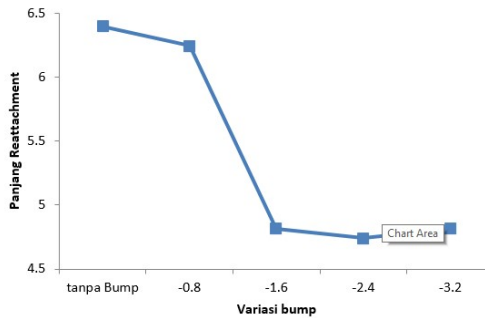


Gambar 4.6 *Resirkulasi* aliran tanpa menggunakan *bump* dan dengan variasi jarak *bump*

Jika dilihat sekilas, gambar 4.6 memperlihatkan panjang *reattachment* yang berbeda . Variasi jarak *bump* yang semakin kearah *inlet* juga mempengaruhi peningkatan kecepatan aliran pada puncak *circular bump*. Pada jarak variasi *bump* $s = -0.32h$ aliran memiliki kecepatan maksimum sebesar 2.2 m/s. Aliran terlebih dahulu terseparasi akibat melewati cincin *rectangular*. Jarak separasi yang sangat dekat dengan *step* memberikan pengaruh pada separasi yang terjadi selanjutnya pada bagian *downstream*. Hal ini dipengaruhi oleh belum stabilnya aliran akibat separasi yang terjadi pada saat melewati *circular bump* langsung melewati perbedaan penampang. Pada variasi jarak *bump* $s = -0.8$ bisa mengurangi panjang *reattachment* sebesar 5.5%. Simulasi jarak *bump* yang lain dengan $s = -1.6h, -2.4h,$ dan $-3.2h$ terletak agak jauh dari *step* sehingga memberi ruangan untuk terjadinya *reattachment* ketika melewati *circular bump*. Panjang *reattachment* dan panjang reduksi yang dihasilkan dari tiap-tiap variasi dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Perbandingan jarak *reattachment*

Variasi S/h	panjang <i>reattachment</i> (z/h)	Tanpa Bump	Reduksi (%)
-0.8	6.246	6.398	2.4
-1.6	4.815		24.7
-2.4	4.741		25.9
-3.2	4.816		24.7



Gambar 4.7 Grafik panjang *reattachment*

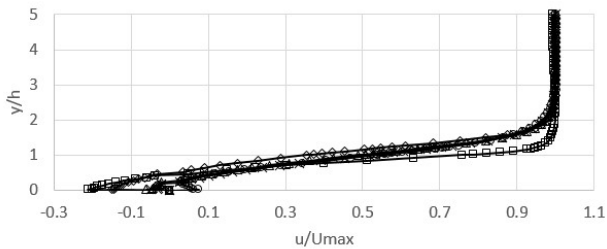
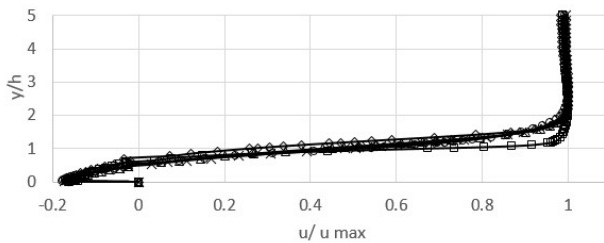
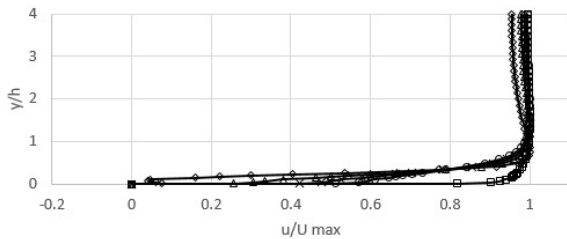
Hasil rekayasa pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan $Re\ 1.12 \times 10^4$ memperlihatkan bahwa pada jarak $bump\ s = -0.8h$ terjadi pengurangan panjang *reattachment* sebesar 2.4 %. Pada jarak $bump\ s = -1.6h, -2.4h,$ dan $-3.2h$ terjadi pengurangan panjang *reattachment* sebesar 24.7% , 25.9% , dan 24.7%.

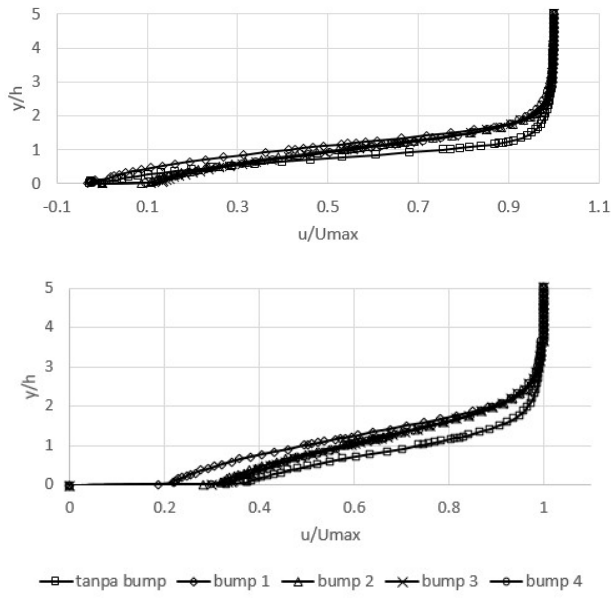
Hasil yang paling efektif untuk mengurangi panjang *reattachment* pada simulasi yang dilakukan adalah pada jarak $bump\ s = -2.4h$ dimana persentase pengurangan jarak *reattachment* sebesar 25.9%.

4. 2..2 Distribusi Profil Kecepatan

Penurunan nilai kecepatan seiring dengan perubahan jarak dalam suatu pemodelan pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) dikarenakan bentuk geometri yang mengembang secara tiba-tiba, sehingga mengakibatkan aliran balik (*backflow*). Penambahan *bump* bertujuan untuk mengganggu aliran yang melewati penampang pipa *circular* dengan pembesaran penampang, terganggunya aliran diharapkan dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran sehingga dapat meningkatkan momentum aliran. Momentum aliran yang nantinya akan mempengaruhi panjang *reattachment*. Profil kecepatan yang akan dibahas lebih kepada bagian *downstream* pemodelan. Berikut adalah gambar profil kecepatan pada *cross section* $z= 0h, 2h, 4h, 6h, 10h$. Gambar 4.8 masing-masing menunjukkan perubahan profil kecepatan dari tiap-tiap *cross section* yang telah ditentukan. Adanya profil kecepatan dapat memperlihatkan daerah yang terseparasi pada *cross section* yang telah ditentukan. Profil kecepatan disajikan dalam bentuk grafik tak berdimensi (z/h) dan fungsi kecepatan tak berdimensi (u/U_{max}) pada jarak yang tak berdimensi. u/U_{max} merupakan perbandingan antara setiap kecepatan lokal pada sebuah *cross section* z/h dengan nilai U_{max} pada *cross section* tersebut.

Aliran yang mengalir pada sisi *upstream* pemodelan geometri akan mengalami penebalan *boundary layer* sampai pada posisi *cross section* $z = 0h$ (disaat posisi *step*). Aliran pada pemodelan tanpa *bump* memperlihatkan profil kecepatan sudah berkembang namun pada pemodelan dengan menggunakan *bump* profil kecepatan memperlihatkan belum terjadi berkembang aliran. Hal ini disebabkan oleh penambahan pengganggu berupa *bump*, sehingga aliran mengalami ketidak stabilan dan menyebabkan profil kecepatan belum berkembang penuh.



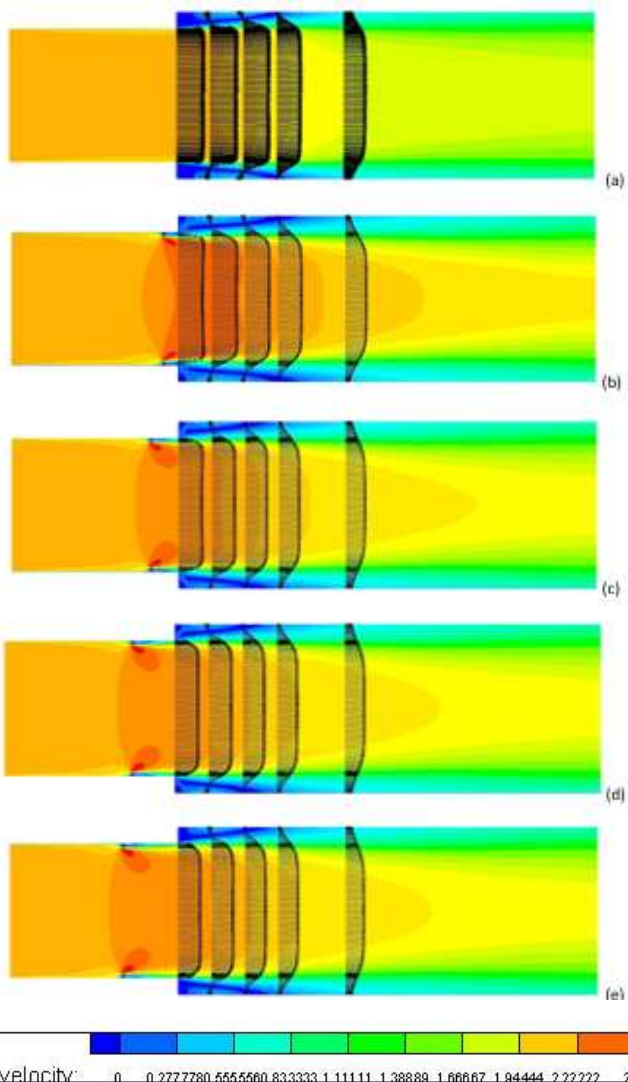


Gambar 4.8 Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section* z/h , pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa dan dengan penambahan *bump*

Distribusi profil kecepatan yang ditunjukkan pada *cross section* $z = 2h$ memperlihatkan grafik terjadinya separasi yang ditandai dengan nilai negatif. Separasi disebabkan oleh tidak mampunya momentum aliran melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi pada bentuk penampang yang mengalami pelebaran secara tiba-tiba. Aliran akan kembali pulih pada posisi tertentu setelah terjadi transfer energi antara aliran yang berada didaerah yang tidak terseparasi menuju aliran yang berada didaerah terseparasi. Distribusi profil kecepatan pada *cross section* $z = 4h$ memperlihatkan masih terdapat beberapa aliran yang masih memiliki nilai negatif, ini menandakan bahwa aliran masih mengalami separasi. Namun pada profil kecepatan pemodelan geometri jarak *bump* $s = -1.6h$, aliran sudah bernilai positif. Hal ini

menandakan pada pemodelan $s = -1.6h$ sudah melewati titik *reattachment*. *Cross section* $z = 6h$ dan $x = 10h$ memperlihatkan distribusi profil kecepatan semua aliran sudah bernilai positif. Aliran pada *cross section* $z = 6h$ dan $10h$ sudah mulai berkembang disebabkan telah hilangnya pengaruh separasi yang terjadi. Fenomena aliran yang terjadi didalam pemodelan pipa *circular* dengan pembesaran penampang secara detail juga dapat divisualisasikan dengan metode numerik berupa tampilan kontur kecepatan dan vektor kecepatan. Gambar distribusi kecepatan yang ditampilkan merupakan perpotongan dari bidang potong sumbu z serta data vektor kecepatan yang diambil pada bagian sepanjang *cross section*.

Fenomena aliran melewati pemodelan dapat dibedakan dengan membaca rentang warna yang tertera dibawah pemodelan benda uji. Posisi *inlet* bagian tengah berwarna kuning menandakan kecepatan *freestream*. Warna merah menandakan terjadi kenaikan kecepatan. Pada daerah *diverging*, terjadi penurunan kecepatan yang ditandai dengan warna biru berkisar rentang 0 sampai 12. Kontur kecepatan berwarna biru memberitahukan bahwa aliran mengalami separasi. Visualisasi kontur kecepatan ini menginformasikan tingkat kecepatan aliran yang mengalir pada penampang pipa *circular* dengan pembesaran penampang dan besar luasan separasi yang terjadi pada penampang.



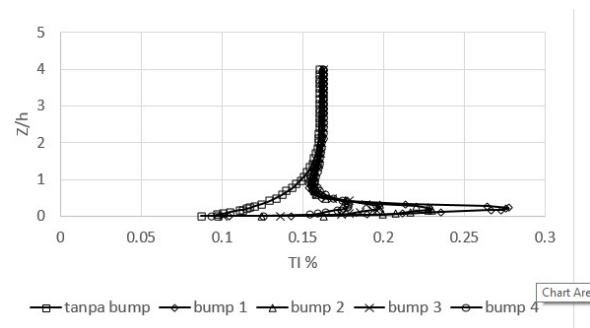
Gambar 4.9 Visualisasi kontur kecepatan model pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa bump (a) dan dengan penambahan pengganggu *bump* (b),(c),(d) & (e)

4.2.3 Distribusi Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi adalah bilangan tak berdimensi yang dipengaruhi oleh standar deviasi kecepatan aliran dan kecepatan rata-rata fluida. Intensitas turbulensi merupakan suatu skala yang disajikan dalam persentase tersusun atas tiga kecepatan arah aliran yaitu kecepatan aliran kearah aksial, radial, dan tangensial. Apabila nilai standar deviasi kecepatan aliran semakin besar maka intensitas turbulensi semakin besar, dan sebaliknya apabila kecepatan rata-rata fluida semakin besar, nilai intensitas turbulensi yang terjadi akan semakin kecil.

Penambahan *circular bump* pada sisi *upstream* dapat meningkatkan intensitas turbulensi. Meningkatnya intensitas turbulensi akan meningkatkan momentum aliran. Meningkatnya momentum aliran diharapkan dapat melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi pada penampang (*sudden enlargement*) tanpa *bump*.

Profil intensitas turbulensi merupakan profil yang terbentuk berlawanan dengan profil kecepatan. Gambar 4.10 menampilkan perbandingan intensitas turbulensi yang terjadi dari tiap-tiap variasi jarak *bump* pada *cross section* $z = 0h$ (pada bagian *step*).

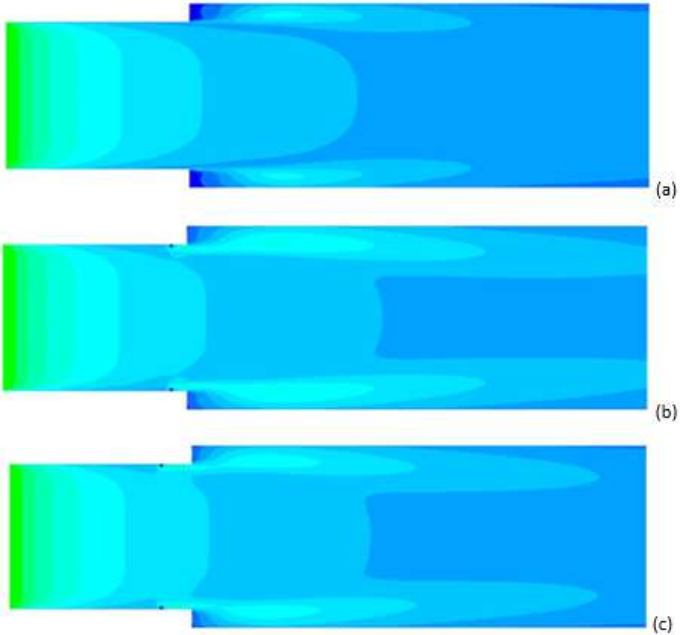


Gambar 4.10 Perbandingan grafik intensitas turbulensi pada *cross section* $y = 0h$

Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan grafik intensitas turbulensi yang menjelaskan bahwa intensitas turbulensi pada variasi jarak *bump* $s = -0.8h$ memiliki grafik yang lebih panjang. Hal ini dikarenakan letak *bump* $s = -0.8h$ memiliki jarak yang lebih dekat ke daerah *step* sehingga intensitas turbulensinya masih besar. Sebaliknya untuk variasi jarak *bump* $s = -3.2h$ memperlihatkan tren yang peling pendek dari pada pemodelan geometri yang lain. Hal ini dikarenakan letak jarak *bump* yang jauh dari titik pengambilan data yaitu bagian *step*. Pendeknya intensitas turbulensi pada variasi jarak $s = -3.2h$ dipengaruhi oleh jauhnya jarak antara pengambilan data dengan *step* dari pemodelan yang lain.

Visualisasi kontur intensitas turbulensi dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan. Intensitas turbulensi ditunjukkan dengan oleh *grade* warna yang terbentuk dari simulasi yang dilakukan. Gambar 4.11 menunjukkan visualisasi intensitas turbulensi yang terjadi dari tiap-tiap pemodelan pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*). Visualisasi kontur intensitas turbulensi dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) yang ditunjukkan dengan perbedaan *grade* warna. Penambahan pengganggu berupa *bump* akan menyebabkan intensitas turbulensi semakin meningkat. Seiring meningkatnya intensitas turbulensi maka semakin meningkat pula momentum aliran pada dinding pemodelan geometri. Harapannya dengan semakin meningkatnya momentum aliran, aliran mampu melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi, sehingga separasi dapat diminimalisir. Turbulensi aliran merupakan salah satu sifat fluida yang menunjukkan fluktuasi aliran, dimana gambar 4.11 visualisasi kontur intensitas turbulensi ini menunjukkan seberapa besar tingkat intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan. Pada pemodelan pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) tanpa menggunakan *bump* terlihat bahwa tingkat intensitas turbulensi maksimalnya adalah 16.07 %..

Pada pemodelan dengan variasi jarak *bump* $s = -0.8h$ memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi maksimumnya adalah 27.69 %. Kemudian untuk variasi jarak $s = -1.6h$ yang memberikan titik *reattachment* yang paling pendek memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi maksimumnya adalah 19.79 % dan pada variasi jarak $s = -3.2h$ memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi yang semakin besar dengan nilai maksimum 17.84 %. Hal ini menandakan semakin jauh jarak pengganggu dari *step*-nya atau semakin mendekati posisi *inlet*, maka tingkat intensitas turbulensinya semakin besar.



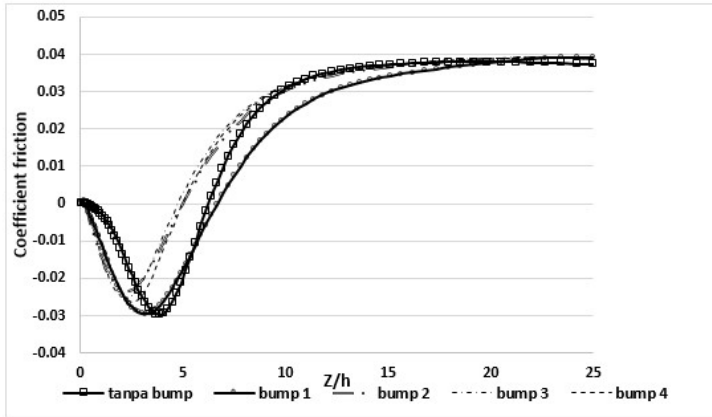


Gambar 4.11 Visualisasi kontur intensitas turbulensi tanpa bump (a) dan dengan penambahan *bump* (b), (c), (d) & (e)

Dari hasil visualisasi dapat diketahui bahwa yang memiliki nilai intensitas turbulensi yang paling besar adalah variasi jarak $s = -3.2h$ dengan nilai sebesar 78.02%, sedangkan yang memiliki nilai intensitas turbulensi paling kecil dari penambahan *circular bump* terdapat pada pemodelan geometri dengan jarak $s = -1.6h$ dengan nilai sebesar 36.68%.

4.2.4 Coefficient Friction (Cf)

Besarnya *skin friction coefficient* (Cf) erat kaitannya dengan besarnya tegangan geser dinding ($\tau\omega$). Geometri pipa *circular* dengan pembesaran penampang identik dengan perubahan penampang yang melebar sehingga aliran yang mengalir didalamnya akan memperoleh pengaruh dari *adverse pressure gradient* yang besar. Turunya nilai Cf dimulai dari nol mengindikasikan terjadinya separasi aliran yang dipengaruhi *adverse pressure gradient* sehingga terjadi penebalan *boundary layer*, akibatnya aliran didekat *diverging wall* akan mengalami defisit momentum sehingga terjadi separasi.



Gambar 4.12 Perbandingan grafik C_f tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump*

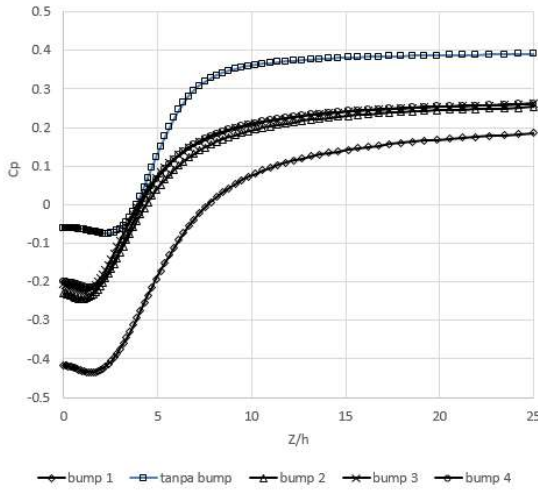
Gambar 4.12 menunjukkan distribusi C_f pada *wall* model pipa *circular* dengan pembesaran penampang dengan *reynolds number* 1.12×10^4 tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump* pada bagian *downstream*. Keseluruhan fenomena grafik C_f dari tiap-tiap pemodelan memiliki tren yang relatif sama. Perbandingan pemodelan geometri pipa *circular* dengan pembesaran penampang yang menggunakan *bump* dan tanpa menggunakan *bump* sama-sama dimulai dari nilai $C_f = 0$, ini menunjukkan terjadinya separasi aliran pada area *diverging*.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa apabila ditarik garis dari nilai nol pada koordinat y kearah horizontal maka akan didapatkan panjang *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan geometri, dimana pemodelan dengan jarak *bump* $s = -1.6h$ memiliki jarak *reattachment* yang paling pendek, kemudian diikuti dengan pemodelan dengan jarak *bump* $s = -2.4h$, $-0.8h$, dan terakhir $-3.2h$. Hal ini menunjukkan kesesuaian dengan data hasil yang didapat dari panjang *reattachment* pada tabel 4.1.

4.2.5 Coefficient of Pressure (Cp)

Pressure coefficient merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang dapat mempresentasikan aliran didalam pipa. Data koefisien tekan diambil pada bagian *downstream* pemodelan geometri pipa *circular* dengan pembesaran penampang. Aliran pada mulanya akan mengalami percepatan yang ditandai dengan penurunan grafik akibat *favorable pressure gradient*. Setelah itu mengalami perlambatan yang ditandai dengan kenaikan sangat tajam diakibatkan oleh aliran yang tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* pada saat penampang mengembang dengan tiba-tiba sehingga aliran terseparasi. Separasi akan berangsur normal dan akhirnya akan hilang, ini disebabkan karena adanya transfer energi antara aliran yang berada didaerah yang tidak terseparasi menuju aliran yang berada didaerah terseparasi sehingga aliran yang terseparasi akan berangsur-angsur kembali normal.

Pada gambar 4.13 grafik perbandingan Cp tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump* dibawah dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekan yang didapatkan dari simulasi ini memiliki tren yang sama, namun memiliki nilai yang berbeda-beda. Tekanan statis mengalami penurunan kemudian mengalami kenaikan yang sangat tajam yang diakibatkan aliran yang mengembang dengan tiba-tiba, sehingga terjadi *adverse pressure gradient* yang membuat aliran terseparasi. Penambahan *circular bump* pada sisi *upstream* bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi pada aliran. Akibat meningkatnya intensitas turbulensi, momentum aliran yang berada pada dinding akan mengalami peningkatan. Momentum aliran yang lebih tinggi ini diharapkan mampu untuk melawan *adverse pressure gradient* pada penampang yang melebar secara tiba-tiba, sehingga separasi yang terjadi dapat ditunda. Aliran akan kembali normal setelah terjadi transfer energi antara aliran yang terseparasi dengan aliran yang tidak terseparasi.



Gambar 4.13 Perbandingan grafik *Coefficient pressure* tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump*

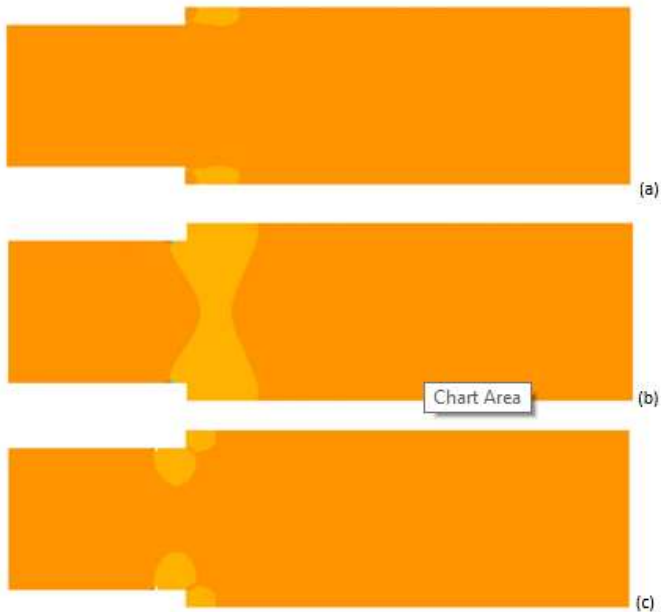
Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa dengan penambahan *circular bump* pada posisi *upstream* dapat menurunkan *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan geometri pipa *circular* dengan pembesaran penampang. Tabel 4.2 merupakan hasil perbandingan *pressure drop* yang terjadi pada tiap-tiap pemodelan. Nilai *pressure drop* yang paling kecil terdapat pada model benda uji $s = -1.6h$ sebesar 354.862 dan nilai *pressure drop* yang paling besar terdapat pada penambahan bodi pengganggu dengan jarak $s = -0.8h$ sebesar 392.202.

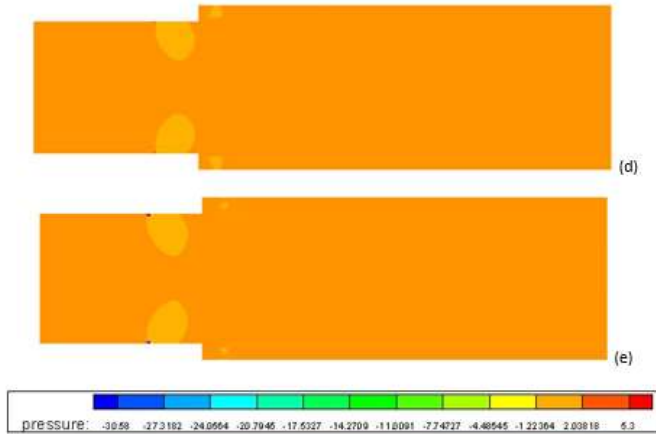
Tabel 4.2 Perbandingan nilai *pressure drop*.

variasi	P1 (Pa)	P2 (Pa)	ΔP (Pa)	KL
Tanpa Bump	0.1108	0.923446	0.81234	0.222846
Bump 1	0.396512	0.794068	0.40556	0.23104
Bump 2	0.43729	0.92875	0.49146	0.19764
Bump 3	0.414263	0.944489	0.530226	0.20432
Bump 4	0.400603	0.935599	0.534996	0.21846

Jadi, dari data yang didapatkan bahwa pemodelan geometri dengan penambahan *bump* dapat mereduksi *pressure drop* yang terjadi pada penampang pipa *circular* dengan pembesaran penampang. Dari hasil simulasi yang dilakukan variasi jarak penambahan *bump* pada $s = -1.6h$ merupakan jarak yang paling efektif mengurangi *pressure drop* yang terjadi. Nilai P1 diambil dari line $z/h = -8$ sebelum *bump* sedangkan nilai P1 diambil dari $z/h = 10$ setelah jarak reattachment. Dari tabel 4.2 diatas dapat diketahui bahwa nilai koefisien lossesnya cenderung sama sedangkan yang berubah nilai beda tekanan.

Visualisasi kontur tekanan statis dapat memberikan informasi mengenai perubahan harga C_p yang ditunjukkan dengan *grade* warna yang terbentuk. Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan tekanan statis yang terjadi pada pemodelan geometri tanpa dan dengan penambahan *bump*.





Gambar 4.14 Perbandingan kontur tekanan statis pada tiap pemodelan geometri tanpa bump (a) dan dengan penambahan bump (b), (c), (d) & (e)

Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan tekanan statis tanpa dan dengan penambahan *bump*. Dari simulasi variasi jarak *bump* yang dilakukan didapatkan nilai tekanan statis pada variasi jarak *bump* $s = -3.2h$ memiliki tekanan statis yang paling kecil dengan nilai -30.58 . Sedangkan tekanan statis yang paling besar terdapat pada variasi jarak *bump* $s = -1.6h$ dengan nilai 5.3 untuk bagian *downstream*. Semakin kecil nilai tekanan statis maka harga C_p juga akan kecil. Sebaliknya jika nilai tekanan statis besar maka harga C_p juga akan besar. Faktor yang mempengaruhi nilai C_p pada pemodelan pipa *circular* dengan pembesaran penampang adalah posisi jarak penambahan *bump*. Posisi jarak penambahan *bump* akan berpengaruh pada peningkatan turbulensi aliran. Turbulensi aliran akan membuat momentum aliran semakin meningkat. Hal ini bertujuan agar aliran dapat melawan *adverse pressure gradient* pada penampang yang mengembang secara tiba-tiba sehingga dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi pada saluran pipa *circular* dengan pembesaran penampang.

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield with a white emblem inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid-like pattern across the entire page.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan mengenai karakteristik aliran didalam pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) dengan *reynolds number* 1.12×10^4 dan variasi jarak *bump* maka didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya :

1. Penambahan *bump* pada bagian sisi *upstream* sangat berpengaruh terhadap peningkatan intensitas turbulensi aliran. Pengujian variasi jarak *bump* yang paling efisien untuk mengurangi titik *reattachment* pada pengujian yang dilakukan adalah pada jarak $s = -2.4h$ ($-0.3d_1$), yang memberikan hasil jarak *reattachment* yang paling pendek yaitu 4.741, pengurangan sebesar 25.9%.
2. *Skin friction coefficient* yang didapatkan dari pengolahan numerik memberikan data tentang tegangan geser yang terjadi pada permukaan geometri sumbu Z. *Skin friction coefficient* pada bagian dinding juga sangat mempengaruhi jarak *reattachment*. Sehingga dari grafik pada pembahasan *Coefficient Friction* dapat dilihat bahwa dengan menarik garis sejajar dengan nol pada sumbu z ordinat secara horizontal maka akan didapatkan jarak *reattachment* dari pengujian yang dilakukan.
3. Penambahan bodi pengganggu pada posisi *upstream* pipa dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi dalam pemodelan pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*).
4. Daerah yang masih terkena efek separasi memberikan nilai *pressure drop* yang besar.

5. Tidak terdapat korelasi antara meningkatnya intensitas turbulensi dengan panjang *reattachment* yang terjadi.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan dapat bermanfaat sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini belum dilakukan secara eksperiment sehingga cukup sulit untuk membandingkan hasil yang dapat divalidasi secara aktual hanya saja dilakukan pendekatan dengan mencari literature-literatur dri jurnal yang berkaitan dengan aliran didalam pipa. Hasil eksperiment penelitian pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) sangat membantu untuk memvalidasi data yang didapatkan pada simulasi numerik ini.
2. Melakukan penelitian pipa *circular* dengan pembesaran penampang (*sudden enlargement*) dengan variasi *reynolds number* dan variasi rasio ekspansi dengan penambahan *bump* agar didapatkan data yang lebih akurat dan dapat dipertimbangkan

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a blue shield-shaped emblem with a white circular design inside, followed by the letters 'ITS' in a bold, sans-serif font. The logos are arranged in a grid-like pattern across the entire page.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

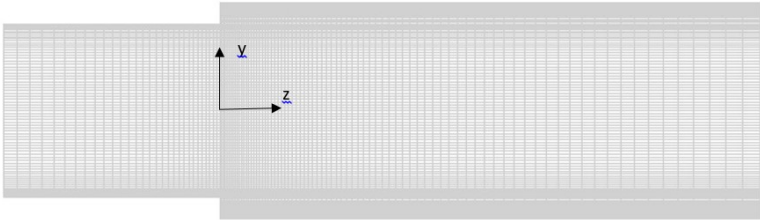
1. Idelchick. 1960. *Hand Book of Hydraulic Resistance*. Published for the US Atomic Energy Commission
2. Robert W. Fox, Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard,. 2010. **Introduction to Fluid Mechanics**. Jhon Wiley & Sons, Inc.
3. J. Rajasekaran. 2011. “ *Effect of boundary layer thickness on separated shear layer behind a backward facing step*”. In *CASI Aero*.
4. J. J. Kim. 1978. *Investigation of separation and reattachment of the instability of an incompressible separate shear layer*. PhD thesis, Stanford University.
5. Ikhwan. 2012. “**Materi simulasi sudden expansion**”. Laporan tugas akhir. Jurusan Teknik mesin FTI-ITS

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

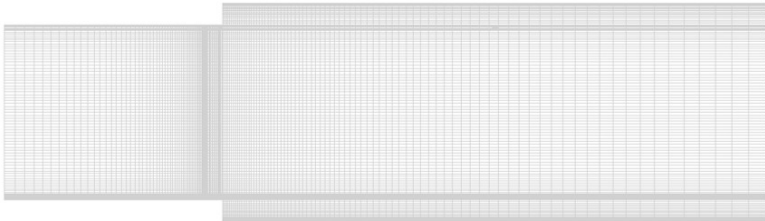
LAMPIRAN

Lampiran 1

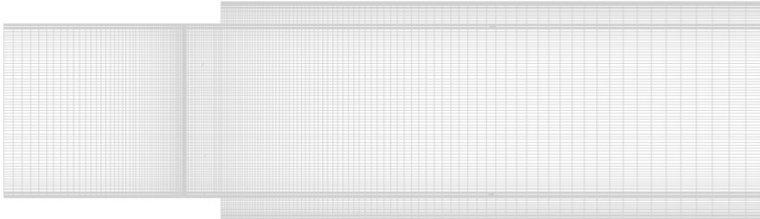
Meshing pada model tanpa bump



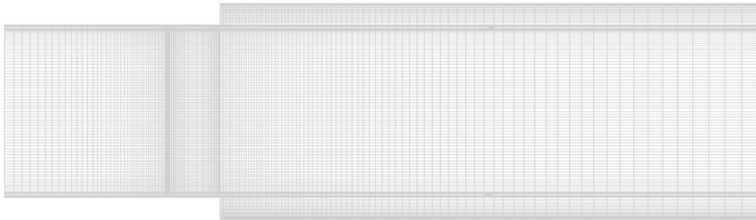
Meshing dengan bump -0.8 dari step



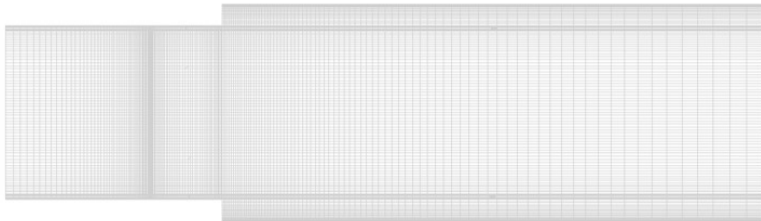
Meshing dengan bump -1.6 dari step



Meshing dengan bump -1.6 dari step

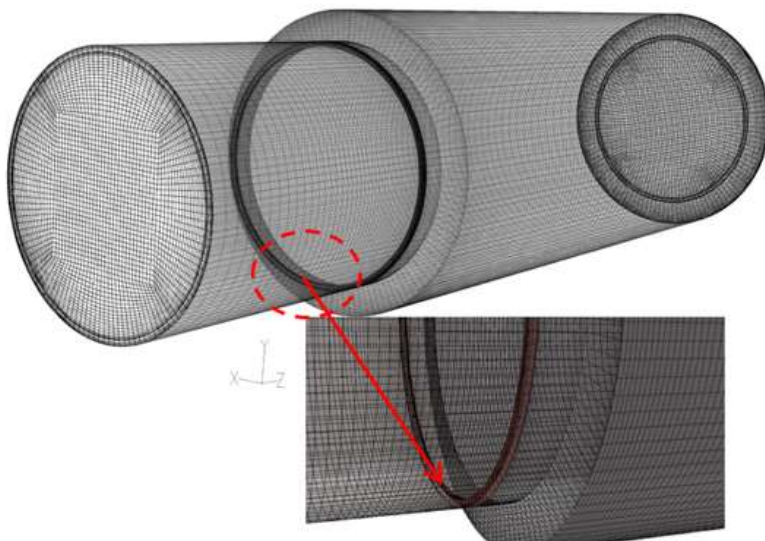


Meshing dengan bump -2.4 dari step

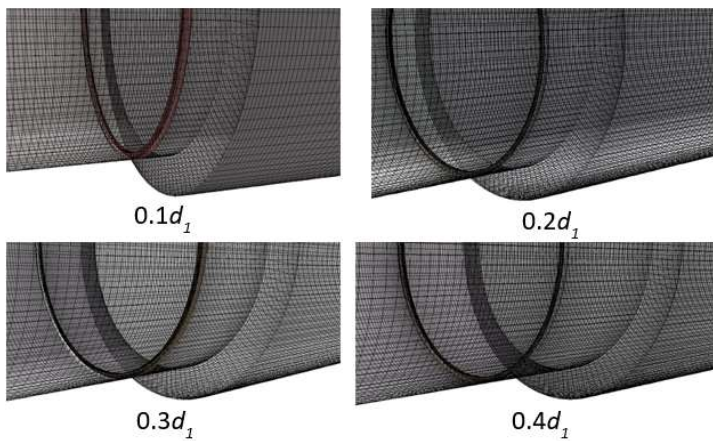


Lampiran 2

Meshing tampak isometric dengan bump

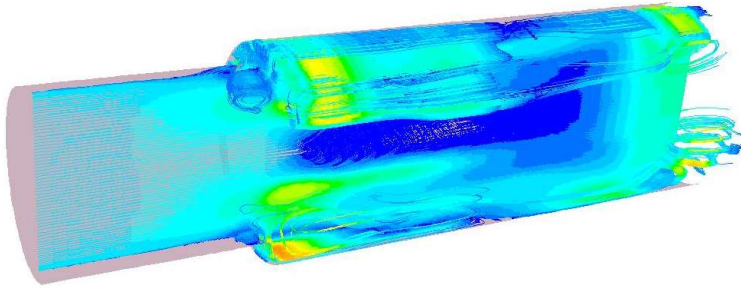


Meshing tampak isometric dengan variasi bump



Lampiran 3

Pathline kecepatan didalam pipa sudden enlargement tanpa bump



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kota Kediri, pada tanggal 29 Juni 1990, merupakan putra pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya dimulai dari TK dharma husada kota kediri, SDN 1 Semampir, SLTP Negeri 1 Kediri dan SMA Negeri 3 Kediri.

Setelah lulus SMA pada tahun 2009 penulis mengikuti seleksi penerimaan mahasiswa baru program Diploma III PPNS melalui jalur PMDK dan diterima sebagai mahasiswa di Jurusan D3 Teknik Permesinan Kapal PPNS ITS Surabaya, Setelah lulus penulis melanjutkan kuliah tahap Sarjana Jurusan Teknik Mesin Lintas Jalur Teknik Mesin ITS Surabaya. Penulis mengambil bidang keahlian Konversi Energi dan mengambil tugas akhir dibidang mekanika fluida.

Selain aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan didalam maupun diluar kampus. PT Indonesia Power Surabaya merupakan tempat kerja praktek selama 4 bulan penulis pada tahun 2012. Penulis aktif pada organisasi Ikatan Alumni PPNS Surabaya periode 2017-2022 bidang Kewirausahaan. Penulis dapat dihubungi di nomor telepon 085735073541 atau di alamat email captain_ia3@yahoo.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan