



TESIS - TM 142501

**SIMULASI NUMERIK 3D PENGARUH PENAMBAHAN  
TRIANGULAR BUMP PADA ALIRAN BACKWARD-FACING  
STEP**

**MUHAMMAD MASRUR  
NRP. 2114 202 0013**

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

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**



TESIS - TM 142501

**SIMULASI NUMERICAL 3D EFFECT OF TRIANGULAR  
BUMP IN ADDITION BACKWARD-FACING STEP FLOW**

**MUHAMMAD MASRUR  
NRP. 2114 202 013**

**Advisor Lecturer  
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT**

**MASTER PROGRAM  
CONVERSION OF ENERGY ENGINEERING  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

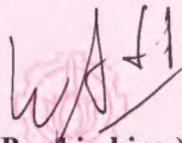
**MUHAMMAD MASRUR**

Nrp. 2114202013

Tanggal Ujian : 18 Juli 2016  
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui Oleh :

1. **Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**  
NIP. 19710405 199702 1 001



(Pembimbing)

2. **Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.**  
NIP. 19641228 199003 1 002



(Penguji)

3. **Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T.**  
NIP. 19620216 199512 1 001



(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana,



**Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.**

NIP. 19601202 198701 1 001

# SIMULASI NUMERIK 3D PENGARUH PENAMBAHAN TRIANGULAR BUMP PADA ALIRAN BACKWARD FACING STEP

Nama Mahasiswa : Muhammad Masrur  
NRP : 2114 202 013  
Dosen Pembimbing : Dr.Wawan Aries Widodo, ST., MT.

## ABSTRAK

Penelitian ini untuk mengetahui karakteristik aliran pada *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump*. Aliran pada *backward-facing step* dimulai lapisan batas *upstream* terpisahkan pada tepi ujung *backward-facing step* yang berkembang menjadi *shear layer* yang tipis. Struktur turbulen pada daerah *shear layer* ini meningkat menyebabkan pembentukan resirkulasi kecepatan rendah dan memberikan *pressure drop* pada daerah tersebut. Daerah resirkulasi kecepatan rendah sangatlah tidak diinginkan sehingga dilakukanlah manipulasi atau kontrol medan aliran, salah satunya dengan penambahan *triangular bump* pada variasi jarak yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui berapa jarak yang optimum untuk memperkecil daerah resirkulasi kecepatan rendah.

Penelitian ini dilakukan secara numerik 3D *steady-RANS* menggunakan *software commercial CFD* dengan *turbulence model realizable k-ε* dan *near wall treatment* berupa *non equilibrium wall functions*. Geometri *backward-facing step* yang disimulasikan memiliki ekspansi rasio 1.125 dan *triangular bump* yang diletakkan pada sisi *upstream* memiliki ketinggian  $\frac{d}{h} = 0,05$  dan 0.1. Posisi *triangular bump* terhadap ujung tepi *backward-facing step* divariasikan pada jarak  $\frac{s}{d} = 7, 10, 15$  dan 20. *Reynolds number* berdasarkan ketinggian *backward-facing step* dan *velocity inlet*, yaitu  $3.8 \times 10^4$ .

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penempatan *triangular bump* pada sisi *upstream backward-facing step* meningkatkan turbulensi aliran sebelum terseparasi oleh *backward-facing step*. Reduksi panjang *reattachment* yang paling baik terjadi pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 20$  untuk konfigurasi *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$  untuk konfigurasi *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$ , masing-masing sebesar 13,0 % dan 19,4 %.

**Kata kunci :** *backward-facing step, triangular bump, turbulence model k-ε, sisi upstream, shear layer.*

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# SIMULASI NUMERICAL 3D EFFECT OF TRIANGULAR BUMP IN ADDITION BACKWARD-FACING STEP FLOW

**Name** : Muhammad Masrur  
**NRP** : 2114 202 013  
**Advisor** : Dr.Wawan Aries Widodo, ST., MT.

## ABSTRACT

*This study to determine the flow characteristics using a backward-facing step with the addition of triangular bump. The flow in the backward-facing step begins upstream boundary layer integral to the trailing edge of the backward-facing step that develops into a thin shear layer. The structure of turbulent shear layer in this area led to the formation recirculation increased low speed and provides pressure drop in the area. Recirculation regions low speed is not desirable to perform the manipulation or control of the flow field, one of them with the addition of triangular bump on a variety of different distances. This study aims to determine how far the distance is optimum for low speed recirculation region.*

*This research was carried out numerically 3D steady-rans using commercial CFD software with turbulence realizable  $k - \epsilon$  models and the near wall treatment in the form of non-equilibrium wall functions. Geometry backward-facing step is simulated has an expansion ratio ( $Er$ ) of 1.125 and a triangular bump that is placed on the upstream side has a height  $\frac{d}{h} = 0.05$  and  $\frac{d}{h} = 0.1$ . Position triangular bump against the end edge of the backward-facing step varied at a distance  $\frac{s}{d} = 7, 10, 15$  and 20. The Reynolds number based on the height of the backward-facing step and inlet velocity, ie  $3.8 \times 10^4$ .*

*The results obtained showed that the placement of triangular bump on the upstream side of the backward-facing step increases flow turbulence before separation by backward-facing step. Reduction of long- reattachment of the most well happen to distance variation  $\frac{s}{d} = 20$  for the configuration of the triangular bump  $\frac{d}{h} = 0.05$  and at a distance  $\frac{s}{d} = 15$  for the configuration of the triangular bump  $\frac{d}{h} = 0.1$ , respectively 13.0% and 19.4 %*

**Key words** : *backward-facing step, triangular bump, turbulence model  $k-\epsilon$ , upstream side, shear layer.*

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## KATA PENGANTAR



Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul

**“SIMULASI NUMERIK 3D PENGARUH PENAMBAHAN TRIANGULAR BUMP PADA ALIRAN BACKWARD FACING STEP”.**

Penulis menyadari bahwa keberhasilan penyusunan tesis ini tidak terlepas dari berbagai pihak baik langsung maupun tidak langsung. Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng selaku Kepala Program Pascasarjana Teknik Mesin FTI-ITS sekaligus sebagai dosen penguji penulis. Terima kasih atas saran dan ilmu yang diberikan selama kuliah.
2. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T, selaku dosen pembimbing yang selalu memberi bimbingan, arahan serta semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D dan Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T. selaku dosen penguji yang memberi banyak bimbingan dan masukan serta kritikan yang sangat membangun.
4. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan bimbingan, bantuan dan arahan.
5. Ibu saya yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan kepada penulis baik berupa moril maupun materil.
6. Nurul Badriyah dan Nur Fathonah sebagai saudara kandung yang telah memberikan semangat dan motivasinya.
7. Achmad Maimun sebagai saudara kembar saya yang selalu memberikan nasehat, motivasi dan semangat.

8. Winda Meliawati atas perhatian serta dukungannya dan motivasi personal kepada penulis.
9. Teman-teman seperjuangan pascasarjana Teknik Mesin FTI-ITS, Abdi, Arifin, Mahmud, Sulis, Izhary dan yang lain, terima kasih atas sharing ilmu dan segala hal selama perkuliahan ini.
10. Seluruh dosen dan civitas akademika jurusan Teknik Mesin ITS atas ilmu yang telah diberikan selama ini. Semoga bisa menjadi ilmu yang bermanfaat.
11. Semua pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian tesis ini yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Segala upaya telah penulis lakukan untuk menyajikan penelitian ini sebaik mungkin, namun tidak tertutup kemungkinan masih terdapat kekurangan-kekurangan di dalamnya. Untuk itu dengan kerendahan hati penulis mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun demi kesempurnaan di masa yang akan datang.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN.....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	6
1.3. Batasan Masalah.....	6
1.4. Tujuan Penelitian .....	7
1.5. Manfaat Penelitian .....	7
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>9</b>
2.1. Bacward-Facing Step .....	9
2.2. Penelitian Terdahulu .....	11
2.3. Bilangan Reynolds .....	25
2.3.1 Aliran Laminer.....	26
2.3.2 Aliran Turbulen.....	27
2.4. Konsep Lapisan Batas (Boundary Layer) .....	27
2.5. Pemodelan Numerik.....	31
2.5.1 Computational Fluid Dynamics .....	31
2.5.2 Persamaan dasar dan model turbulensi .....	33
2.5.3 Daerah Dekat Dinding (Near Wall Region) .....	34
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>39</b>

3.1. Tahapan Penelitian .....	39
3.2. Data .....	40
3.3. Tahapan Pemodelan Numerik .....	42
3.3.1 Tahap Pre-Processing .....	42
3.3.2 Tahap Processing atau Solver .....	45
3.3.3 Tahap Post Processing .....	50
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>53</b>
4. 1 <i>Grid Independency</i> .....	54
4. 2 Posisi dan Cara Pengambilan Data Hasil Simulasi.....	56
4. 3 Karakteristik Aliran pada <i>Backward-Facing Step</i> .....	58
4. 4 Fenomena dan Analisa Aliran pada <i>Backward-Facing Step</i> dengan Penambahan <i>Triangular Bump</i> .....	64
4.4.1 Karakteristik Aliran pada <i>Backward-Facing Step</i> dengan Penambahan <i>Triangular Bump</i> $\frac{d}{h} = 0.05$ .....	64
4.4.2 Karakteristik Aliran pada <i>Backward-Facing Step</i> dengan Penambahan <i>Triangular Bump</i> $\frac{d}{h} = 0.1$ .....	76
4. 5 Perbandingan Fenomena Aliran pada <i>Backward-Facing Step</i> Tanpa Penambahan <i>Triangular Bump</i> dengan Penambahan <i>Triangular Bump</i> .....	90
4.5.1 Analisa perbandingan Panjang <i>Reattachment</i> .....	90
4.5.2 Analisa Perbandingan Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> ( $C_p$ ) .....	91
4.5.3 Analisa Perbandingan Distribusi <i>Skin Friction</i> ( $C_f$ ).....	93
4.5.4 Analisa Perbandingan <i>Shape Factor</i> .....	95
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>99</b>
5.1 Kesimpulan .....	99
5.2 Saran .....	100

## DAFTAR PUSTAKA

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Karakteristik aliran di dalam <i>backward-facing step</i> (Driver dkk, 1987).....	9
Gambar 2.2 Letak <i>reattachment</i> variasi letak titik terhadap bilangan Reynolds (Armaly dkk, 1982) .....	14
Gambar 2.3 (a) Profil kecepatan pada $Re = 1095$ (b) Profil kecepatan pada $Re = 1290$ (Armaly dkk, 1982) .....	14
Gambar 2.4 Geometri <i>backward-facing step</i> dengan kondisi <i>inlet</i> (Driver dan Seegmiller, 1985).....	16
Gambar 2.5 Lokasi titik <i>reattachment</i> terhadap perubahan sudut dinding atas (Driver dan Seegmiller, 1985).....	17
Gambar 2.6 (a) Distribusi <i>pressure coefficient</i> $C_p$ (b) Distribusi skin friction $C_f$ (Driver dan Seegmiller, 1985).....	17
Gambar 2.7 Skema geometri eksperimental dari aliran <i>backward facing step</i> (Lee dan Mateesu, 1997).....	18
Gambar 2.8 profil kecepatan tak berdimensi untuk bilangan Reynolds yang berbeda (a) di $x = -0,5$ cm : $\circ$ $Re = 475$ ; $\square$ $Re = 685$ ; $\Delta$ $Re = 805$ ; $\diamond$ $Re = 985$ ; — teori (b) di $x = 21$ : $\bullet$ hasil pengukuran hot wire pada $Re=805$ ; — hasil prediksi simulasi pada $Re = 800$ ; $\circ$ Gartling (1990) untuk $Re = 800$ dan $41$ cm : $\blacksquare$ hasil pengukuran hot wire untuk $Re = 805$ ; - - -, hasil prediksi simulasi pada $Re = 800$ ; $\square$ Gartling (1990) pada $Re = 800$ (Lee dan Mateesu, 1997).....	18
Gambar 2.9 Variasi jarak <i>reattachment</i> dan titik separation dan panjang daerah resikulasi pada dinding atas dan bawah terhadap bilangan Reynolds untuk $ER = 2$ (Lee dan Mateesu, 1997).....	19
Gambar 2.10 Skema dari ukuran geometri <i>wind tunnel</i> (Venas dan Saetran,1999).....	20
Gambar 2.11 (a) Distribusi kecepatan rata – rata (b) <i>turbulence normal stress</i> (Venas dan Saetran, 1999).....	21
Gambar 2.12 Perbandingan $C_p$ dan $C_f$ untuk model turbulen dan <i>near wall treatment</i> yang berbeda (Kim dkk, 2005).....	20

Gambar 2.13 (a) Distribusi <i>static pressure</i> $C_p$ pada daerah <i>obstacle</i> pada bilangan Reynolds $Re = 1.3 \times 10^4$ (b) $Re = 2.1 \times 10^4$ (Sutardi dan widodo, 2008).....	24
Gambar 2.14 Profil kecepatan ( $u/U$ ) pada berbagai posisi (a) $x/w = -3$ (b) $x/w = 0.5$ (c) $x/w = 3$ pada bilangan Reynolds $1.3 \times 10^4$ (Sutardi dan widodo, 2008).....	25
Gambar 2.15 Ilustrasi aliran laminar dan turbulen (Fox, 2010) .....	26
Gambar 2.16 Tebal Lapisan Batas ( $\delta$ ) (Fox, 2010) .....	28
Gambar 2.17 <i>Boundary Layer</i> Pada Silinder (Script).....	28
Gambar 2.18 Profil Lapisan Batas Laminer, Daerah Transisi dan Lapisan Batas Turbulen di Dalam Lapisan Batas pada Plat Datar as (Google).....	29
Gambar 2.19 (a) Profil kecepatan (b) Profil momentum (Fox, 2010) .....	30
Gambar 2.20 Pembagian daerah dekat dinding (User guide CFD) .....	35
Gambar 3. 1 (a) Geometri pemodelan <i>Backward Facing Step</i> tanpa penambahan <i>triangular bump</i> .....	40
Gambar 3. 1 (b) Geometri pemodelan <i>Backward Facing Step</i> dengan penambahan <i>triangular bump</i> .....	41
Gambar 3.2 Mesh pada geometri <i>Backward Facing Step</i> tanpa <i>triangular bump</i> ..	44
Gambar 3.3 Mesh pada geometri <i>Backward Facing Step</i> dengan <i>triangular bump</i> .....	44
Gambar 4.1 Grafik grid <i>independency</i> pada nilai $C_p$ .....	54
Gambar 4.2 Grafik perbandingan distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ) .....	55
Gambar 4.3 Posisi pengambilan data <i>iso-surface backward facing step</i> .....	57
Gambar 4.4 Posisi titik pengambilan vektor kecepatan.....	58
Gambar 4.5 Visualisasi kontur pada <i>iso-surface midspan</i> (a) Kontur kecepatan (b) Vektor kecepatan (c) <i>Velocity pathline</i> (d) Kontur tekanan.....	59
Gambar 4.6 Grafik vektor kecepatan aliran <i>backward-facing step</i> di titik (a) $\frac{x}{h} = 3$ , (b) $\frac{x}{h} = 5$ , (c) $\frac{x}{h} = 10$ .....	61

Gambar 4.7 Grafik distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ) pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward-facing step</i> tanpa penambahan <i>triangular bump</i> .....	62
Gambar 4.8 Grafik distribusi <i>skin friction</i> ( $C_f$ ) pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward-facing step</i> tanpa penambahan <i>triangular bump</i> ...	63
Gambar 4.9 Kontur kecepatan dengan variasi jarak <i>triangular bump</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 15$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	65
Gambar 4.10 Vektor kecepatan dengan variasi jarak <i>triangular bump</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 15$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	65
Gambar 4.11 <i>Velocity pathline</i> dan vektor kecepatan <i>backward facing step</i> dengan variasi <i>triangular bump</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 15$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	67
Gambar 4.12 Kontur tekanan dengan variasi <i>triangular bump</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 15$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	71
Gambar 4.13 Grafik vektor kecepatan aliran <i>backward-facing step</i> di titik (a) $\frac{x}{h} = 3$ , (b) $\frac{x}{h} = 5$ , (c) $\frac{x}{h} = 10$ --- jarak $\frac{s}{d} = 7$ ; ● jarak $\frac{s}{d} = 10$ ; * jarak $\frac{s}{d} = 15$ ; .... jarak $\frac{s}{d} = 20$ .....	72
Gambar 4.14 Grafik distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ) <i>triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.05$ pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward facing step</i> .....	74
Gambar 4.15 Grafik distribusi <i>skin friction</i> ( $C_f$ ) <i>triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.05$ pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward facing step</i> .....	75
Gambar 4.16 Kontur kecepatan dengan variasi <i>triangular bump</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 15$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	77
Gambar 4.17 Vektor kecepatan dengan variasi <i>triangular bump</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 15$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	77

Gambar 4.18	<i>Velocity pathline</i> dan vektor kecepatan pada <i>backward facing step</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 15$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	81
Gambar 4.19	Grafik vektor kecepatan aliran <i>backward facing step</i> di titik (a) $\frac{x}{h} = 3$ , (b) $\frac{x}{h} = 5$ , (c) $\frac{x}{h} = 10$ --- variasi jarak $\frac{s}{d} = 7$ ; ● variasi jarak $\frac{s}{d} = 10$ ; * variasi jarak $\frac{s}{d} = 15$ ; .... variasi jarak $\frac{s}{d} = 20$ .....	84
Gambar 4.20	Grafik distribusi <i>pressure coefficient</i> (Cp) pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward-facing step</i> .....	85
Gambar 4.21	Kontur tekanan dengan variasi jarak <i>triangular bump</i> (a) $\frac{s}{d} = 7$ , (b) $\frac{s}{d} = 10$ , (c) $\frac{s}{d} = 10$ , (d) $\frac{s}{d} = 20$ .....	88
Gambar 4.22	Grafik distribusi <i>skin friction</i> (Cf) <i>triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.1$ pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward-facing step</i> .....	89
Gambar 4.23	Perbandingan panjang <i>reattachment</i> ( $\frac{x_r}{h}$ ) pada <i>backward-facing step</i> dengan jarak <i>triangular bump</i> ( $\frac{s}{d}$ ).....	90
Gambar 4.24	Grafik distribusi <i>pressure coefficient</i> (Cp) pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward-facing step</i> .....	92
Gambar 4.25	Grafik distribusi <i>skin friction</i> (Cf) pada <i>lower wall</i> dari <i>iso-surface medspin backward-facing step</i> .....	94
Gambar 4.26	Grafik distribusi profil kecepatan ( $\frac{u}{U_{maks}}$ ) pada <i>backward-facing step</i> (a) Penambahan <i>triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.05$ , (b) Penambahan <i>triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.1$ .....	95

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data panjang <i>reattachment</i> beberapa penelitian <i>backward facing step</i> ..	4
Tabel 2.1 Data hasil penelitian terdahulu.....	11
Tabel 2.2 Perbandingan panjang <i>reattachment</i> antara hasil eksperimental dan simulasi (Lee dan Mattesu, 1997) .....	20
Tabel 2.3 perbandingan panjang <i>reattachment</i> (Kim dkk, 2005).....	22
Tabel 3.1 Dimensi pemodelan <i>Backward Facing Step</i> .....	42
Tabel 3.2 Monitoring Residual Pemodelan.....	49
Tabel 4.1 Nilai Cp dan Y <sub>+</sub> tiap mesh .....	54
Tabel 4.2 Perbandingan panjang <i>reattachment</i> .....	56
Tabel 4.3 Panjang <i>reattachment</i> pada <i>backward-facing step</i> dengan penambahan <i>triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.05$ .....	69
Tabel 4.4 Panjang <i>reattachment</i> pada <i>backward-facing step</i> dengan penambahan <i>triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.1$ .....	82
Tabel 4.5 <i>Shape factor</i> dan panjang <i>reattachment</i> pada <i>backward facing step</i> .....	96

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

$C_p$	Koefisien Tekanan
$C_f$	Koefisien Skin friction
$\tau_w$	<i>wall shear stress</i>
$h$	Tinggi <i>backward-facing step</i> (m)
$H$	<i>Shape factor</i>
IT	Intensitas turbulensi
$\delta^*$	<i>Displacement thickness</i>
$\theta$	<i>Momentum thickness</i>
$P_c$	Tekanan statis kontur (N/m <sup>2</sup> )
$P_\infty$	Tekanan statis <i>freestream</i> (N/m <sup>2</sup> )
$Re_h$	<i>Reynolds number</i> berdasarkan tinggi <i>backward-facing step</i>
$St$	<i>Strouhal number</i>
T	Waktu (sec)
$U_\infty$	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)
$U_{max}$	Kecepatan lokal maksimum (m/s)
$U$	Kecepatan lokal aliran (m/s)
$\mu$	Viskositas udara (N.s/m <sup>2</sup> )
$u$	Kecepatan lokal aliran (m/s)
$\delta$	<i>Boundary thicknes</i> (mm)
$\rho$	Massa jenis udara (kg/m <sup>3</sup> )
$\omega$	<i>Specific dissipation rate</i> (s <sup>-1</sup> )

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi numerik pengaruh yang ditimbulkan penambahan *triangular bump* pada aliran *backward-facing step*. Laporan penelitian ini dibagi menjadi 5 bagian yaitu bab 1 akan membahas mengenai latar belakang, masalah dan hasil yang ingin dicapai. Bab 2 membahas mengenai landasan – landasan teori dan penelitian terdahulu yang mendukung penelitian ini. Bab 3 membahas mengenai metodologi yang akan dilakukan dalam penelitian ini untuk mencapai hasil yang diharapkan. Bab 4 membahas hasil-hasil yang diperoleh dari *post-processing* simulasi numerik baik berupa data hasil kualitatif maupun kuantitatif beserta analisa. Bab 5 membahas kesimpulan hasil penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

Penemuan teori tentang *boundary layer* oleh Ludwig Prandtl pada awal abad ke dua puluh merupakan titik awal penelitian tentang separasi aliran yang sering dilakukan. Karena keunikan dari karakteristik separasi aliran membuat karakteristik separasi aliran telah dipelajari selama puluhan tahun baik oleh secara eksperimen maupun secara numerik untuk memahami gejala fisika tentang *shear layer* pada daerah separasi dan mekanisme ketidakstabilan didalamnya. Ketidakstabilan pada *shear layer* yang bebas adalah sumber struktur koheren yang berkembang. Menurut **Hussain dkk** (1986) dalam penelitiannya “*Coherent structures and turbulence*” menjelaskan hampir dalam setiap aliran *turbulence* terdapat struktur koheren yang berkembang dan hal ini membuat lebih menarik untuk mempelajari tentang separasi aliran dan *shear layer*. Selain kepentingan akademik, pengetahuan tentang separasi aliran juga dapat diterapkan pada berbagai aplikasi industri seperti sayap pesawat, turbin, *suddenly expanding pipes*, ruang pembakaran dan lain – lain. Pada aliran di dalam pipa terutama di *suddenly expanding*, separasi aliran terjadi didekat dengan sambungan antara pipa. Separasi aliran ini menimbulkan *drag* sehingga terjadi penurunan tekanan di daerah struktur koheren. Banyak macam

tentang *drag*, tetapi dalam penelitian ini lebih di fokuskan pada *pressure drag* yang di timbulkan oleh separasi aliran dan bagaimana cara meminimalkan *pressure drag* tersebut. Dalam penelitian oleh **Roos** dan **Keegelman** (1986) menunjukkan bahwa dengan mengendalikan separasi aliran, karakteristik dari struktur koherent dapat diubah dan akibatnya dapat mengubah karakteristik *drag* juga. Aspek – aspek aliran seperti bilangan Reynolds merupakan hal penting dalam memahami ketidakstabilan dan karakteristik dari struktur koheren ini agar dapat mengendalikan aliran *dynamic* untuk mencapai penurunan nilai *drag* yang signifikan.

Fenomena fisika separasi aliran karena ketidakstabilan aliran tersebut mengakibatkan timbulnya aliran yang kompleks. Dalam upaya menyederhanakan karakteristik aliran tersebut, peneliti terdahulu telah melakukan penelitian pada berbagai geometri yang meliputi, *Rib, fence, bluff body* pada *splitter plate, suddenly expanding pipes, forward* dan *backward facing step*, dan *cavities*. Geometri ini menyederhanakan karakteristik aliran sampai batas tertentu pertemuan *separation* atau titik *reattachment*. Dari beberapa bentuk geometri tersebut, *backward-facing step* dianggap sebagian besar para peneliti sebagai geometri yang ideal untuk separasi aliran karena memiliki titik separasi tunggal tetap dan membangkitkan *dynamics unperturbed* dengan *downstream disturbances*.

Menurut **Eaton** dan **Johnston** (1980), meskipun *backward-facing step* memiliki geometri yang sederhana, aliran pada *downstream* berpengaruh *sensitive* terhadap beberapa parameter aliran. Parameter aliran ini antara lain hubungan antara bilangan Reynolds dengan ketinggian *backward-facing step* ( $Re = \frac{U_{\infty} h}{\nu}$ , dengan  $U_{\infty}$  adalah kecepatan maksimum pada saluran *inlet*), keadaan *separating boundary layer* (laminer atau turbulent atau transisi) dan rasio ketebalan dari *separating boundary layer*. Dalam penelitian, bilangan Reynolds didasarkan pada ketinggian *backward-facing step* dan kecepatan maksimum *inlet* seperti yang telah didefinisikan sebelumnya.

Ketertarikan **Armaly, dkk** (1983) terhadap *backward-facing step* diintensifkan dengan eksperimental dan studi numerik. Mereka menyelidiki secara eksperimental terhadap geometri *backward-facing step* untuk *expansion ratio*  $((H+h)/h) = 1,9423$  dan *aspect ratio*  $= 3.5$  pada bilangan Reynolds  $Re_D = 70$  hingga  $Re_D = 8000$ . Pada bilangan Reynolds 400 aliran tampak seperti 3D. Disekitar bilangan Reynolds ini, mereka mengamati ketidaksesuaian dalam panjang resirkulasi utama antara hasil eksperimen dengan hasil predeksi numerik. Pada bilangan Reynolds daerah transisi yaitu sekitar 400 hingga 5000 mengamati selain terdapat *separation bubble* utama dibagian dinding bawah sebelah *backward-facing step*, *separation bubble* kedua dan ketiga muncul pada bagian dinding atas dan sisi dinding.

**Kuehn** (1980) dalam penelitiannya mengukur panjang *reattachment* sebagai fungsi terhadap rasio ekspansi ( $Er$ ). Dari hasil pengukuran dan penelitian sebelumnya yang dilakukan, ia menunjukkan bahwa *reattachment* akan bertambah panjang sebanding linier dengan kenaikan rasio ekspansi hingga  $Er = 1.7$ . Titik *reattachment* merupakan salah satu parameter penting dalam aliran ini sehingga dilakukan pengukuran panjang *reattachment* terhadap perubahan bilangan Reynolds atau perubahan nilai  $Er$ . Tabel 1.1 menunjukkan beberapa nilai panjang *reattachment* dari penelitian sebelumnya. **Eaton dan Johnston** (1980) melakukan pengukuran panjang *reattachment* dengan merubah bilangan Reynolds. Hasil pengukuran menunjukkan meskipun menggunakan bilangan Reynolds yang tinggi, ternyata panjang *reattachment* tidak hanya dipengaruhi bilangan Reynolds saja namun juga dipengaruhi oleh ketebalan *boundary layer* ( $\frac{\delta}{h}$ ). **Adam dan Johnston** (1998) menunjukkan bahwa dengan perubahan bilangan Reynolds tetap mempengaruhi panjang *reattachment* hingga pada bilangan Reynolds yang besar yaitu  $Re = 41000$  jika nilai  $\frac{\delta}{h}$  berbeda.

Tabel 1.1 Data panjang *reattachment* beberapa penelitian *backward-facing step*

<i>Referensi</i>	<b>ER</b>	<b>Re<sub>h</sub></b>	$\frac{\delta}{h}$	<b>Re<sub>θ</sub></b>	<b>X<sub>r</sub>/h</b>
<i>Kim dkk (2005)</i>	1.1	38000	1.50	-	6.3
<i>Lee dkk. (2004)</i>	1.5	33000	-	1300	7.4
<i>Spazzini et al. (2001)</i>	1.45	16000	1.10	-	6.54
<i>Le et al. (1997)</i>	1.20	5100	1.2	-	6.28
	1.50	33000	0.41	1340	7.8
<i>Otugen (1991)</i>	2.0	26500	-	-	6.50
	3.13	38000	-	-	6.20
<i>Adams and Johnston (1988)</i>	1.25	36000	0.02-1.53	-	4.94 – 6.33
	1.25	7651 -41175	-	-	4.23 – 4.88
<i>Driver and Seegmiller (1985)</i>	1.12	37500	1.50	5000	6.26
<i>Armaly dkk. (1983)</i>	1.94	6000	0.5	-	8
<i>Durst and Tropea (1982)</i>	1.4 – 3.0	20000	-	-	7.2 – 8.65
<i>Eaton and Johnston (1980)</i>	1.67	23000	0.23	510	8.2
	1.67	11000	0.18	240	7
<i>Kuehn (1980)</i>	1.14-1.3	-	-	4950	6.7 - 7
	1.67	39000	0.23	890	8

**Durst** dan **Tropea** (1982) dalam penelitiannya menyelidiki secara sistematis efek dari rasio ekspansi dan bilangan Reynolds terhadap panjang *reattachment*. Penelitian berikutnya yang dilakukan **Otugen** (1991) menunjukkan tren hasil antara panjang *reattachment* terhadap nilai rasio ekspansi yang berbeda dengan hasil dari **Durst** dan **Tropea** (1982). Panjang *reattachment* dari **Durst** dan **Tropea** (1982) menunjukkan hasil kecenderungan naik untuk nilai  $Er = 2,0$ , berbeda

dengan hasil dari **Otugen** (1991) yang menunjukkan hasil kecenderungan turun untuk  $Er$  yang besar. Oleh karena itu, efek dari perubahan rasio ekspansi terhadap panjang *reattachment* belum menunjukkan hubungan dengan baik.

**Driver** dan **Seegmiller** (1985) telah melakukan pengukuran secara eksperimental panjang *reattachment* pada nilai rasio ekspansi dan bilangan Reynolds mendekati sama dengan yang dilakukan oleh **Otugen** (1991) menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda. Kedua penelitian tersebut memberikan panjang *reattachment* yang lebih kecil dibandingkan dengan penelitian yang lain untuk bilangan Reynolds relatif besar. Panjang *reattachment* yang pendek menunjukkan daerah *recirculation bubble* menjadi lebih kecil sehingga dapat menurunkan nilai dari *pressure drag*. **Kim dkk** (2005) melakukan studi numerik dengan membandingkan metode *near wall treatment* dan menggunakan model turbulensi yang berbeda pada rasio ekspansi dan bilangan Reynolds yang sama dilakukan dalam eksperimental oleh **Driver** dan **Seegmiller** (1985). Dari studi numerik yang dilakukannya *non equilibrium wall functions* dengan model turbulensi *renormalization group  $k-\epsilon$*  (RNG), *realizable  $k-\epsilon$*  (RKE) memberikan hasil yang terbaik atau mendekati sama dengan hasil eksperimental yang dilakukan oleh **Driver** dan **Seegmiller** (1985).

Berdasarkan hasil penelitian **Sutardi** dan **Widodo** (2008), adanya *obstacle* pada aliran turbulensi memberikan peningkatan *turbulence intensity* ( $Tu$ ) sehingga terjadi separasi *massive*. Separasi *massive* pada *obstacle* terjadi akibat momentum aliran tidak mampu mengatasi *adverse pressure gradient* dan tegangan geser antara permukaan *obstacle* dengan aliran fluida. **Gete** dan **Evan** (2003) dalam penelitiannya menunjukkan struktur turbulensi *boundary layer*, dalam hal ini *velocity shape factor* ( $H$ ) dan *turbulence intensity* ( $Tu$ ) sangat dipengaruhi oleh adanya *wake* pada *upstream*. Bila di dalam *boundary layer* yang telah "terkontaminasi" oleh adanya *wake* tersebut, maka interaksi antara struktur ini dengan *incoming boundary layer* akan berbeda dibandingkan bila *incoming boundary layer*-nya tanpa adanya "kontaminasi".

**Venas dan Saeiran** (1999) menyimpulkan bahwa separasi pada *obstacle* segitiga terjadi pada puncak *obstacle*. Hal ini dikarenakan pada puncak *obstacle* terjadi perubahan sudut yang tajam sehingga *boundary layer* menjadi tidak kontinu dan mengakibatkan aliran terseparasi. Hasil penelitian Venas dan Saeiran menunjukkan terjadinya percepatan aliran *freestream* di atas daerah separasi mulai dari  $\frac{x}{H} = 0$  sampai  $\frac{x}{H} = 3$  dan setelah itu terjadi perlambatan. Letak titik *reattachment* terjadi pada jarak  $\frac{x}{H} = 9.7$  dibelakang *obstacle*.

Berdasarkan penelitian – penelitian terdahulu maka muncul pemikiran untuk melakukan suatu kajian tentang struktur turbulensi *boundary layer* pada aliran *backward-facing step* dengan pengaruh penambahan *obstacle* segitiga atau disebut *triangular bump*. Sepengatahuan penulis, sampai saat ini belum pernah ada kajian tentang pengaruh penambahan *obstacle* pada aliran *backward-facing step*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Aliran pada *backward-facing step* dimulai lapisan batas *upstream* terpisahkan pada tepi ujung *backward-facing step* karena terjadi penurunan tekanan yang berkembang menjadi *shear layer* yang tipis. Struktur turbulen pada daerah *shear layer* ini meningkat menyebabkan pembentukan resikulasi kecepatan rendah dan sehingga memberikan *pressure drop* pada daerah tersebut. Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan oleh **Driver dan Seegmiller** (1985) dengan ekspansi rasio (ER) = 1.125 dan bilangan Reynolds 37500 dapat membuat panjang *reattachment* 6.26 lebih kecil dibandingkan dengan beberapa eksperimen lainnya. Hasil simulasi yang dilakukan oleh **Kim dkk** (2005) menyatakan dengan metode *wall treatment non equilibrium wall functions* dan model turbulensi *renormalization group k-ε* (RNG), *realizable k-ε* (RKE) memberikan hasil yang terbaik atau mendekati sama dengan hasil eksperimen.

**Sutardi dan Widodo** (2008) menyatakan adanya *obstacle* pada aliran turbulen memberikan peningkatan *turbulence intensity* (Tu). Meningkatnya *turbulence intensity* diharapkan memberikan pengaruh pada aliran setelah melewati *obstacle* menjadi lebih turbulen, sehingga aliran yang terseparasi pada *backward-*

*facing step* memiliki lokasi *reattachment* lebih pendek pada daerah *downstream*. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi aliran *backward-facing step* pada  $Er = 1.125$ , metode *wall treatment non equilibrium wall functions* dan model turbulensi *realizable  $k-\epsilon$*  (RKE) yang divariasikan dengan penambahan *triangular bump*.

### 1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang diambil dalam penelitian ini agar dapat memperjelas ruang lingkup dan analisa adalah sebagai berikut:

1. Aliran di dalam *backward-facing step* diasumsikan *steady* dan *incompressible*.
2. Aliran yang masuk dari *inlet* diasumsikan *uniform*.
3. Model turbulensi yang digunakan adalah *realizable  $k-\epsilon$*  (RKE)
4. Pemodelan menggunakan simulasi numerik dengan perangkat lunak CFD komersial.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. Tujuan umum:
  - Mengetahui fenomena separasi aliran pada *backward-facing step* dengan variasi penambahan *triangular bump*.
2. Tujuan khusus:

Mengetahui karakteristik aliran yang melewati *backward-facing step* secara kualitatif dan kuantitatif.

  - a. Secara kuantitatif
    - *Pressure distribution coefficient* ( $C_p$ ) dan *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) pada daerah *downstream*
    - Grafik vektor kecepatan di beberapa titik daerah *downstream*
    - Panjang *reattachment*

- Nilai *Shape factor*
- b. Secara kualitatif (visualisasi aliran)
  - *Velocity vector* dan *velocity pathline* pada daerah *separation bubble*
  - Kontur tekanan dan kontur kecepatan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diinginkan dari penelitian ini antara lain:

1. Mampu mengetahui efek yang muncul dari penambahan *triangular bump* terhadap panjang *reattachment* pada *backward-facing step*.
2. Mampu mengetahui efek yang muncul dari penambahan *triangular bump* terhadap daerah resikulasi.
3. Mampu mengetahui jarak penambahan *triangular bump* yang optimum untuk mereduksi panjang *reattachment*.

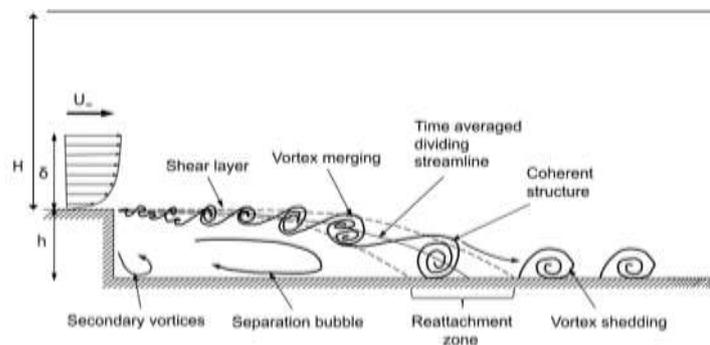
## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Backward-Facing Step*

Aliran pada *Backward-Facing Step* (BFS) merupakan aliran yang kompleks dan melibatkan berbagai mekanisme ketidakstabilan. Beberapa hal yang umum terjadi pada aliran *backward facing step* dapat diilustrasikan dalam Gambar 2.1. Geometri *backward-facing step* terdiri dari saluran *inlet* dengan tinggi ( $H$ ) dan diperluas pada sisi bagian bawah sebesar ketinggian *facing step* ( $h$ ). Dalam *backward facing step* terdapat 1 parameter non dimensi disebut ekspansi rasio, yaitu

$$Er = \frac{(H+h)}{H}.$$



Gambar 2.1 Karakteristik aliran di dalam *backward-facing step* (Driver dkk, 1987)

Berdasarkan Gambar 2.1, **Driver dkk** (1987) mempelajari bahwa aliran *backward-facing step* dapat dibagi menjadi 3 wilayah utama yaitu : wilayah *shear layer*, *separation bubble* atau wilayah *recirculation*, dan daerah *reattachment*. Karakteristik umum dari aliran *backward-facing step* dimulai lapisan batas *upstream* terpisahkan pada tepi ujung *backward-facing step* karena terjadi penurunan tekanan yang berkembang menjadi *shear layer* yang tipis. Dalam perjalanan aliran *downstream*, ukuran dari *shear layer* mengalami perkembangan hasil penggabungan dari struktur turbulente yang terdapat di dalam aliran ini. Wilayah dimana *shear layer* terjadi perkembangan di sebut daerah *shear layer* seperti ditunjukkan Gambar 2.1. Struktur turbulente pada daerah *shear layer* ini meningkat menjadi aliran *irrotational* yang menyebabkan pembentukan resirkulasi kecepatan rendah pada daerah antara *shear layer* dengan dinding yang berdekatan.

Daerah resikulasi kecepatan ini terdiri dari *vortex* utama atau *separation bubble* dan *vortex* sekunder yang berdekatan dengan ujung sudut bawah *facing step* seperti ditunjukkan Gambar 2.1.

Penurunan tekanan yang terjadi pada aliran ini mengakibatkan *shear layer* bergerak turun membentuk kurva menuju dinding bagian bawah dan menimpa pada suatu titik yang disebut titik *reattachment*. Jarak horizontal antara bagian bawah *facing step* dengan titik *reattachment* didefinisikan sebagai panjang *reattachment*. Menurut **Eaton** dan **Johnston** (1982) karena *osilasi* dengan frekuensi rendah yang terjadi pada *shear layer* memberikan pergerakan titik *reattachment* sehingga panjang *reattachment* menjadi tidak stabil yang disebut *flapping* dari *shear layer*. Akibat dari *flapping shear layer* tersebut, titik *reattachment* menyebar dalam rentang tertentu sepanjang jarak *streamwise* yang disebut daerah *reattachment*. **Eaton** dan **Johnston** (1982) yang pertama mengusulkan hubungan antara *osilasi* frekuensi rendah dengan *flapping shear layer*. Mereka mempelajari sumber *osilasi* frekuensi rendah pada aliran *backward-facing step* dengan menggunakan *hot-wires* dan *thermal tuft probes*. Hasil dari penelitian menunjukkan gangguan ini disebabkan *fluktuasi* pada arah vertikal secara periodik dari *reattaching shear layer*. Dengan kata lain *flapping shear layer* terjadi akibat dari *fluktuasi* pada titik *reattachment* karena ketidak seimbangan aliran dalam daerah resikulasi.

Daerah resikulasi merupakan daerah disebelah *facing step* yang dibatasi *reattaching shear layer* pada bagian atas dan oleh dinding bawah. Karena kehadiran *vortex* di dalam *separated shear layer* sehingga menciptakan tekanan yang rendah dan memicu resikulasi. Daerah resikulasi ini juga dapat disebut sebagai *separation bubble* dimana didominasi utama oleh *vortex* dua dimensi yang besar (*primary vortex*) dan memiliki kecepatan resikulasi rendah. Selain *primary vortex* yang terbentuk, terlihat juga *vortex* sekunder yang terletak pada bagian ujung bawah *facing step*. Ilustrasi yang menggambarkan daerah resikulasi dapat dilihat pada Gambar 2.1

Beberapa literatur dahulu sulit menggambarkan daerah resikulasi dikarenakan keterbatasan alat pengukuran. *Hot wire* dan tabung pitot merupakan instrumentasi yang umum digunakan pada percobaan awal dalam pengukuran sifat

aliran, namun kedua instrumentasi ini tidak sensitif dan tidak akurat dalam pengukuran aliran yang sangat turbulenta. Selanjutnya dengan perkembangan instrumentasi pengukuran, *Laser Doppler Anemometer* dan *Particle Image Velometry* (PIV) merupakan instrumentasi baru yang dapat melakukan pengukuran di daerah resirkulasi. **Scrano dkk** (1999) menggunakan metode PIV dalam pengukuran daerah resirkulasi pada *backward-facing step*. Mereka mengusulkan *steamline* aliran pada pusaran utama di sebelah *facing step* memanjang dari ujung tepi *facing step* ke titik *reattachment* sedangkan pusat rotasi dari *vortex* sekunder tetap di dekat sebelah sudut bawah *facing step*. Dalam percobaan yang dilakukan oleh **Spazzini dkk** (2001), mereka mengamati bahwa *vortex* sekunder di dalam daerah sirkulasi mengalami perubahan dalam bentuk dan ukuran secara siklus periodik. Selama siklus ini, *vortex* sekunder terlihat bertambah besar setinggi *facing step* dan kemudian memecah menjadi dalam ukuran lebih kecil. **Spazzini dkk** (2001) percaya pada siklus perubahan ukuran dan bentuk *vortex* sekunder dengan gerakan *flapping shear layer* merupakan dua hal yang berbeda.

Ketika ketiga daerah di dalam *backward-facing step* dapat dirubah atau dikendalikan, maka *drag*, kebisingan dan getaran dapat dikurangi seperti yang diinginkan. Oleh karena itu penting untuk memahami sifat aliran untuk dapat mengontrol dinamika aliran. Dalam penelitian sebelumnya, panjang *reattachment* menjadi parameter utama yang penting untuk memahami karakteristik aliran *backward facing step*. Beberapa penelitian mempelajari hubungan panjang *reattachment* dengan ekspansi rasio dan bilangan Reynolds.

## 2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait dengan aliran pada *backward-facing step* telah dilakukan sebelumnya seperti terlihat dalam Tabel 2.1

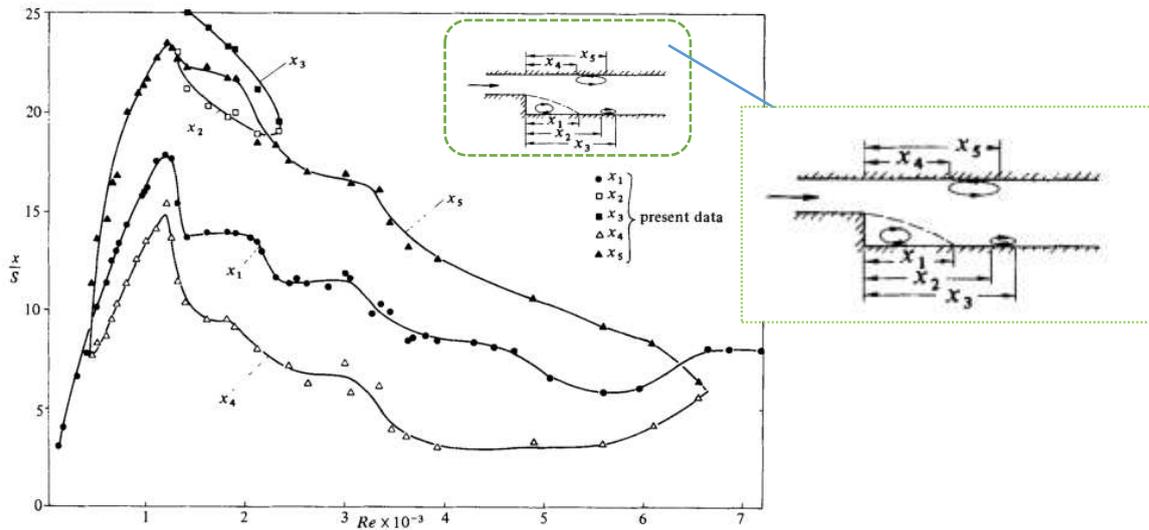
**Tabel 2.1 Data hasil penelitian terdahulu**

No.	Nama Peneliti	Tahun	Metode	Hasil Penelitian
1	<b>Armaly dkk</b>	1982	Eksperimental	- Terbentuk daerah sirkulasi lain pada sisi atas dan samping di Re daerah transisi.

				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pada <math>Re = 6000</math> panjang <i>reattachment</i> <math>(\frac{x_r}{h}) = 8</math>.</li> </ul>
2	<b>Driver dan Seegmiller</b>	1985	Eksperimental dan simulasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semakin besar tinggi <i>outlet</i> maka panjang <i>reattachment</i> semakin besar.</li> <li>- Hasil simulasi dengan model turbulen ASM modifikasi lebih memberikan hasil yang mendekati hasil <i>eksperimental</i></li> </ul>
3	<b>Lee dan Mateesu</b>	1997	Eksperimental dan studi numerik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alat ukur MHFS dapat mengukur panjang <i>reattachment</i> dengan baik sesuai dengan hasil numerik.</li> <li>- Panjang <math>x_r</math> mengalami kenaikan sebanding dengan kenaikan <math>Re</math> untuk <math>Re \leq 1200</math>.</li> </ul>
4	<b>Venas dan Saetran</b>	1999	Eksperimental	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separasi pada <i>obstacle</i> segitiga terjadi pada puncak <i>obstacle</i> karena terjadi perubahan sudut yang tajam sehingga <i>boundary layer</i> menjadi tidak kontinu dan mengakibatkan aliran terseparasi</li> <li>- Panjang <i>reattachment</i> <math>x/h = 9.7</math> dibelakang <i>obstacle</i></li> </ul>
5	<b>Kim dkk</b>	2005	Studi numerik CFD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasil simulasi menunjukkan turbulen model paling baik memprediksikan panjang <i>reattachment</i> adalah RNG dan RKE dengan <i>wall treatment non-equilibrium</i> dibandingkan model turbulen dan <i>wall treatment</i> yang lainnya</li> </ul>

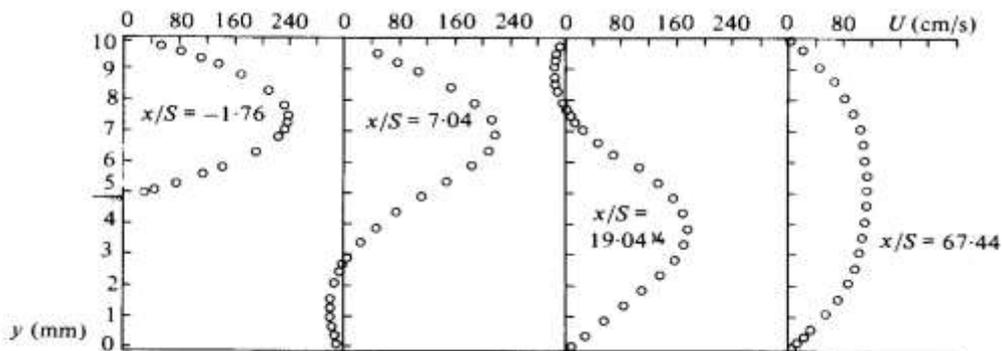
6	<b>Sutardi dan Widodo</b>	2008	Eksperimental dan studi numerik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separasi <i>massive</i> pada <i>obstacle</i> terjadi akibat momentum aliran tidak mampu mengatasi <i>adverse pressure gradient</i> dan tegangan geser antara permukaan <i>obstacle</i> dengan aliran fluida.</li> <li>- Titik <i>reattachment</i> semakin dekat dengan bertambahnya nilai Re</li> <li>- Lokasi titik - titik <b>reattachment</b> yang didapat dari hasil simulasi numerik lebih jauh dibandingkan dari hasil eksperimen.</li> </ul>
---	---------------------------	------	---------------------------------	--

**Armaly dkk (1982)** dalam jurnalnya “*Experimental and Theoretical Investigation of Backward-facing Step Flow*” melakukan eksperimental pada aliran *backward-facing step* dengan pengukuran menggunakan metode *Laser Doppler* untuk memprediksi titik *reattachment* dan distribusi kecepatan. Penelitian ini dilakukan pada aliran laminar, transisi dan turbulente dengan  $Re = 70$  sampai 8000. Dari hasil pengukuran menggunakan *Laser Doppler* menunjukkan tidak hanya resirkulasi utama yang terbentuk pada sisi bawah namun terdapat kondisi dimana daerah sirkulasi kedua dan ketiga terbentuk pada bagian atas dan dinding samping. Kondisi ini belum pernah terekam dari penelitian sebelumnya. Pengukuran panjang *reattachment point* ( $X_1$ ) terhadap variasi bilangan Reynolds ditunjukkan pada Gambar 2.2. Dari Gambar 2.2 dapat diidentifikasi menjadi 3 daerah yaitu daerah aliran laminar ( $Re < 1200$ ), daerah aliran transisi ( $1200 < Re < 6600$ ) dan daerah aliran turbulente ( $Re > 6600$ ). Panjang *reattachment* ( $X_1$ ) dalam daerah laminar mengalami peningkatan dengan meningkatnya bilangan Reynolds hingga pada bilangan Reynolds 1200. Perubahan panjang *reattachment* selanjutnya terjadi secara *fluktuasi* hingga bilangan Reynolds 5500 menunjukkan awal transisi menjadi aliran turbulente. Hal ini menunjukkan transisi dari aliran laminar menjadi aliran turbulente ditandai dengan penurunan awal yang kuat pada wilayah separasi.

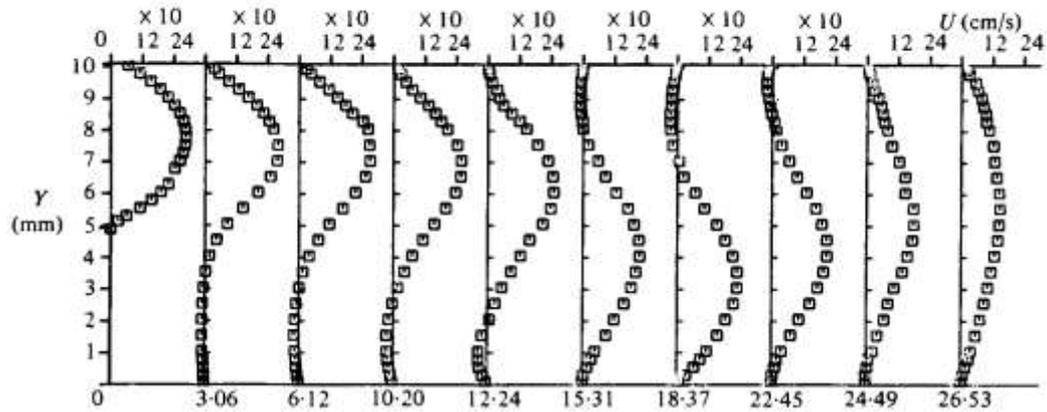


**Gambar 2.2 Letak reattachment pada sisi tengah dari penelitian; variasi letak titik terhadap bilangan Reynolds (Armaly dkk, 1982)**

Sebuah daerah aliran resirkulasi lain terbentuk pada sisi atas dan samping seperti tampak pada Gambar 2.2. Daerah ini sangat tipis sekitar 0,4 mm dan muncul pada bilangan Reynolds aliran transisi. Pada daerah aliran turbulen ( $Re > 6600$ ) memberikan panjang reattachment yang konstan. Dari Gambar 2.2 terlihat pada  $Re = 6000$  nilai panjang reattachment adalah  $X_r/S = 8$ . Detail pengukuran kecepatan pada posisi  $x$  yang berbeda di daerah downstream ditunjukkan pada Gambar 2.3 (a) dan (b).



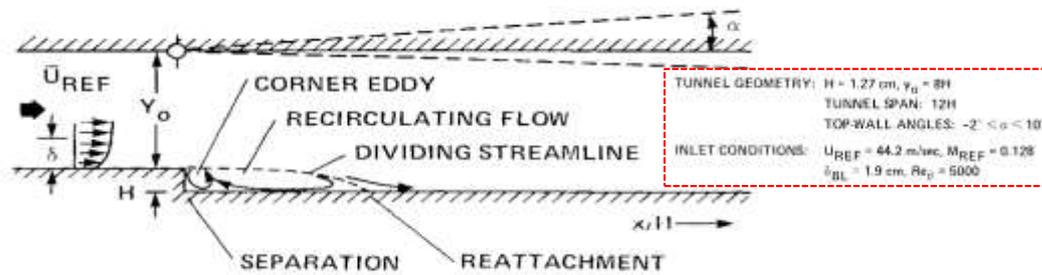
(a)



(b)

Gambar 2.3 (a) Profil kecepatan pada  $Re = 1095$ . (b) Profil kecepatan pada  $Re = 1290$   
(Armaly dkk, 1982)

**Driver** dan **Seegmiller (1985)** dalam penelitiannya berjudul “*Features of Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow*” meneliti secara eksperimental dan pendekatan secara numerik mengenai *backward-facing step* dengan *channel flow* yang berbeda. Dalam *eksperimental* nya, geometri yang digunakan memiliki tinggi *facing step*  $H = 1.27$  cm, tinggi inlet  $Y_0 = 10.1$  cm, lebar 15.1 cm. Pada dinding bagian atas diberi engsel pada jarak 0.6 cm dari titik *facing step* untuk memberikan variasi sudut pada dinding bagian atas (lihat gambar 2.4). Dalam penelitian ini nilai ekspansi rasio ( $ER = 1.125$ ) kecil agar meminimalkan gradien tekanan *freestream* karena *sudden expansion*. Pada daerah *inlet*, kecepatan aliran yaitu 44.2 m/s, *Mach number* 0.128, ketebalan *boundary layer* 1.9 cm dan bilang Reynolds berdasarkan ketebalan momentum ( $Re_\theta$ ) adalah 5000. Untuk numerik dilakukan dengan 2 model turbulente berbeda yaitu  $k-\epsilon$  dan *algebraic-stress* (ASM). Kedua model turbulente ini memberikan hasil *reattachment* yang jauh berbeda dibandingkan dengan hasil eksperimental sehingga dilakukan modifikasi pada persamaan energi dari kedua model turbulente tersebut.

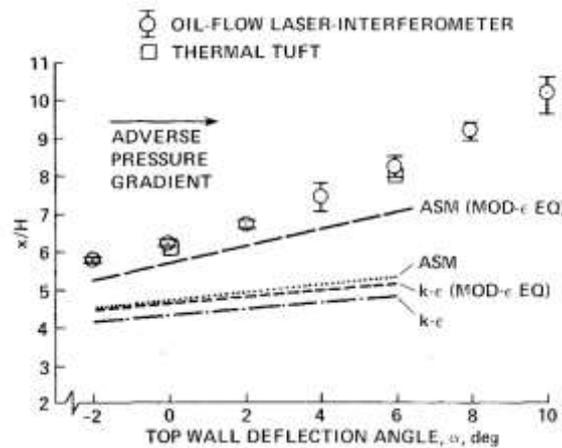


Gambar 2.4 Geometri *backward-facing step* dengan kondisi inlet (Driver dan Seegmiller, 1985)

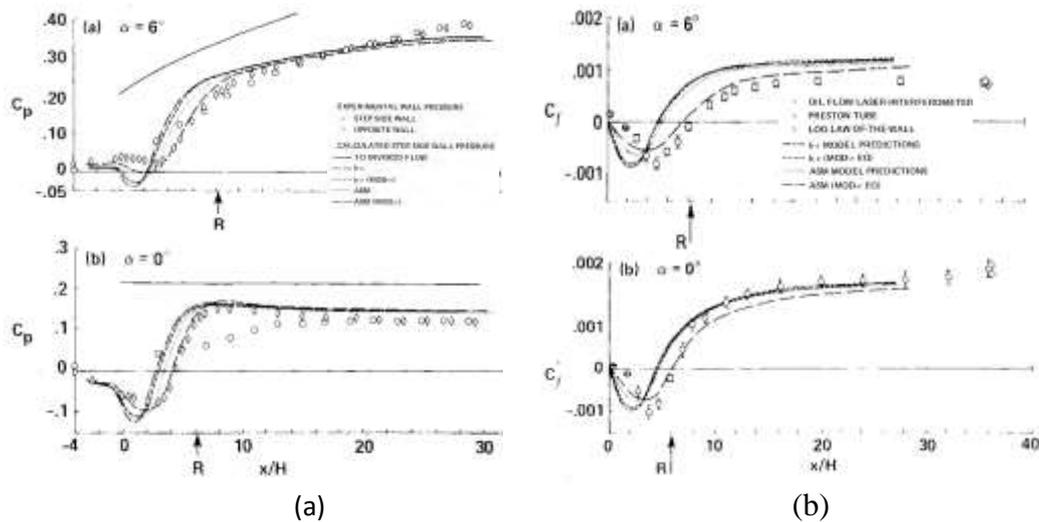
Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh **Driver** dan **Seegmiller** (1985), panjang *reattachment* pada daerah *downstream* dihasilkan dari interpolasi linier *skin-friction* pengukuran dengan *oil-flow laser interferometer*. Gambar 2.5 menunjukkan panjang *reattachment* lebih besar sebanding dengan perubahan sudut elevasi dinding atas. Lokasi titik *reattachment* dari pengukuran dengan metode *thermal-tuft* memberikan tren hasil yang sesuai dengan pengukuran *oil-flow laser interferometer*. Hasil simulasi dengan metode turbulensi  $k-\varepsilon$  dan ASM memberikan nilai yang berbeda dibandingkan dengan hasil *eksperimental*, oleh sebab itu dilakukan modifikasi pada kedua model turbulensi ini. Modifikasi pada model turbulensi  $k-\varepsilon$  tidak memberikan peningkatan yang signifikan dibandingkan modifikasi pada model turbulensi ASM yang lebih mendekati dengan hasil *eksperimental*.

Distribusi *static pressure*  $C_p$  pada daerah dinding bawah disajikan pada Gambar 2.6 (a). Data *static pressure* ditampilkan pada sudut dinding atas  $0^\circ$  dan  $6^\circ$ . Dari Gambar 2.6 (a) menunjukkan distribusi tekanan pada jarak  $x/h > 8$  menjadi seragam sepanjang saluran keluar. Pada daerah *reattachment*, distribusi tekanan mengalami perubahan. Untuk kasus dinding atas dibelokkan, perubahan distribusi tekanan daerah *reattachment* lebih curam dibandingkan pada kasus dinding atas tidak dibelokkan. Baik hasil simulasi dengan model turbulensi  $k-\varepsilon$  maupun model turbulensi ASM memberikan tren hasil yang sama dengan *eksperimental*. Pengukuran *skin friction* dengan *oil-flow laser interferometer* ditampilkan pada Gambar 2.6 (b) hasil pengukuran *skin friction* menunjukkan pada daerah resirkulasi, nilai *skin friction* memiliki nilai terbesar mengindikasikan pada daerah tersebut pencampuran energi menghasilkan perubahan kecepatan pada daerah dasar dinding.

Pada dinding atas yang di belokkan nilai *skin friction* lebih kecil dibandingkan pada dinding atas yang tidak di belokkan, hal ini membuat titik *reattachment* lebih jauh. Secara simulasi, hasil dari model turbulensi ASM yang telah dimodifikasi lebih baik dibandingkan ketiga model turbulen lainnya walaupun memiliki tren hasil yang sama dengan eksperimental.



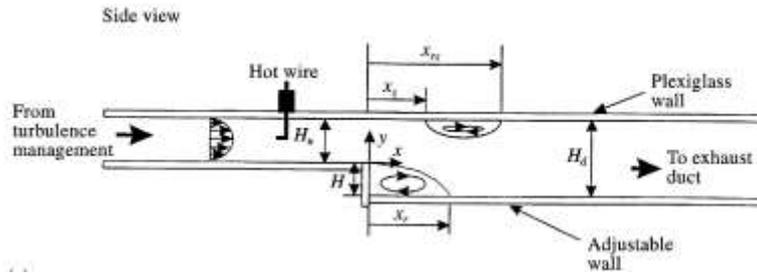
Gambar 2.5 Lokasi titik *reattachment* terhadap perubahan sudut dinding atas (Driver dan Seegmiller, 1985)



Gambar 2.6 (a) Distribusi *pressure coefficient*  $C_p$  (b) Distribusi *skin friction*  $C_f$  (Driver dan Seegmiller, 1985)

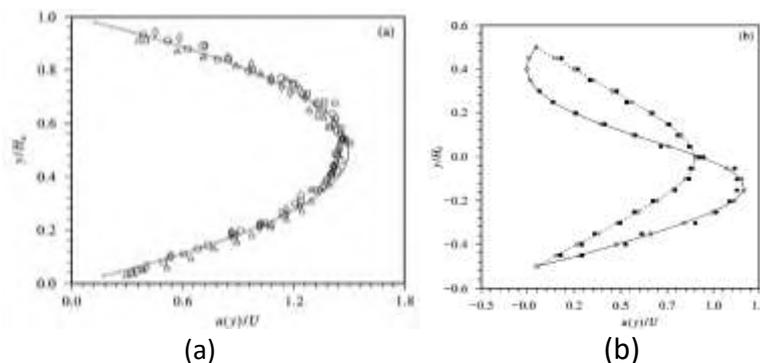
Lee dan Mateesu (1997) dalam jurnalnya “*Experimental and Numerical Investigation of 2-D Backward Facing Step flow*” melakukan studi eksperimental pada aliran *backward-facing step* dengan ekspansi rasio 1.17 dan 2.0 pada bilangan Reynolds  $\leq 3000$ . Penelitian ini dilakukan dengan memasang *hot wire* pada saluran

inlet untuk mengukur bilangan Reynolds yang digunakan dalam hal ini diukur kecepatan aliran dan *Multi-Element Hot-Film Sensor (MHFS) Array* yang digunakan untuk mengukur panjang titik *reattachment* dan letak titik separasi aliran laminar serta transisi *fully developed*. Gambar 2.7 menunjukkan letak *hot wire* dan MHFS dalam eksperimental.



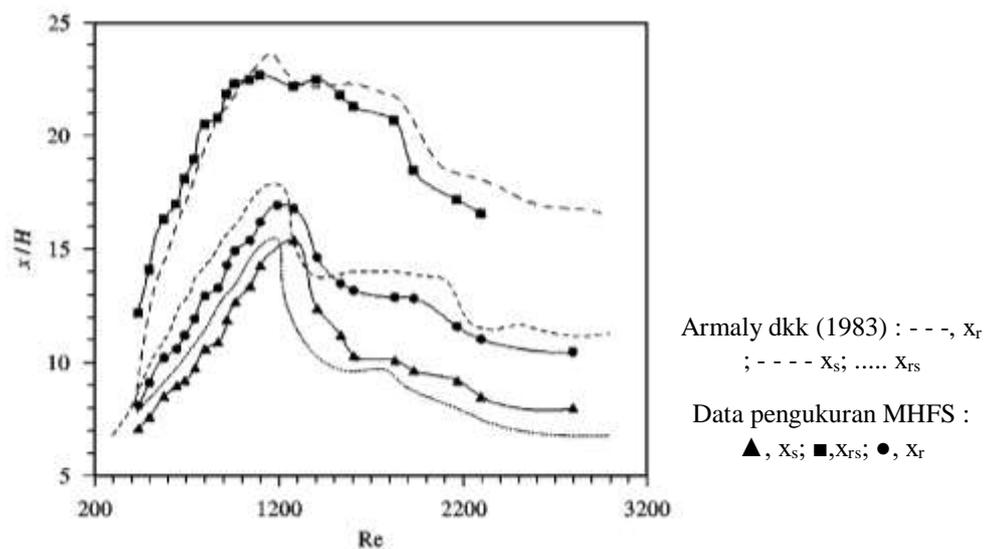
**Gambar 2.7** Skema geometri eksperimental dari aliran *backward-facing step* (Lee dan Mateesu, 1997)

Dalam penelitian ini *hot wire* diletakkan pada  $y = Hu/2$  dan  $x = -5$  cm dan  $x = 45$  cm seperti ditunjukkan Gambar 2.7. Profil kecepatan rata – rata tidak berdimensi ( $\frac{u(y)}{U}$ ) yang diukur oleh *hot wire* untuk nilai ER = 2 dan Re 475, 685, 805, dan 985 disajikan pada Gambar 2.8. Gambar 2.8 (a) menunjukkan profil kecepatan mendekati tren kecepatan aliran laminar *fully developed* dimana kurva deviasi dari kecepatan berbentuk parabola. Hal ini sesuai dengan profil kecepatan aliran laminar secara teori. Gambar 2.8 (b) menunjukkan profil kecepatan  $x = 21$  cm dan 45 cm sesuai dengan hasil dari numerik yang dilakukan oleh **Gartling** (1990).



**Gambar 2.8** Profil kecepatan tak berdimensi untuk bilangan Reynolds yang berbeda (a) di  $x = -0,5$  cm :  $\circ$  Re = 475;  $\square$  Re = 685;  $\triangle$  Re = 805;  $\diamond$  Re = 985; — teori (b) di  $x = 21$  :  $\bullet$  hasil pengukuran *hot wire* pada Re=805; — hasil prediksi simulasi pada Re = 800;  $\circ$  Gartling (1990) untuk Re = 800 dan 41 cm :  $\blacksquare$  hasil pengukuran *hot wire* untuk Re = 805; - - -, hasil prediksi simulasi pada Re = 800;  $\square$  Gartling (1990) pada Re = 800. (Lee dan Mateesu, 1997)

Hasil pengukuran memberikan data letak separasi aliran dan titik pada bagian atas dan bawah dinding ( $x_r$ ,  $x_{rs}$ ,  $x_s$  dan  $x_{rs} - x_s$ ) yang diukur dengan MHFS pada ekspansi rasio 2 ditunjukkan Gambar 2.9. Dari Gambar 2.9 panjang  $x_r$  pada bagian bawah dinding mengalami kenaikan sebanding dengan kenaikan bilangan Reynolds. Karena penurunan tekanan terbentuk oleh *sudden expansion*, daerah resikulasi ( $x_{rs} - x_s$ ) teramati pada bagian atas dinding dengan kondisi awal meningkat lalu turun seiring kenaikan bilangan Reynolds. Panjang *reattachment*  $x_r$  mulai mengalami penurunan saat bilangan Reynolds pada daerah transisi hal ini sesuai dengan hasil eksperimental yang dilakukan **Armaly dkk** (1982).



**Gambar 2.9** Variasi jarak *reattachment* dan titik *separation* dan panjang daerah resikulasi pada dinding atas dan bawah terhadap bilangan Reynolds untuk  $ER = 2$  (Lee dan Mateesu, 1997)

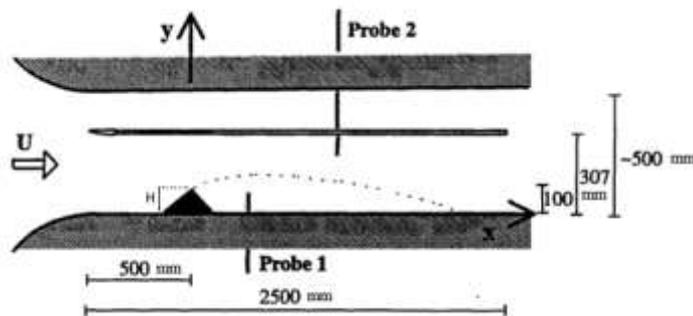
Hasil eksperimental yang diukur oleh MHFS pada  $ER = 2$  dibandingkan dengan hasil eksperimental dari **Armaly** (1983) serta hasil numerik yang dilakukan oleh **Gartling** (1990); **kim** dan **moin** (1985) dan **sohn** (1988) disajikan pada Tabel 2.2. Dari hasil perbandingan nilai panjang *reattachment*  $x_r$ , perbedaan antara hasil MHFS dengan yang lain kurang lebih sekitar 7%.

**Tabel 2.2 Perbandingan panjang *reattachment* antara hasil eksperimental dan simulasi (Lee dan Mattesu, 1997)**

Length on		Experimental results			Computed results*		
		Present MHFS data†	LDV data (Armaly <i>et al.</i> 1983)‡	Present prediction	Gartling's prediction (1990)	Kim & Moin (1985)	Sohn (1988)
Lower wall	$x_r$	6.45	7.0	6.0	6.1	6.0	5.8
	$x_s$	5.15	5.7	4.80	4.85	—	—
Upper wall	$x_{rs}$	10.25	10.0	10.30	10.48	—	—
	$x_{rs} - x_s$	5.1	4.3	5.50	5.63	5.75	4.63

\*ER = 2 and Re = 800; †ER = 2 and Re = 805; ‡ER = 1.94 and Re = 800

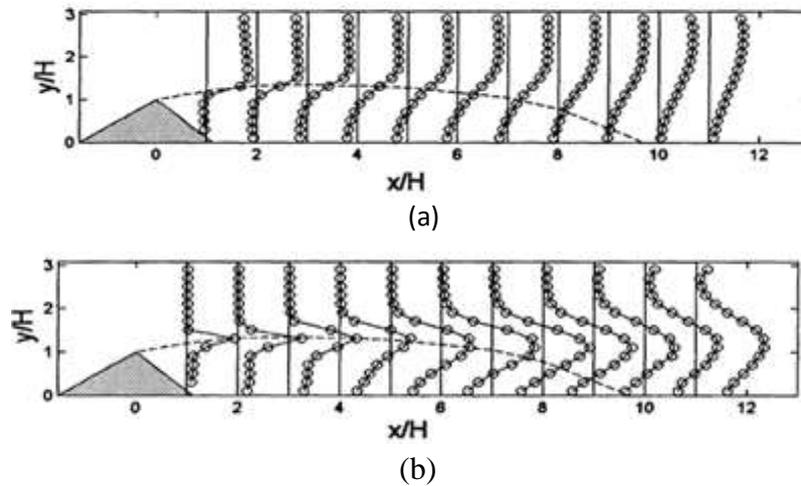
Venas dan Saetran (1999), dalam penelitiannya “*Space – Time Correlation in Separated Flow Behind A Surface Mounted Obstacle*” melakukan penelitian secara eksperimental aliran saat mengenai *obstacle* berbentuk segitiga pada pelat datar. Penelitian ini dilakukan pada penampang berukuran 1 m x 0.5 m yang dihubungkan dengan *wind tunnel* pada salah satu sisinya. Sebuah pelat *splitter* dengan panjang 2.5 m dan tebal 15 mm dipasang pada jarak 307 mm di atas pelat *section tes* seperti Gambar 2.10. Geometri *obstacle* segitiga dipasang pada pelat *section tes* dengan ketinggian H = 100 mm dan berjarak 500 mm dari sisi masuk.



**Gambar 2.10 Skema dari ukuran geometri *wind tunnel* (Venas dan Saetran, 1999)**

Kecepatan referensi diukur menggunakan tabung pitot yang di tempatkan pada bagian *upstream* dari pelat *splitter*. Kecepatan referensi merupakan kecepatan rata – rata bagian tengah antara ujung segitiga dengan pelat *splitter* sisi bagian bawah. Kecepatan referensi ini yaitu 4.2 m/s dan memberikan bilangan Reynolds yaitu  $2.8 \times 10^4$ . *Pulse hot wire anemometry* adalah alat ukur yang digunakan untuk mengetahui daerah aliran yang berbalik, sedangkan *conventional constant*

teperature hot wire anemometer (CTA) digunakan untuk mengetahui *instensity turbulence* bagian dasar.



**Gambar 2.11 (a) Distribusi kecepatan rata – rata (b) *Turbulence normal stress* (Venas dan SaeTRAN, 1999)**

Dari penelitian yang dilakukan **Venas dan SaeTRAN (1999)**, didapatkan profil kecepatan rata – rata dan *turbulence normal stress* pada beberapa titik posisi sepanjang aliran fluida. Gambar 2.11 (a) menunjukkan profil kecepatan rata – rata dengan skala  $\Delta x/h = 1$  sesuai dengan  $u/U_{ref} = 1.5$ . Pada Gambar 2.11 (a) juga disajikan garis yang menunjukkan daerah separasi dan kecepatan balik (*back flow*) rata-rata yang sangat dekat dengan permukaan. Gambar 2.11 (a) menunjukkan terjadi percepatan aliran *freestream* di atas daerah separasi mulai dari  $x/H = 0$  sampai  $x/H = 3$  dan setelah itu terjadi perlambatan. Diketahui titik *reattachment* terjadi pada  $x/H = 9.7$  hal ini mendekati seperti hasil referensi yaitu  $x/H = 9.8$ .

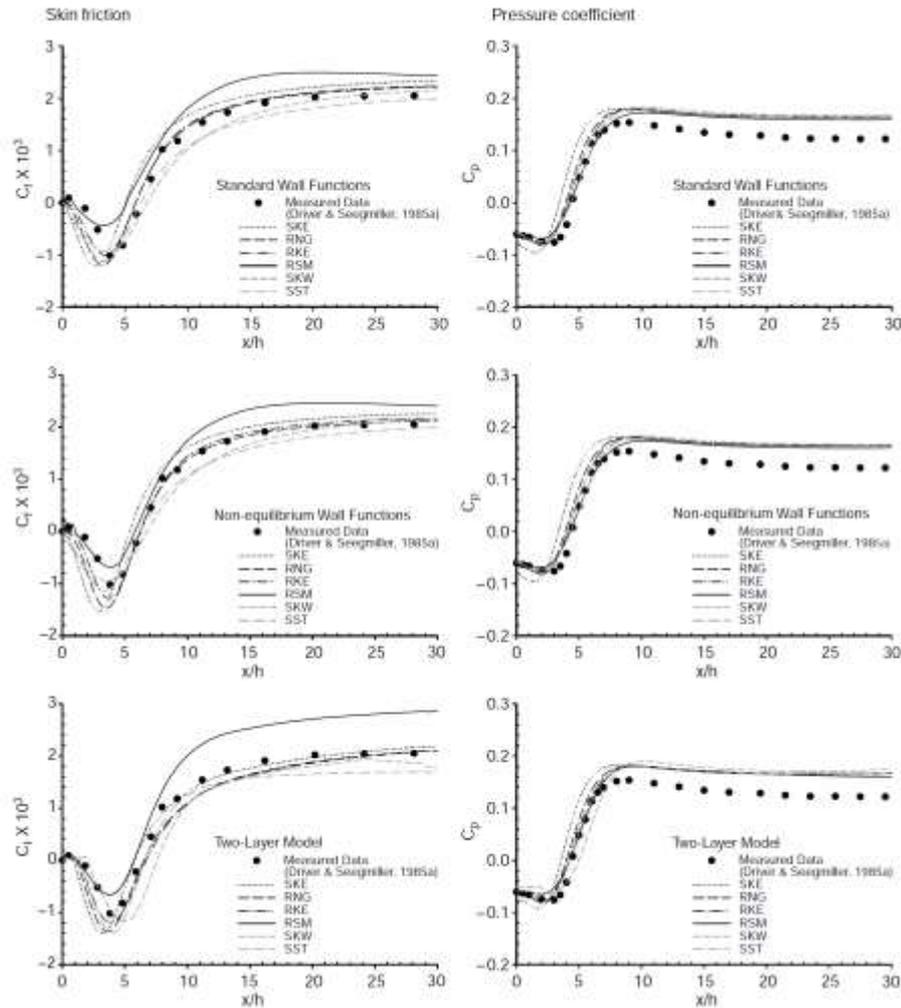
Gambar 2.11 (b) menunjukkan *turbulence normal stress* ( $\overline{u'u'}$ / $U_{ref}^2$ ) dengan skala  $\Delta x/h = 1$  sesuai dengan  $\overline{u'u'}/U_{ref}^2 = 0.05$ . Dari Gambar 2.11 (b) didapatkan karakteristik utama adalah tingkat *turbulence* memiliki nilai maksimum pada sedikit di atas puncak yang meningkat pada daerah *downstream* hingga  $x/H = 7$  lalu terjadi penurunan. Berdasarkan Gambar 2.11 (a) dan (b), bahwa separasi pada *obstacle* segitiga terjadi pada puncak *obstacle*, dikarenakan pada puncak *obstacle* terjadi perubahan sudut yang tajam sehingga *boundary layer* menjadi tidak kontinu dan mengakibatkan aliran terseparasi.

**Kim dkk (2005)** melakukan studi numerik pada aliran *backward-facing step* dengan membandingkan metode *near wall treatment* berbeda dan menggunakan model turbulents yang berbeda. Kim melakukan simulasi dengan bilangan Reynolds 38000 ( $U_\infty = 44.2$  m/s) pada *ekspansi rasio* 1.1 sama seperti yang dilakukan oleh **Driver** dan **seegmiller** (1985). Metode *near wall treatment* yang digunakan yaitu *standard wall functions*, *non-equilibrium wall functions* dan *a two layer model* dan turbulents model yang digunakan yaitu *realizable k- $\epsilon$  (RKE)*, *renormalization group k- $\epsilon$  (RNG)*, *Reynolds stress model (RSM)*, *standard k- $\epsilon$  (SKE)*, *standard k- $\omega$  (SKW)* dan *shear-stress transport k- $\omega$  (SST)*. Jarak inlet yaitu 4h dari ujung *facing step* sedangkan jarak *outlet* yaitu 30h. Tinggi *facing step* yang digunakan  $h = 0.0127$  m.

**Tabel 2.3 Perbandingan panjang *reattachment* (Kim dkk, 2005)**

Turbulence models	Near-wall treatment methods			Measured (1985a)
	Standard wall functions	Non-equilibrium wall functions	Two-layer model	
Reattachment length ( $L_R/h$ ) for $0^\circ$ wall-angle				
SKE	4.9–5.1	5.3–5.5	5.7–5.8	6.26 ± 0.10
RNG	5.7–5.9	6.1–6.3	6.4–6.5	
RKE	5.7–5.9	6.1–6.3	6.6–6.7	
RSM	5.1–5.3	5.7–5.9	5.6–5.7	
SKW		6.7–6.9	7.5–7.6	
SST		6.1–6.3	6.5–6.6	

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan panjang *reattachment* pada model *non-equilibrium wall* dengan turbulents model RNG dan RKE memberikan nilai eror paling kecil yaitu 2,4% dibandingkan dengan hasil eksperimental, sedangkan turbulents model RSM memberikan nilai eror paling besar yaitu 22%. Pada model *two layer* untuk turbulents model RNG memberikan eror paling kecil sekitar 3,0% sedangkan turbulents model RSM memberikan eror paling besar 16%. Secara keseluruhan nilai panjang *reattachment* disajikan pada Tabel 2.3. Dari Tabel 2.3 menunjukkan turbulents model paling baik memprediksikan panjang *reattachment* adalah RNG dan RKE dengan *wall treatment non-equilibrium* karena nilai erornya paling kecil dibandingkan model turbulents dan *wall treatment* yang lainnya.



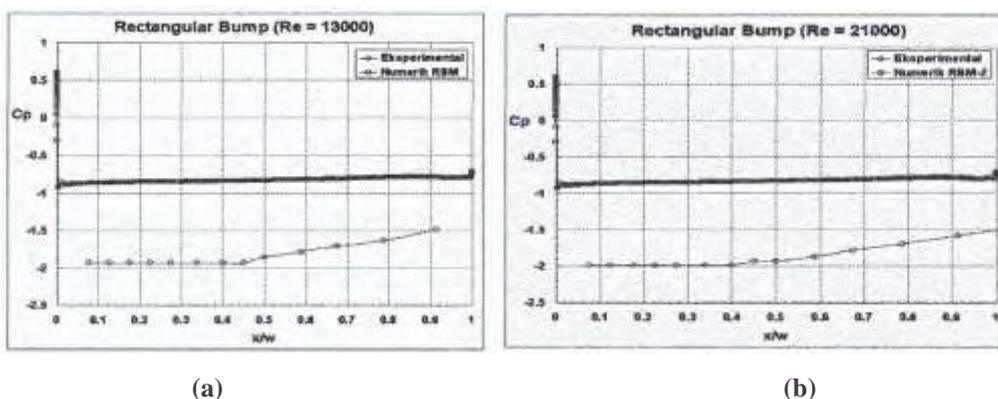
**Gambar 2.12** Perbandingan  $C_p$  dan  $C_f$  untuk model turbulente dan *near wall treatment* yang berbeda (Kim dkk, 2005)

Selain membandingkan panjang *reattachment*, Kim dkk (2005) juga membandingkan nilai *static pressure coefficient* dan *skin-friction coefficient* yang disajikan pada Gambar 2.12. Dari Gambar 2.12 diamati metode *non equilibrium wall functions* memprediksi perbedaan nilai  $C_f$  paling kecil yaitu 31 % pada  $x/h \geq 8$ , namun metode *near wall treatment* memiliki perbedaan nilai  $C_p$  paling kecil yaitu sekitar 7.44% untuk  $x/h \geq 8$ . Untuk model turbulente baik nilai  $C_p$  maupun nilai  $C_f$  dengan model turbulente RNG dan RKE memberikan perbedaan dengan hasil eksperimental sekitar 10%.

Sutardi dan Widodo (2008) melakukan penelitian eksperimental dan secara studi numerik mengenai karakteristik *boundary layer* pada permukaan pelat datar

dengan gangguan *obstacle* berbentuk *rectangular*. *Obstacle* diletakkan secara melintang diatas pelat dengan panjang dan lebar pelat berturut – turut 700 mm dan 310 mm. Lebar dan tinggi *obstacle* yaitu 21 mm dan 42 mm. Parameter yang diukur yaitu kecepatan rata – rata (U), distribusi tekanan (P), dan karakteristik *drag*. Secara studi numerik dilakukan pada 2D dengan menggunakan perangkat lunak Fluent 6.2. Pemodelan numerik menggunakan pendekatan *2D-steady flow turbulent viscous Reynolds Stress Model (RSM)* pada dua bilangan Reynolds yaitu  $1.3 \times 10^4$  dan  $2.1 \times 10^4$ . Untuk *solution control* digunakan *second order* dan *second order upwind*.

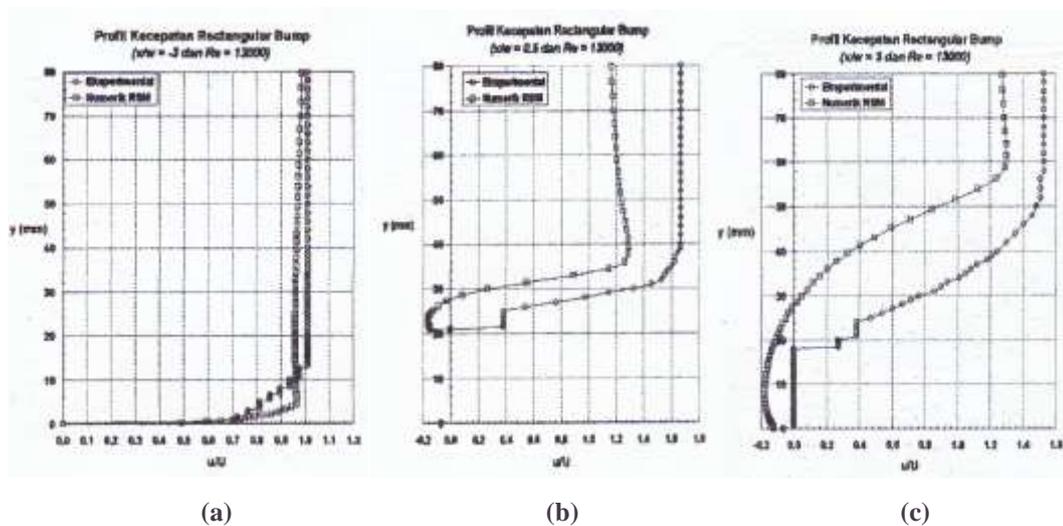
Perbandingan antara distribusi  $C_p$  pada daerah *obstacle* hasil eksperimental dan numerik disajikan pada Gambar 2.13 (a) dan Gambar 2.13 (b). Berdasarkan Gambar 2.13 ditunjukkan harga  $C_p$  hasil simulasi yang sedikit lebih tinggi daripada harga  $C_p$  hasil eksperimen ini diperkirakan disebabkan oleh pemilihan harga kondisi *inlet*, seperti *turbulence length scale* dan *pressure inlet*, yang mungkin kurang sesuai. Pemilihan harga kondisi awal yang kurang sesuai ini lebih terasa pengaruhnya pada harga  $Re$  yang lebih tinggi (Gambar 2.13 (b)).



**Gambar 2.13** Distribusi *static pressure*  $C_p$  pada daerah *obstacle* pada bilangan Reynolds (a)  $Re = 1.3 \times 10^4$  ; (b)  $Re = 2.1 \times 10^4$  (Sutardi dan widodo, 2008)

Selain distribusi nilai  $C_p$ , penelitian ini menunjukkan distribusi kecepatan rata – rata di daerah sebelum *obstacle*, pada *obstacle* dan setelah *obstacle* yang ditunjukkan pada Gambar 2.14. Distribusi kecepatan hanya ditampilkan dalam  $Re = 1.3 \times 10^4$  sedangkan pada  $Re 2.1 \times 10^4$  memiliki nilai yang sama. Dari Gambar 2.14 distribusi kecepatan hasil eksperimental dan hasil numerik memiliki tren yang sama walaupun pada *obstacle* nilai kedua hasil tersebut berbeda. Hasil yang kurang

memuaskan dari simulasi yaitu pada lokasi titik *reattachment* yang menunjukkan tidak terjadi perbedaan untuk dua harga  $Re$  yang berbeda. Untuk hasil secara eksperimental, titik *reattachment* pada  $Re$  yang lebih tinggi terletak pada lokasi di dekat *obstacle* dibandingkan lokasi titik *reattachment* pada  $Re$  yang lebih rendah.



Gambar 2.14 Profil kecepatan ( $u/U$ ) pada berbagai posisi (a)  $x/w = -3$ ; (b)  $x/w = 0.5$ ; dan (c)  $x/w = 3$ , pada bilangan Reynolds  $1.3 \times 10^4$  (Sutardi dan widodo, 2008)

### 2.3 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika *fluida*, dimana bilangan ini menyatakan perbandingan rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous*. Bilangan Reynolds yang tinggi ( $>2300$ ) menunjukkan dalam sebuah aliran didominasi oleh gaya inersia dibandingkan dengan gaya *viscous*-nya, sedangkan apabila dalam sebuah aliran gaya *viscous* lebih mendominasi dibandingkan dengan gaya inersianya, maka bilangan Reynolds yang terbentuk cukup rendah ( $<1$ ). Sehingga bilangan Reynolds merupakan salah satu indikasi terjadinya aliran, semakin besar bilangan Reynolds maka aliran akan semakin turbulen dengan ilustrasi pada Gambar 2.15.

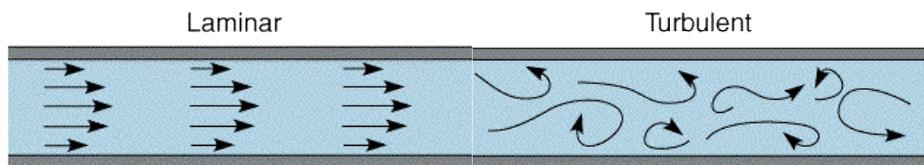
Aliran *fluida*, berdasarkan besarnya bilangan Reynolds dibedakan atas aliran laminar, turbulen, dan aliran transisi. Aliran turbulen mempunyai gerakan partikel-partikel *fluida* yang sangat tidak menentu atau aliran-alirannya tidak terdapat garis edar tertentu yang dapat dilihat, dengan saling tukar menukar momentum dalam arah melintang. Pada saluran terbuka atau plat aliran laminar

terjadi jika  $Re < 500$  dan aliran turbulen terjadi pada  $Re > 1000$ . Untuk kondisi  $500 < Re < 1000$  aliran ini diklasifikasikan sebagai aliran transisi. Bilangan Reynolds pada saluran terbuka diberikan pada Persamaan 2.1

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} \quad 2.1$$

dengan :

$Re$  = bilangan Reynolds                       $U_{\infty}$  = kecepatan aliran (m/s)  
 $\rho$  = *densitas* ( $\text{kg/m}^3$ )                       $L$  = panjang plat  
 $\mu$  = *viskositas kinematis fluida* ( $\text{kg/ms}$ )



Gambar 2.15 Ilustrasi aliran laminar dan turbulen (Fox, 2010)

### 2.3.1 Aliran Laminar

Adalah aliran fluida yang ditunjukkan dengan gerak partikel-partikel fluidanya sejajar dan garis-garis arusnya halus. Dalam aliran laminar, partikel partikel fluida seolah-olah bergerak sepanjang lintasan-lintasan yang halus dan lancar, dengan satu lapisan meluncur secara mulus pada lapisan yang bersebelahan. Sifat kekentalan zat cair berperan penting dalam pembentukan aliran laminar. Aliran laminar bersifat *steady* maksudnya alirannya tetap. “Tetap” menunjukkan bahwa di seluruh aliran air, debit alirannya tetap atau kecepatan aliran tidak berubah menurut waktu. Aliran fluida pada pipa, diawali dengan aliran laminar kemudian pada fase berikutnya aliran berubah menjadi aliran turbulen. Fase antara laminar menjadi turbulen disebut aliran transisi. Aliran laminar mengikuti hukum Newton tentang viskositas yang menghubungkan tegangan geser dengan laju perubahan bentuk sudut. Tetapi pada viskositas yang rendah dan kecepatan yang tinggi aliran laminar tidak stabil dan berubah menjadi aliran turbulen. Bisa diambil kesimpulan mengenai ciri- ciri aliran laminar yaitu: fluida bergerak mengikuti garis lurus,

kecepatan fluidanya rendah, viskositasnya tinggi dan lintasan gerak fluida teratur antara satu dengan yang lain.

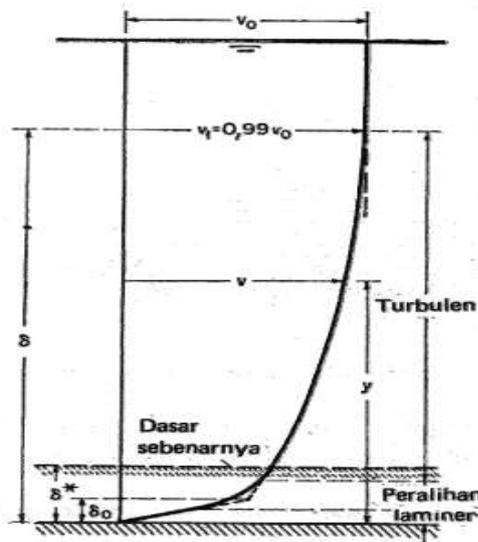
### 2.3.2 Aliran Turbulent

Kecepatan aliran yang relatif besar akan menghasilkan aliran yang tidak laminar melainkan kompleks, lintasan gerak partikel saling tidak teratur antara satu dengan yang lain. Sehingga didapatkan Ciri dari aliran turbulent : tidak adanya keteraturan dalam lintasan fluidanya, aliran banyak bercampur, kecepatan fluida tinggi, panjang skala aliran besar dan viskositasnya rendah. Karakteristik aliran turbulent ditunjukkan oleh terbentuknya pusaran-pusaran dalam aliran, yang menghasilkan percampuran terus menerus antara partikel partikel cairan di seluruh penampang aliran.

### 2.4 Konsep Lapisan Batas (*Boundary Layer*)

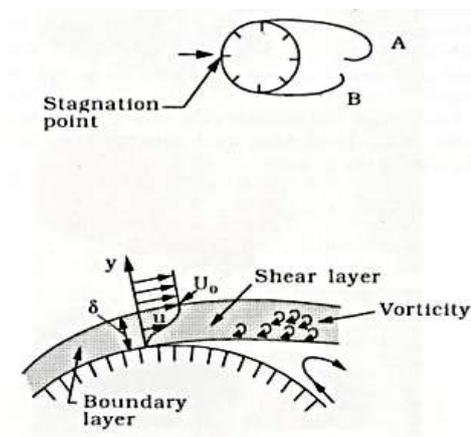
Saat fluida dengan *free stream* mengalir menuju suatu *body*, maka akan terjadi suatu kondisi dimana aliran yang semula kecepatannya *uniform* ( $u_\infty$ ) akan menjadi tidak *uniform* lagi sehingga akan terbentuk distribusi kecepatan (*velocity distribution*) karena pengaruh kontur *body* yang dilewatinya. Distribusi kecepatan ini dimulai dari titik di permukaan *body* tersebut, dimana aliran fluida mempunyai kecepatan nol (*zero velocity*) kemudian akan semakin bertambah besar ketika menjauhi titik di permukaan *body* tersebut dan semakin bertambah besar juga ketika fluida menjauhi permukaan *body* tersebut. Kecepatan *free stream* yang semakin bertambah karena menjauhi permukaan *body* tersebut pada suatu ketika tidak akan lagi bisa mempengaruhi kecepatan aliran fluida, yaitu dimana pengaruh tegangan geser akan hilang pada posisi tertentu dan kecepatan fluida mencapai nilai kecepatan fluida *nonviscous* ( $u = 0.99u_\infty$ ) dan posisi tersebut merupakan batas daerah *viscous* dengan daerah *nonviscous*. Efek-efek viskositas akan terkonsentrasi dalam daerah yang disebut dengan *viscous area* yang tidak lain adalah Lapisan Batas (*Boundary Layer*), sedangkan diluar *boundary layer* efek viskositas dapat diabaikan (*non viscous area*). Jarak yang diukur dari permukaan *body* arah normal hingga posisi  $u = 0.99U_\infty$  disebut dengan tebal lapisan batas ( $\delta$ ). Tebal lapisan batas

( $\delta$ ) merupakan besaran jarak yang tegak lurus terhadap permukaan batas dimana kecepatan  $v_1$  sama dengan 99% dari kecepatan batas  $v_0$ , dengan kurva distribusi kecepatan di lapisan batas berbentuk asimtotis, seperti terlihat pada Gambar 2.16 berikut:



Gambar 2.16 Tebal lapisan batas ( $\delta$ ) (Fox, 2010)

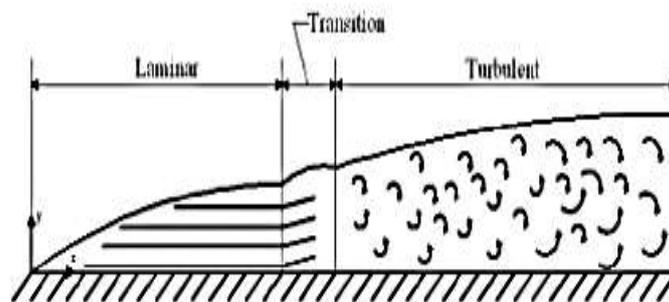
Lapisan Batas (*Boundary Layer*) juga dapat diartikan sebagai suatu lapisan tipis (*layer*) dekat dengan permukaan *body* dimana pada daerah ini terjadi kondisi transisi yaitu kecepatan fluida tidak sama dengan kecepatan *free stream* yang kemudian akan menjadi sama dengan kecepatan *free stream* kembali, seperti terlihat pada Gambar 2.17 berikut:



Gambar 2.17 *Boundary layer* pada silinder (Script)

Lapisan batas terbagi menjadi tiga daerah yakni lapisan batas laminer, daerah transisi, dan lapisan batas turbulen. Pada lapisan batas laminer, aliran atau lapisan fluida (*fluid layers*) bergerak secara halus antara satu sama lainnya atau dengan kata lain lapisan batas laminer memiliki *streamline* yang saling sejajar satu sama lainnya. Pengaruh gesekan (tegangan geser) yang timbul akibat *velocity gradient* yang diakibatkan oleh viskositas fluida itu sendiri, sehingga perpindahan massa dan momentum antara aliran fluida terjadi dalam tingkat molekular saja. Sedangkan pada lapisan batas turbulen, gerakan molekul fluida yang acak menyebabkan terjadinya fluktuasi kecepatan (baik pada arah sejajar maupun tegak lurus terhadap aliran). Fluktuasi kecepatan pada arah tegak lurus aliran menyebabkan perpindahan massa dan momentum terjadi dalam jumlah yang sangat besar antar lapisan fluida. Hal inilah yang menyebabkan tegangan geser pada lapisan batas turbulen lebih besar jika dibandingkan dengan lapisan batas laminer. Dengan kata lain tegangan geser di dalam lapisan batas turbulen tidak hanya dipengaruhi oleh viskositas fluida (viskositas fluida berharga konstan di seluruh medan aliran fluida) melainkan oleh *Reynolds Shear Stresses*. *Reynolds Shear Stresses* atau *Turbulent Stresses* sendiri merupakan besaran yang menunjukkan fluktuasi kecepatan molekul fluida.

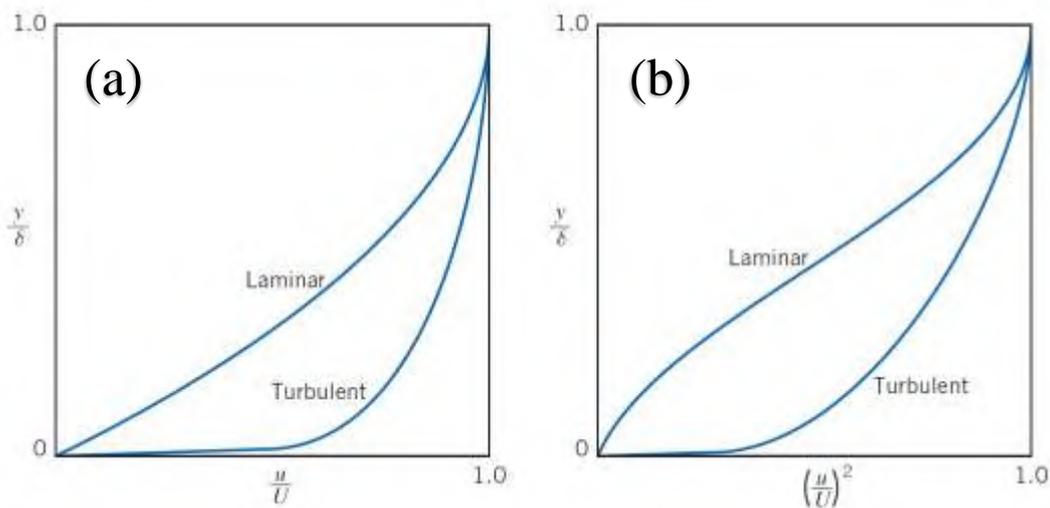
Selain lapisan batas laminer dan turbulen, terdapat kondisi dimana aliran fluida mengalami proses peralihan dari aliran laminer ke turbulen, kondisi inilah yang disebut sebagai keadaan transisi (daerah transisi). Faktor yang mempengaruhi lamanya proses transisi adalah *gradien* tekanan, kekasaran permukaan, gaya *body* dan gangguan aliran bebas.



**Gambar 2.18 Profil lapisan batas laminer, daerah transisi dan lapisan batas turbulen di dalam lapisan batas pada plat datar (Google)**

Sebagai contoh, Gambar 2.18 diatas menunjukkan profil lapisan batas laminar, daerah transisi dan lapisan batas turbulnt di dalam sebuah lapisan batas pada plat datar.

Profil kecepatan *non dimensional* dari *boundary layer* aliran laminar dan turbulnt saat melewati bidang pelat datar ditunjukkan Gambar 2.19 (a). Dari gambar 2.19 (a) menunjukkan profil kecepatan untuk aliran turbulnt lebih tumpul dibandingkan dengan profil kecepatan aliran laminar. Pada kecepatan *freestream* yang sama, momentum fluks dalam *boundary layer* aliran turbulnt lebih besar dibandingkan pada *boundary layer* aliran laminar seperti ditunjukkan Gambar 2.19 (b). *Separation* terjadi ketika momentum lapisan fluida dekat permukaan berkurang menjadi nol oleh aksi gabungan dari tekanan dan kekuatan kental. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 9.19 (b), momentum fluida dekat permukaan secara signifikan lebih besar untuk profil aliran turbulnt. Akibatnya, lapisan turbulnt lebih mampu menahan *separation* dalam *gradient* tekanan yang merugikan.



**Gambar 2.19 (a) Profil kecepatan (b) Profil momentum flux (Fox, 2010)**

*Gradient* tekanan yang merugikan menyebabkan perubahan yang signifikan dalam profil kecepatan untuk *boundary layer* aliran laminar dan turbulnt. perkiraan solusi untuk *gradient* tekanan tidak nol dapat diperoleh dari persamaan integral momentum :

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{d}{dx}(U^2\theta) + \delta^* \frac{dU}{dx} \quad 2.2$$

Persamaan 2.2 dapat diuraikan menjadi seperti berikut :

$$\frac{\tau_W}{\rho} = U^2 \frac{d\theta}{dx} + (\delta^* + 2\theta)U \frac{dU}{dx}$$

atau

$$\frac{\tau_W}{\rho U^2} = \frac{C_f}{2} = \frac{d\theta}{dx} + (H + 2) \frac{\theta}{U} \frac{dU}{dx} \quad 2.3$$

Dimana  $H = \frac{\delta^*}{\theta}$  adalah profil kecepatan “*Shape Factor*”. *Shape Factor* merupakan peningkatan *gradient* tekanan yang merugikan. Untuk *boundary layer* aliran turbulenta, nilai H meningkat dari 1.3 untuk *gradient* tekanan nol sampai sekitar 2,5 pada *separation*. Untuk aliran Laminar dengan *gradient* tekanan nol,  $H = 2.6$  dan *separation*  $H = 3.5$ .

## 2.5 Pemodelan Numerik

### 2.5.1 Computational Fluid Dynamics

*Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan perangkat analisa sistem dengan melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, momentum, perpindahan energi, dan fenomena aliran lain didasarkan simulasi dengan bantuan komputer. CFD hakikatnya adalah perangkat *software* menggunakan *finite volume method* dengan memperlakukan fluida menjadi banyak volume kecil dan melalui algoritma tertentu untuk menyelesaikan persamaan *Navier-Stokes*. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju aliran massa (*mass flow rate*) [Ikhwan, 2000].

Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida, perpindahan panas dan perpindahan massa untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence* model, spesifikasi parameter dan *grid generation*) kemudian, *solver*, dan *postprocessing* (*visualization* dan *data treatment*).

Pada dasarnya, permodelan numerik merupakan sebuah metode untuk menyelesaikan sebuah kasus dengan pendekatan dari iterasi terhadap

persamaan-persamaan yang berlaku. Pada kasus studi aliran dan perpindahan panas pemodelan numerik dilakukan dengan berlandaskan pada persamaan konservasi massa, momentum fluida, dan persamaan energi.

Persamaan konservasi massa berdasar pada prinsip fisika dasar, yaitu massa adalah kekal. Pada benda kerja berupa fluida, konservasi massa dapat diartikan jumlah massa fluida yang masuk sama dengan jumlah massa fluida yang keluar. Persamaan konservasi massa ini dapat dijabarkan [User guide CFD]:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz &= -\frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz) \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) &= 0 \end{aligned} \quad 2.4$$

Persamaan momentum fluida berdasar pada hukum kedua Newton, yaitu gaya dari sebuah benda merupakan perkalian antara massa dengan percepatan benda. Pada pemodelan numerik persamaan momentum ini menentukan besar kecepatan dan percepatan tiap partikel dari fluida. Persamaan momentum fluida ini dapat dijabarkan dalam koordinat kartesian sebagai berikut [User guide CFD]:

$$\begin{aligned} \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad 2.5$$

Karena adanya perbedaan temperatur pada setiap titik di dalam sistem, maka diperlukan sebuah persamaan tambahan untuk menjabarkan perubahan

temperatur yang terjadi. Pada *computational fluid dynamics*, persamaan ini dikenal dengan *energy equation* dan dapat dijabarkan [User guide CFD]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \\ \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zx})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad 2.6$$

## 2.5.2 Persamaan Dasar dan Model Turbulensi

Persamaan *Reynolds Average Navier Stokes* (RANS), *Incompressible* dapat dinyatakan dalam notasi tensor cartesian berikut [Goren dkk, 2010]:

$$\begin{aligned} \frac{\delta U_i}{\delta x_i} = 0 \\ \rho \frac{\delta U_i}{\delta t} + \rho \frac{\delta (U_j U_i)}{\delta x_j} = - \frac{\delta P}{\delta x_i} + \frac{\delta}{\delta x_j} (2\mu S_{ij} - \rho U'_i U'_j) \end{aligned} \quad 2.7$$

dengan  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $U$ ,  $P$ ,  $U'$  merupakan densitas fluida, viskositas molekuler, kecepatan rata-rata, tekanan statis rata-rata dan kecepatan yang berfluktuasi.

Model turbulensi *Spalart-Allmaras* (SA) merupakan salah satu persamaan paling populer dari *eddy-viscosity* berdasarkan model turbulensi pada beberapa tahun ini. Model membutuhkan solusi penambahan persamaan *transport* untuk kuantitas yang merupakan bentuk modifikasi dari viskositas kinematik turbulen. Perhitungan rotasi dan regangan tensor untuk istilah produksi yang dikombinasikan. Versi modifikasi yang digunakan dalam penelitian ini akan memberikan hasil perhitungan *eddy-viscosity* dekat inti *vortex*. Model *Reynold number* rendah S-A dan fungsi damping untuk viskositas turbulen, produksi turbulen dan disipasi. Sehingga membutuhkan distribusi *mesh* yang sangat baik didaerah dekat dinding.

Model turbulensi *Realizable k- $\mathcal{E}$*  (RKE) merupakan versi perbaikan Standard *k- $\mathcal{E}$* . Aplikasi dari model ini membutuhkan solusi 2 penambahan

persamaan *transport* untuk energi kinetik turbulen dan disipasi turbulen. Dalam rangka memberikan pendekatan fisik pada  $C_\mu$  konstan. Saat ini istilah viskositas turbulen sebagai koefisien *closure*. Selanjutnya persamaan *transport* yang baru telah dikembangkan untuk disipasi turbulen dengan produksi persamaan fungsional dan disipasi dari disipasi turbulen. RKE cocok untuk model dengan *Reynolds number* yang tinggi sehingga sesuai digunakan untuk jenis aliran turbulen.

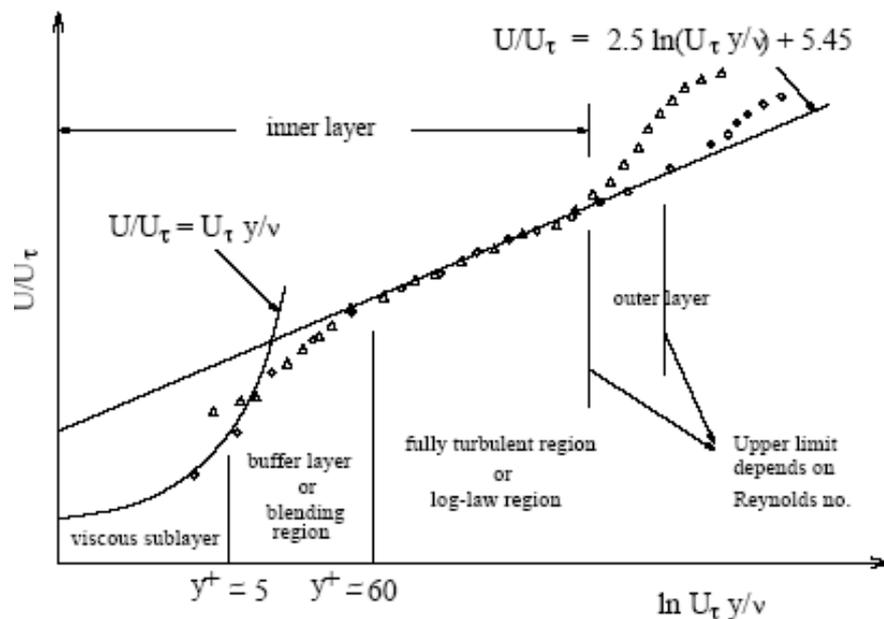
Model turbulensi Wilcox *k- $\omega$*  (WKO) merupakan versi perbaikan dari standard *k- $\omega$* . Seperti versi *standard*, dua persamaan *transport* tambahan untuk energi kinetik turbulen,  $k$  dan disipasi per unit energi kinetik,  $\omega$  dibutuhkan untuk menyelesaikan model ini. Persamaan *transport* untuk *k- $\omega$*  yang dinyatakan sebagai fungsi model WKO yang meningkatkan performa model *standard k- $\omega$*  untuk geseran bebas yang mengalir tanpa pengaruh efek aliran *boundary layer*.

Model turbulensi *Shear Stress Transport k- $\omega$*  (SST) merupakan versi perbaikan lebih lanjut untuk model *standard k- $\omega$* . Kekurangan dari model *standard k- $\omega$*  yang kurang sensitif pada kondisi batas *free stream* untuk aliran tanpa geseran. Modifikasi ini disebabkan model baru menunjukkan *standard k- $\omega$*  untuk aliran tanpa geseran yang tidak memberikan sensitivitas dari model *standard k- $\omega$*  untuk kondisi batas *free stream*. Model SST juga termasuk definisi baru dari viskositas eddy untuk meningkatkan kemampuan prediksi dari model *standard k- $\omega$*  untuk aliran *boundary layer* dengan *adverse pressure gradient*. Kedua model SST dan WKO dapat diintegrasikan melalui *viscous sub-layer* dan keduanya tidak termasuk spesial korelasi *viscous* untuk daerah dekat dinding [Goren dkk,2010].

### 2.5.3 Daerah Dekat Dinding (*Near Wall Region*)

Daerah dekat dinding (*near-wall region*) memiliki pengaruh sangat besar dalam ketelitian hasil simulasi. Pemodelan yang akurat di dekat dinding merupakan hal yang penting untuk aplikasi teknik karena perkiraan penurunan

tekanan (*pressure drop*), separasi aliran, lapisan batas bergantung kepada kebenaran prediksi gaya geser lokal pada dinding tersebut. Selain karena dinding memberikan pengaruh yang signifikan terhadap aliran turbulen. Juga karena perubahan karakteristik aliran yang paling menonjol terjadi pada daerah dekat dinding. Gambar 2.20 menunjukkan pembagian daerah dekat dinding pada suatu aliran [User guide CFD].



**Gambar 2.20** Pembagian daerah dekat dinding (User guide CFD).

Daerah dekat dinding (*near wall region*) dapat dibagi menjadi 3 lapisan, yaitu:

- Daerah *viscous sublayer* (lapisan paling dalam), dimana aliran hampir seluruhnya laminar dan viskositas (molekular) memegang peranan penting pada perubahan momentum dan perpindahan panas atau massa. Berada pada  $y^+ < 5$ .
- Daerah *buffer layer* atau *blending* (terletak diantara lapisan *viscous sublayer* dan *log-law*), dimana pengaruh viskositas molekuler dan turbulensi sama-sama memegang peranan penting, profil kecepatan gabungan dari laminar dan turbulen. Berada pada  $5 < y^+ < 60$ .

- c. Daerah *log-law* (lapisan paling luar) atau lapisan penuh turbulen (*fully turbulent layer*), dimana turbulensi memegang peranan utama sehingga profil kecepatan seluruhnya turbulen. Berada pada  $60 < y^+ < 300$ .

Dimana  $y^+$  adalah bilangan tak berdimensi yang mewakili jarak dari dinding terhadap titik tengah (*centroid*) *cell* pertama dari *mesh*.  $y^+$  dapat dihitung dengan persamaan [User guide CFD]:

$$y^+ = \frac{U_\tau y}{\nu} \quad 2.8$$

dengan :

$U_\tau$  = *local velocity* (kecepatan fluida di dekat dinding)

$y$  = jarak antara *cell* pertama dan dinding

$\nu$  = viskositas kinematis fluida

Model turbulensi  $K-\varepsilon$  dan RSM pada dasarnya cukup akurat untuk aliran turbulen pada daerah yang jauh dari dinding, tetapi tidak dapat memprediksikan perilaku aliran di dekat dinding dengan akurat, oleh karena itu diperlukan *treatment* tambahan untuk membuat kedua model tersebut lebih akurat untuk memprediksikan perilaku aliran dekat dinding, terutama pada aliran yang sangat terpengaruh oleh dinding (*wall-bonded flow*) [User guide CFD]. Pada FLUENT, terdapat 3 macam *near wall treatment*, yaitu:

1. *Standard Wall Functions*
2. *Non-Equilibrium Wall Functions*
3. *Enhanced Wall Treatment*

Pada dasarnya, fungsi dinding (*wall function*) merupakan suatu kumpulan aturan atau persamaan yang berfungsi sebagai kondisi batas untuk momentum, energi, dan besaran turbulen yang dibutuhkan pada model [User guide CFD].

➤ **Pilihan *Wall Function***

1. Standard dan *non-equilibrium wall function* terdiri dari sekumpulan persamaan yang didesain untuk aliran dengan *Re* tinggi.
2. *Mesh* di dekat dinding relatif kasar.
3. Daerah dekat dinding yang terpengaruh viskositas tidak dipecahkan.
4. Informasi pada masing-masing sel dihubungkan oleh suatu fungsi dinding yang diturunkan secara empiris.

➤ **Pilihan *Enhanced Wall Treatment***

1. Model ini mengkombinasikan penggunaan *enhanced wall function* dan model *two-layer*.
2. Digunakan untuk aliran dengan *Re* rendah atau aliran dengan fenomena aliran di dekat dinding yang kompleks.
3. Pada umumnya membutuhkan *mesh* yang sangat halus pada daerah dekat dinding.
4. Model turbulensi dimodifikasi untuk lapisan bagian dalam (lapisan yang terpengaruh oleh adanya dinding)

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan analisa dan simulasi *CFD* mengenai pengaruh penambahan *triangular bump* pada aliran *backward-facing step* terhadap daerah resikulasi, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, antara lain sebagai berikut:

1. Studi kasus

Permasalahan pada aliran *backward-facing step* yang memberikan penurunan tekanan di daerah resikulasi mengakibatkan kerugian energi.

2. Studi pustaka

Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi pustaka yang berkaitan dengan proses aliran *backward-facing step*, simulasi pada *backward-facing step*. Studi literatur diperoleh dari *e-book*, jurnal, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik permasalahan.

3. Pengumpulan dan pengolahan data aktual

Sebelum melakukan penelitian, diperlukan adanya data acuan dalam proses analisa dan pemodelan untuk simulasi dari sistem yang akan ditinjau, sehingga dilakukan pengumpulan data aktual sebagai data primer yang kemudian data tersebut diolah untuk mendapatkan nilai *input* yang akan digunakan proses simulasi *backward-facing step*. Data aktual yang digunakan adalah desain, dimensi, bilangan *Reynolds* yang digunakan.

4. Pemodelan dan simulasi

Tahapan ini diawali dengan *pre-processing* dengan bantuan perangkat lunak *CFD* komersial. Setelah domain dibuat selanjutnya diekspor dan dilakukan *processing* berupa proses simulasi dari *domain* sistem. Simulasi dilakukan dengan variasi jarak penambahan *triangular bump* terhadap ujung *facing step* dan variasi ketinggian *triangular bump*. Pada akhir simulasi, dilakukan *post-processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa grafik nilai  $C_p$

dan nilai  $C_f$ , distribusi vektor kecepatan, nilai *shape factor* dan panjang *reattachment*.

5. Pengolahan dan analisa data hasil simulasi

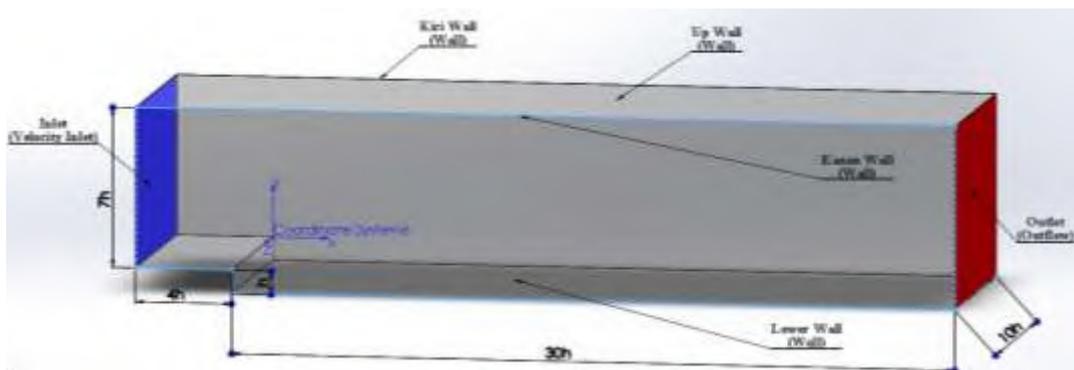
Setelah proses simulasi selesai, dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk data *visual* untuk dianalisa secara *kualitatif*, dan juga diolah dalam bentuk tabel dan grafik sehingga dapat dianalisa secara *kuantitatif*. Dari kedua parameter tersebut, dapat dibahas fenomena dan karakteristik aliran pada daerah resikulasi, panjang *reattachment*, profil kecepatan pada jarak tertentu, nilai intensitas turbulensi dan distribusi nilai  $C_p$  dan  $C_f$ .

6. Penyusunan laporan

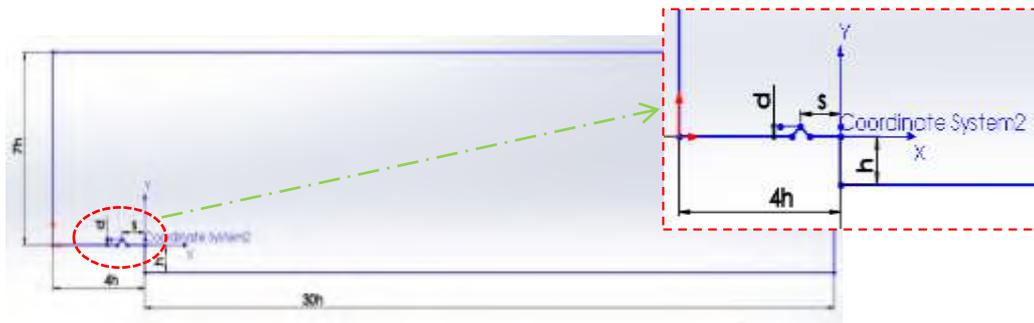
Keseluruhan tahapan yang telah dilakukan dan hasil dari penelitian yang telah dibahas, kemudian disusun dalam bentuk laporan tesis yang sistematis.

### 3.2 Data

Sebelum melakukan simulasi *backward-facing step*, diperlukan data yang digunakan sebagai acuan dalam pembuatan domain dan pengaturan nilai kondisi batas. Dalam proses analisa karakteristik aliran dilakukan pemodelan *backward-facing step* 3 dimensi. Gambar 3.1 (a) menunjukkan geometri *backward-facing step* tanpa *triangular bump* dan (b) dengan penambahan *triangular bump*. Sedangkan Tabel 3.1 menunjukkan dimensi pemodelan *backward-facing step* yang disimulasikan. Dalam studi numerik ini, digunakan data dari penelitian sebelumnya **Driver dan Seigmiller (1985)**.



(a)



(b)

**Gambar 3.1 Geometri pemodelan backward-facing step**

**(a) Tanpa penambahan triangular bump, (b) Penambahan triangular bump**

Pada penambahan *triangular bump*, digunakan *equilateral triangle bump*. Berdasarkan penelitian **Venas** dan **Saetran** (1999) letak titik *reattachment* aliran saat mengenai *obstacle* segitiga yang selanjutnya disebut *triangular bump*, berada pada jarak  $\frac{x}{d} = 9.7$  dimana  $d$  adalah tinggi *bump* (Gambar 3.1 (b)). Pemberian *bump* pada daerah *upstream* sebelum *facing step* diharapkan meningkatkan *turbulence intensity*, sehingga aliran menjadi lebih turbulenta sebelum mengenai ujung *facing step*. Aliran yang semakin turbulenta ini diharapkan dapat mengurangi panjang *reattachment* pada daerah *downstream*.

Untuk mengetahui aliran manakah yang dapat memberikan panjang *reattachment* paling kecil maka dilakukan variasi jarak *bump* terhadap *facing step* dan tinggi *bump*. Dilakukan 4 variasi jarak *bump* terhadap tinggi segitiga yaitu  $\frac{s}{d} = 7, 10, 15$  dan  $20$ . Variasi pertama diberikan agar aliran sebelum terpecah pada ujung *facing step* belum *reattach* akibat adanya *bump*. Variasi kedua diberikan agar aliran yang terpecah pada ujung *facing step* tepat *reattach* akibat adanya *bump*. Untuk variasi 3 dan 4 diberikan agar aliran jauh *reattach* lebih dahulu sebelum terpecah pada ujung *facing step*.

Variasi tinggi segitiga dilakukan terhadap tinggi *step* ( $h$ ) yaitu  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan  $0.1$ . Karena variasi jarak *bump* dibandingkan terhadap tinggi segitiga, maka variasi jarak *bump* terhadap tinggi *step* yaitu  $\frac{s}{h} = 0.35; 0.5; 0.75; \text{ dan } 1.0$  untuk

variasi  $\frac{d}{h} = 0.05$ , sedangkan  $\frac{s}{h} = 0.7, 1.0, 1.5$  dan  $2.0$  untuk  $\frac{d}{h} = 0.1$ . Bilangan Reynolds yang akan digunakan dalam dalam penelitian ini yaitu  $3.8 \times 10^4$ .

**Tabel 3.1 Dimensi pemodelan *backward-facing step***

No	Dimensi	Variabel	Nilai (mm)
1	Tinggi <i>backward-facing step</i>	$h$	12.7
2	Jarak inlet dari ujung <i>backward-facing step</i>	$4h$	50.8
3	Jarak outlet dari ujung <i>backward-facing step</i>	$30h$	381.0
4	Tinggi dinding atas <i>inlet</i>	$7h$	88.9
5	Lebar	$10h$	127
6	Tinggi ujung <i>triangular bump</i>	$d_1$	0.635
		$d_2$	1.27
7	Jarak ujung <i>bump</i> ke ujung <i>backward-facing step</i> pada variasi $d_1$	$s_1$	4.445
		$s_2$	6.35
		$s_3$	9.525
		$s_4$	12.7
8	Jarak ujung <i>bump</i> ke ujung <i>facing step</i> pada variasi $d_2$	$s_1$	8.89
		$s_2$	12.7
		$s_3$	19.05
		$s_4$	25.4

### 3.3 Tahapan Pemodelan Numerik

Penelitian ini menggunakan metode numerik dengan perangkat lunak CFD komersial yang akan dilakukan pada tiga tahapan pengerjaan, yaitu *pre-processing* (pemodelan atau pembuatan geometri, penentuan domain, dan pembuatan *meshing*), tahapan *processing* atau *solving*, dan *post-processing* (hasil berupa data kualitatif dan kuantitatif). Tahapan *pre-processing*, *processing* dan *post-processing* menggunakan perangkat lunak CFD komersial.

### 3.3.1 Tahapan *Pre-Processing*

Dalam tahapan ini dilakukan 3 hal, yaitu pembuatan geometri atau model benda yang diinginkan (domain komputasi) dengan menggunakan perangkat lunak komersial, selanjutnya adalah *meshing* atau pemberian grid sesuai dengan tingkat akurasi yang diinginkan dan yang terakhir menentukan kondisi batas yang tepat di setiap batas geometri atau domain. Dari sini dapat dihasilkan suatu domain komputasi yang selanjutnya akan diekspor ke *software* lain untuk dilakukan tahap selanjutnya yaitu *solving* dan *post processing*.

- Geometri dan Pemodelan *Backward-Facing Step*

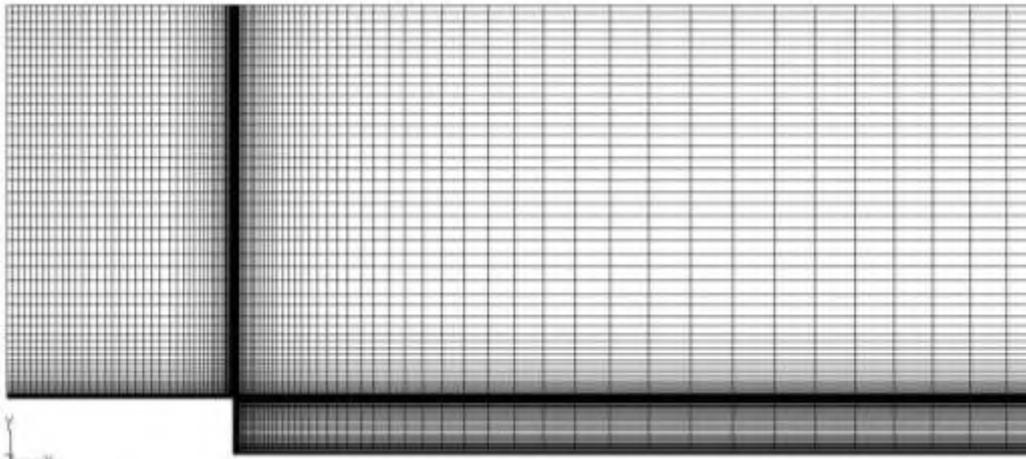
Domain komputasi di buat dengan ukuran seperti yang di lakukan dalam eksperimental **Driver** dan **Seegmiller** (1985) seperti pada Gambar 3.1. Pembuatan geometri dilakukan secara *bottom up* yaitu proses diawali dengan pembuatan sebuah titik (*vortex*). Selanjutnya gabungan dari beberapa titik tersebut dibuat menjadi sebuah garis (*edge*). Setelah itu beberapa garis – garis tersebut di gabungkan menjadi sebuah bidang (*face*) lalu di jadikan *face* volume dengan menggunakan *sweep faces*. Sistem yang digunakan adalah koordinat kartesian dengan pusat koordinat pada bagian pusat geometri.

- *Meshing*

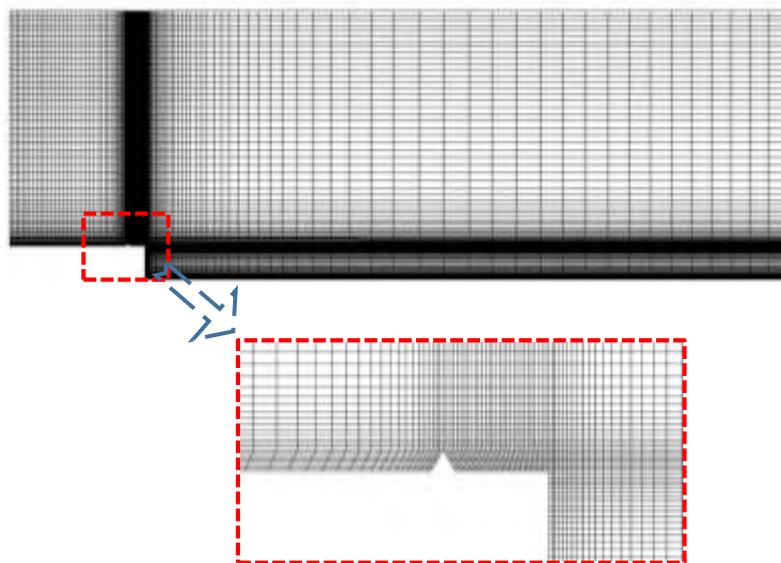
Selanjutnya setelah pembuatan model geometri domain komputasi, dilakukan *meshing* atau pemberian *grid*. *Meshing* atau pemberian *grid* yaitu pembagian daerah domain menjadi bagian – bagian lebih kecil yang tidak tumpang tindih agar dapat dianalisis. *Meshing* pada model akan menentukan keakurasian, kemampuan konvergensi pada saat iterasi perhitungan dan daya komputasi analisis. Kualitas *grid* yang baik akan meningkatkan keakuratan dan kestabilan dalam simulasi. Semakin kecil/halus *mesh* yang dibuat, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, namun dibutuhkan daya komputasi yang makin besar.

Pada proses pembuatan *mesh* terdapat metode *bottom-up* dan *top-down*. Pembuatan *mesh* dilakukan dengan metode *bottom-up*, *mesh* dibuat dari *entri* geometri yang paling rendah, yaitu garis, kemudian bidang dan yang terakhir

adalah volume. Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 merupakan domain yang telah di *mesh*.



Gambar 3.2 Mesh pada geometri *backward-facing step* tanpa *triangular bump*



Gambar 3.3 Mesh pada geometri *backward-facing step* dengan *triangular bump*

Untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat dan *konvergen*, maka diperlukan *mesh* dengan kualitas yang baik pula. Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pembuatan *mesh* antara lain :

1. *Equisize skew* maupun *equiangle skew* tidak melebihi 0,9
2. Meminimalkan perubahan ukuran *mesh* yang ekstrim

- Penentuan kondisi batas

Setelah pembuatan model, langkah selanjutnya adalah penentuan kondisi batas model. Kondisi batas ini diperlukan pada seluruh batas, yaitu batas dinding *shell*, batas dinding *bump*, batas masukan dan batas keluaran. Apabila batas tidak ditentukan, maka fluent akan mendefinisikan bidang sebagai dinding secara otomatis. Kondisi batas yang digunakan adalah *inlet* : *velocity inlet*, *outlet* : *outflow*, dinding : *wall*, dinding *bump* : *wall* lihat Gambar 3.1 Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran pada sisi masuk aliran dengan diasumsikan selalu tetap sepanjang *iterasi* dan *uniform* sepanjang *inlet*. Kondisi batas *outflow* pada sisi keluaran digunakan karena parameter aliran pada keluaran sama sekali tidak diketahui. Kondisi ini dapat digunakan untuk fluida *incompressible* dengan aliran berkembang penuh (*fully developed*).

### 3.3.2 Tahap *Processing* atau *Solver*

Tahap *processing* atau *solver* merupakan langkah inti dalam melakukan simulasi numerik perangkat lunak CFD komersial. Kondisi – kondisi yang telah di tetapkan dalam tahap *pre-processing* akan diproses (*iterasi*) sehingga diperoleh data – data aliran yang diinginkan. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah yaitu sebagai berikut :

#### 1. Mengimpor dan Memeriksa *Mesh*

*Mesh* yang telah di buat harus di buka terlebih dahulu agar dapat melakukan analisis sesuai yang di inginkan. Untuk membuka *mesh* model dilakukan melalui *File => Read => Case*. *File* yang dibuka adalah *file* dengan *ekstensi* \*.*msh*. *Mesh* model yang telah dibuka harus dicek terlebih dahulu. Pengecekan *mesh* dilakukan supaya ketika terjadi kesalahan tidak melanjutkan ke langkah selanjutnya. Proses pengecekan ini dilakukan dengan *Grid => Check*. Apabila terdapat pesan *error* pada konsol atau jika nilai minimum volume adalah negatif, maka *mesh* harus diperbaiki sebelum melanjutkan ke langkah berikutnya

## 2. Konversi Satuan

Pada perangkat lunak komersial simulasi, semua dimensi geometri dianggap dalam satuan meter. Satuan geometri pada perangkat lunak komersial yang digunakan untuk membuat domain dibuat tidak berdimensi sehingga satuan harus di cek diubah melalui *Grid => Scale*.

## 3. Pendefinisian Model (*Solver, Viscous*)

### a. Model *Solver*

Pada pemodelan 3D ini digunakan formulasi *solver pressure based* dan *space 3D*. *Solver pressure based* menyelesaikan persamaan matematis secara bertahap atau terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain. Formulasi kecepatan adalah absolut pada kondisi *steady*. Sedangkan untuk *gradient option* adalah *Green-Gauss Cell Based* dan *Porous Formulation* adalah *Superficial Velocity*.

### b. Model *Viscous*

Model *viscous* yang digunakan pada pemodelan ini adalah model *turbulensi Realizable  $k-\epsilon$*  (RKE) sesuai dengan rujukan yang digunakan dalam penelitian terdahulu **Kim dkk** (2005). Pada model *viscous* poin *non equilibrium wall function* diaktifkan dan *viscous heating* tidak diaktifkan sedangkan untuk *setting* model *constants* dibuat sesuai *default*.

Model *Realizable  $k-\epsilon$*  ini merupakan model yang memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynolds*, konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Pada model ini memiliki dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scale*) ditentukan secara bebas (*independen*). Kelebihan dari model ini adalah lebih akurat memprediksikan laju persebaran fluida dari pancaran jet/nosel. Model ini juga memberikan *performa* yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran dan lapisan batas yang mempunyai *gradient* tekanan besar dan *separasi*.

#### 4. Materials

Tahapan ini merupakan tahapan penentuan jenis material yang digunakan dengan memasukkan *properties* dari material tersebut. Untuk permodelan ini digunakan udara sebagai fluida kerja dengan densitas ( $\rho$ ) : 1,225 kg/m<sup>3</sup> dan *viskositas* ( $\mu$ ) : 1,7894 x 10<sup>-5</sup> kg/m.s.

#### 5. Operating Conditions

Pada tahapan ini ditentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. Umumnya dimasukan kondisi tekanan pada daerah operasi, yaitu pada tekanan 1 atm (101325 Pa).

#### 6. Boundry Conditions

Pendefinisian kondisi batas merupakan salah satu tahap *solver* yang penting. Asumsi yang digunakan harus tepat agar didapatkan hasil simulasi yang mendekati kondisi sebenarnya atau hasil eksperimen. Kondisi batas yang digunakan pada domain komputasi penelitian yaitu pada daerah *inlet* dengan memasukkan besar *velocity magnitude* ( $V_{inlet}$ ) pada bilangan Reynolds tertentu dengan persamaan

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} h}{\mu} \quad (3.1)$$

dimana Re adalah bilangan Reynolds yang digunakan,  $\rho$  dan  $\mu$  berturut – turut adalah *densitas* dan *viskositas* material yang telah di sebutkan sebelumnya,  $U_{\infty}$  adalah *velocity inlet*, dan h adalah tinggi *facing step*.

Berdasarkan Persamaan 3.1, dengan memberikan nilai  $Re = 3.8 \times 10^4$  maka didapatkan hasil perhitungan nilai *velocity inlet* sebagai berikut :

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} h}{\mu}$$
$$U_{\infty} = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot h} = \frac{38000 \times 1.7894 \times 10^{-5}}{1.225 \times 0.0127} = 44.2 \text{ m/s}$$

Dari hasil perhitungan diatas, besar *velocity magnitude* yang dimasukkan pada *boundry condition* adalah 44.2 m/s. Selain itu, pada *boundry condition* juga di tetapkan untuk *specification method turbulence*

di pilih *intensity and length scale*, *turbulent intensity* = 0.5 % dan *turbulent length scale* = 0,005 m.

## 7. Paramater *Solution Control*

Penentuan parameter *solution control* dilakukan dengan *input* sebagai berikut :

- Untuk *equations* adalah *flow, turbulence dan energy*
- *Pressure velocity coupling* dipilih *SIMPLE* karena lebih sesuai digunakan dalam kasus pemodelan yang melibatkan model turbulensi dan kondisi *steady state*. Selain itu, kesesuaian mode *SIMPLE* dengan pemodelan ini juga dikarenakan *SIMPLE* menggunakan hubungan antara koreksi kecepatan dan tekanan untuk memenuhi hukum *konservasi* massa dan untuk mendapatkan bidang tekanan.
- *Under relaxation factors* sesuai dengan *default*. *Under Relaxation factors* merupakan faktor untuk menstabilkan proses iterasi pada *solver segregated*.
- *Pressure* dibuat *second order* untuk *discretization*. Sedangkan momentum, *turbulent kinetic energy*, dan *turbulent dissipation rate* dipilih *second order upwind*. *Discretization* dipilih *second order upwind* karena aliran pada penelitian ini termasuk kompleks dan tipe *meshing* yang digunakan pada penelitian ini adalah *quad map* dimana aliran fluida dapat dipastikan tidak sejajar dengan tipe *grid* tersebut, maka secara umum hasil simulasi akan lebih akurat jika menggunakan *second order discretization*.

## 8. Monitor *Residual*

Tahapan ini merupakan tahapan penyelesaian masalah berupa proses iterasi sampai mencapai kriteria *konvergensi* yang diinginkan. Kriteria *konvergensi* adalah kesalahan/perbedaan antara tebakan awal dan hasil akhir dari iterasi yang dilakukan oleh perangkat lunak CFD komersial pada masing-masing persamaan yang digunakan. Kriteria dan nilai

*residual monitors* yang digunakan dalam simulasi pemodelan ini adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.2 Monitoring residual pemodelan**

No	Residual	Kriteria Konvergen Absolut
1	<i>Continuity</i>	$10^{-6}$
2	<i>x – velocity</i>	$10^{-6}$
3	<i>y – velocity</i>	$10^{-6}$
4	<i>Energy</i>	$10^{-6}$
5	k	$10^{-6}$
6	Epsilon	$10^{-6}$

Kriteria *konvergensi* pada *residual monitors* ditentukan sebesar  $10^{-6}$ . Hal ini bertujuan untuk mendapatkan nilai *konvergensi* yang teliti sehingga dapat memberikan gambaran karakteristik aliran yang cukup detail. Penentuan kriteria *konvergensi* pada *residual monitors* sebesar  $10^{-6}$  juga sesuai untuk karakteristik aliran turbulen dan bentuk meshing yang digunakan pada pemodelan ini.

## 9. Inisialisasi Medan Aliran

Proses iterasi memerlukan inisialisasi (tebakan awal) sebelum memulai perhitungan. Untuk simulasi ini inisialisasi dihitung dari kondisi batas *inlet* yaitu *velocity inlet*.

## 10. Iterasi

Perhitungan atau iterasi dilakukan hingga mendapatkan kondisi perhitungan yang konvergen atau perhitungan yang mendekati nilai kriteria *konvergensi* pada *residual monitors*. Pada sistem koordinat kartesian simulasi pada perangkat lunak CFD komersial digunakan persamaan-persamaan matematis sebagai berikut:

- Kestimbangan Massa

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

- Kestimbangan Momentum

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + X \quad (3.3)$$

- Kestimbangan Energi

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + q + \mu \Phi \quad (3.4)$$

$$\Phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (3.5)$$

Setelah proses *solver* selesai dilakukan maka selanjutnya hasil perhitungan tersebut di simpan dalam bentuk *cas file*.

### 3.3.3 Tahap *Post Processing*

Proses ini merupakan proses akhir dari simulasi. Pada tahapan ini dilakukan *interpretasi* dari hasil simulasi. Hasil simulasi berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif berupa visualisasi aliran meliputi kontur kecepatan, kontur tekanan, *velocity pathline* dan vektor kecepatan pada titik *reattachment*. Data kuantitatif berupa panjang *reattachment*, distribusi  $C_p$  dan  $C_f$ , profil vektor kecepatan di beberapa titik dan perbandingan *shape factor*. Data kuantitatif tersebut akan diolah dengan perangkat lunak *Microsoft Excel 2010* untuk ditampilkan dalam bentuk grafik.

- **Perhitungan Distribusi *Pressure Coefficient* ( $C_p$ )**

*Pressure coefficient* merupakan pembagian dari tekanan statis dibagi dengan tekanan dinamik seperti diuraikan pada persamaan berikut:

$$C_p = \frac{(\rho_c - \rho_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (3.6)$$

dimana  $p_c$  adalah tekanan statis pada *lower wall*,  $p_\infty$  adalah tekanan statis pada *free-stream*, dan  $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$  adalah tekanan dinamik pada *free-stream*.

- **Perhitungan Distribusi *Skin Friction* ( $C_f$ )**

*Skin friction* merupakan hasil perbandingan *wall shear stress* dengan suatu nilai konstan yang dinyatakan dengan persamaan :

$$Cf = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (3.7)$$

dimana  $\tau_w$  adalah *wall shear stress*.

- **Perhitungan Shape Factor (H)**

*Shape factor* atau faktor bentuk adalah perbandingan antara *displacement thickness* dengan *momentum thicknes* yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (3.8)$$

Dimana  $\delta^*$  merupakan *displacement thickness* dan  $\theta$  adalah *momentum thickness* yang dapat di cari dengan persamaan :

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) dy \quad (3.9)$$

$$\theta = \int_0^\delta \frac{u}{u_\infty} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) dy \quad (3.10)$$

Untuk mendapatkan harga *displacment thickness* ( $\delta^*$ ) maupun *momentum thickness* ( $\theta$ ) dapat diselesaikan dengan metoda numerik aturan *Simpson 1/3 segmen berganda* yang dirumuskan pada Persamaan (3.11) berikut:

$$I \cong (b - a) \frac{f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n)}{3n} \quad (3.11)$$

dimana :

- $f(x) = \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)$  untuk menyelesaikan Persamaan 3.9 dan  $f(x) = \frac{u}{u_\infty} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)$  untuk menyelesaikan Persamaan 3.10
- $b = \delta$  dan  $a = 0$  berdasarkan tinggi y
- $f(x_0)$  adalah hasil  $f(x)$  saat  $u$  di  $y = 0$  dan  $f(x_n)$  adalah hasil  $f(x)$  saat  $u$  di  $y = \delta$
- $f(x_i)$  adalah perkalian dari  $f(x)$  data gasal dimana  $i = 1,3,5 \dots n-1$ .
- $f(x_j)$  adalah perkalian dari  $f(x)$  data genap dimana  $j = 2,4,6 \dots n-2$ .
- $n =$  jumlah data.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan bagaimana fenomena yang terjadi pada aliran *backward-facing step* dengan menempatkan pengganggu berupa *triangular bump* pada sisi *upstream* yang akan dijelaskan melalui hasil *post processing* data kuantitatif dan data kualitatif dari simulasi numerik dengan *software* komersial CFD. Data kuantitatif berupa panjang *reattachment*, *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *skin friction* ( $C_f$ ), profil kecepatan ( $\frac{U}{U_\infty}$ ), dan *shape factor* ( $H$ ). Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran (*velocity pathline* dan vektor kecepatan). Pengambilan data kuantitatif dilakukan pada bagian *midspan* sedangkan data kualitatif ditampilkan secara *iso-surface* dengan pemotongan pada arah koordinat XY.

*Pressure coefficient* dan *skin friction* ditampilkan untuk memprediksi perubahan yang terjadi di *lower wall* sisi *downstream*, mulai dari titik *backward-facing step* sampai sisi *outlet*. Profil kecepatan ditampilkan pada beberapa titik *lower wall* sisi *downstream* untuk mengetahui perubahan aliran sebelum dan setelah *reattachment*. *Shape factor* merupakan parameter untuk mengetahui peningkatan turbulensi aliran saat tepat di ujung *backward-facing step* akibat pengaruh *triangular bump*. Kedua hasil *post processing* ini (kuantitatif dan kualitatif) akan saling melengkapi untuk menjelaskan fenomena aliran *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump*.

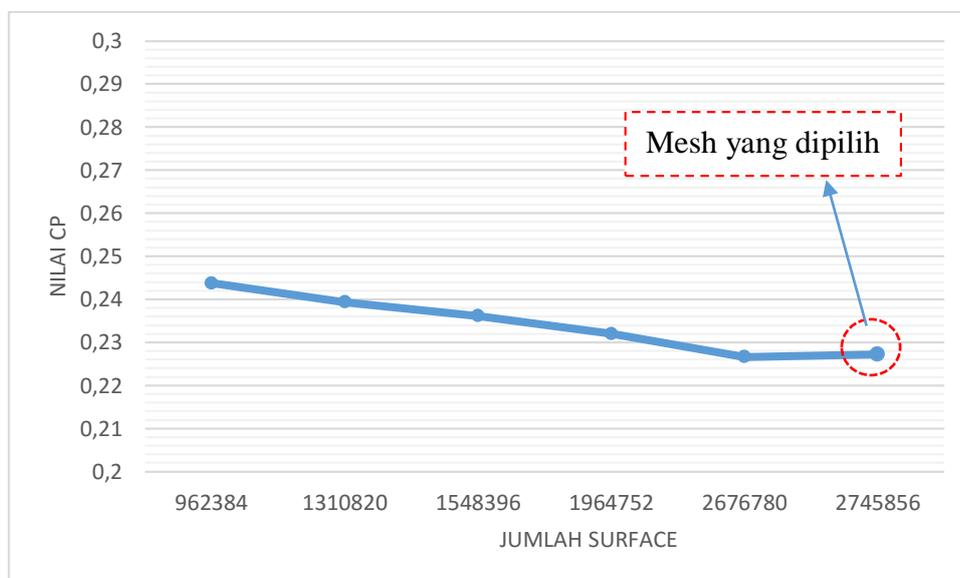
Struktur penulisan pada bab ini diawali dengan pengecekan grid (grid *independency test*) pada beberapa mesh yang telah dibuat. Selanjutnya dijelaskan mengenai posisi dan cara pengambilan data hasil simulasi. Karakteristik aliran pada *backward facing step* tanpa penambahan *triangular bump* dijelaskan pada sub bab berikutnya. Fenomena dan analisa aliran dengan penambahan *triangular bump* pada ketinggian  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan  $\frac{d}{h} = 0.1$  serta pada variasi jarak terhadap ujung *backward-facing step* dibahas melalui data kualitatif dan kuantitatif. Kemudian dilakukan analisa perbandingan fenomena aliran *backward-facing step* antara tanpa penambahan *triangular bump* dengan penambahan *triangular bump*.

#### 4.1 Grid Independence

Grid *independency* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan hasil simulasi dalam *software* komersial CFD yang tidak terpengaruh oleh ukuran *mesh* atau grid. Test ini perlu dilakukan untuk memastikan keakurasian dan kevalidan data dari hasil numerik. Grid *independency* dilakukan dengan menggunakan beberapa variasi *mesh* dalam simulasi, biasanya menggunakan *mesh* yang ukurannya berturut-turut lebih kecil atau lebih halus untuk perhitungannya. Ukuran *mesh* tersebut dapat dijadikan acuan dalam pemodelan yang kita lakukan dengan *software* komersial CFD. Berikut variasi grid yang digunakan serta hasil perhitungannya:

Tabel 4.1 Nilai Cp dan Y<sub>+</sub> tiap mesh

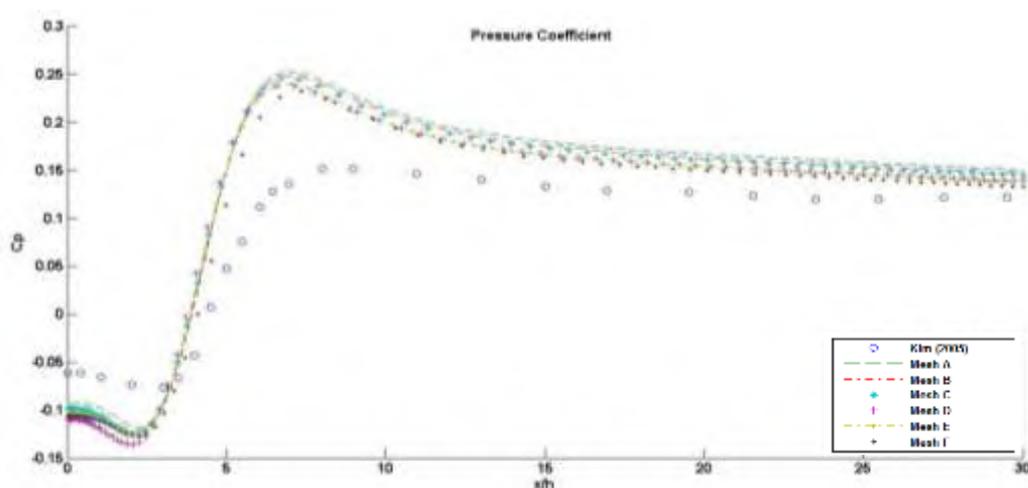
TIBE MESH	JUMLAH NODE	SURFACE	NILAI CP	NILAI Y <sub>+</sub>
MESH A	330925	962384	0.243728	205.19
MESH B	449369	1310820	0.239349	187.21
MESH C	530015	1548396	0.236114	179.37
MESH D	671209	1964752	0.231985	147.36
MESH E	912161	2676780	0.22665	150.65
MESH F	935479	2745856	0.227264	106.13



Gambar 4.1 Grafik grid *independency* pada nilai Cp

Dari hasil pelaksanaan grid *independency* didapatkan grid yang *independent* adalah *mesh F*. Hal ini terlihat dari tren *chart* Gambar 4.1 untuk nilai *pressure coefficient* ( $C_p$ ) versus jumlah *surface* didapatkan hasil bahwa nilai *pressure coefficient* ( $C_p$ ) yang sudah mendekati konstan atau tidak berbeda jauh (toleransi < 1%) yaitu pada *mesh F*. Dengan penggunaan grid yang *independent* maka hasil dari perhitungan atau simulasi yang akan dilakukan oleh perangkat lunak CFD komersial nantinya sudah tidak terpengaruh lagi oleh *mesh* atau grid yang diberikan. Untuk selanjutnya, jumlah *surface* yang digunakan dalam pembuatan *meshing* dengan adanya *bump* dipilih kurang lebih 2745856 sesuai hasil grid *independency* yaitu jumlah *surface mesh F*.

Untuk mengecek *validitas* dan *reliabilitas* dari simulasi yang digunakan, maka dilakukan validasi hasil simulasi aliran *backward-facing step* dengan hasil simulasi oleh **Kim, dkk** (2005). Nilai yang diambil adalah *pressure coefficient* ( $C_p$ ) pada bagian tengah daerah *downstream*. Gambar 4.2 menunjukkan hasil validasi untuk aliran *backward facing step* tanpa ada penambahan pengganggu dari hasil simulasi yang dilakukan dibandingkan dengan hasil simulasi yang terlebih dahulu dilakukan (**Kim, dkk** 2005). Melalui Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa validasi menunjukkan tren yang sama. Grafik *mesh F* memiliki nilai yang mendekati dengan hasil simulasi **Kim, dkk** (2005) sehingga sesuai dengan hasil grid *independency*.



Gambar 4.2 Grafik perbandingan distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ )

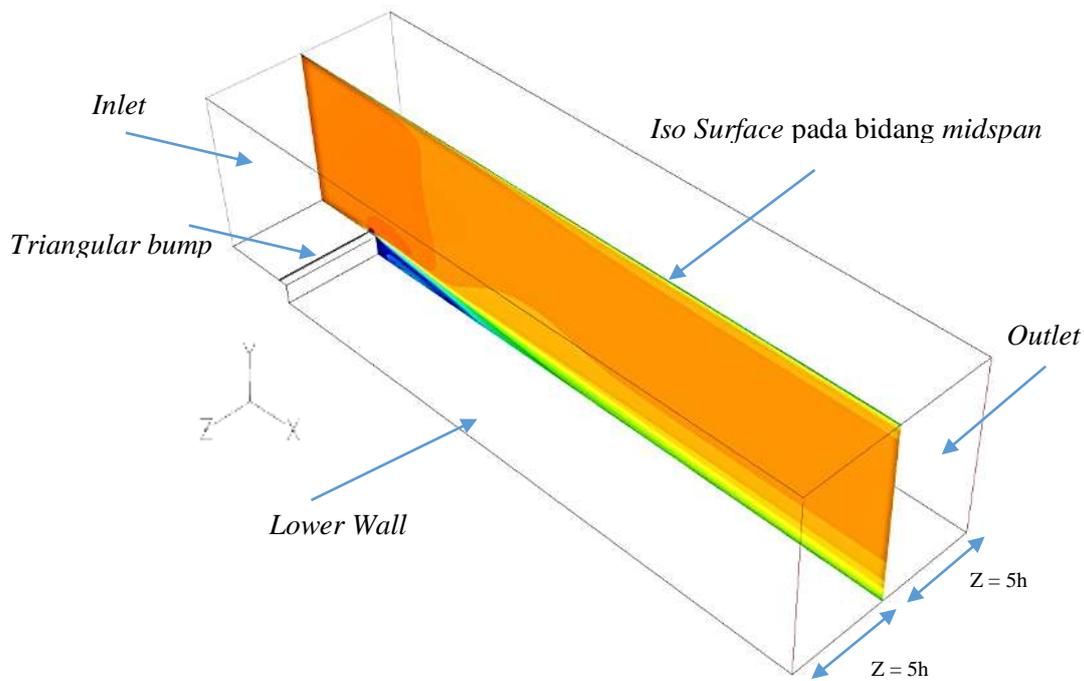
Selain berdasarkan grafik perbandingan *pressure coefficient* ( $C_p$ ), validasi juga dilakukan berdasarkan hasil panjang *reattachment*. Panjang *reattachment* yang dihasilkan dari hasil simulasi dibandingkan dengan panjang *reattachment* dari hasil simulasi **Kim, dkk** (2005). Panjang *reattachment* ini didapatkan dari *interpolasi* nilai *wall shear stress* pada daerah *midspan lower wall* dimana nilai yang diambil adalah saat mengalami perubahan nilai dari negatif menjadi positif. *Interpolasi* dilakukan dengan menghitung nilai *wall shear stress* yang nol sehingga didapatkan posisi  $\frac{x_r}{h}$  yang merupakan panjang *reattachment*. Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan panjang *reattachment* dari simulasi dengan panjang *reattachment* hasil simulasi yang dilakukan **Kim, dkk** (2005). Berdasarkan Tabel 4.2 menunjukkan pada *mesh* F panjang *reattachment* lebih mendekati dengan hasil simulasi yaitu nilai erornya 7.98%.

**Tabel 4.2 Perbandingan panjang *reattachment***

Tipe Mesh	Panjang <i>reattachment</i> ( $\frac{x_r}{h}$ )		Error (%)
	Hasil simulasi	Hasil Simulasi ( <b>Kim,dkk 2005</b> )	
Mesh A	5.42	6.1	11.0
Mesh B	5.34		12.43
Mesh C	5.46		10.46
Mesh D	5.52		9.45
Mesh E	5.57		8.52
Mesh F	5.61		7.98

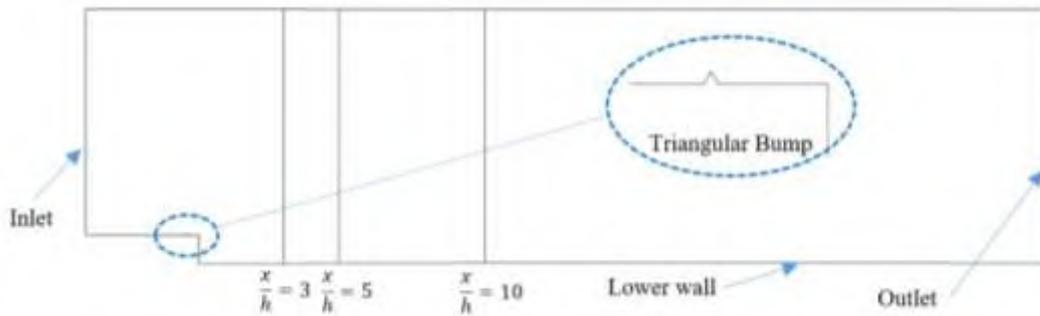
#### **4. 2 Posisi dan Cara Pengambilan Data Hasil Simulasi**

*Post Processing* hasil simulasi dilakukan dengan melihat distribusi kecepatan. Posisi pengambilan data hasil simulasi dilakukan dengan membuat *iso-surface* pada sumbu z konstan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.3 Posisi pengambilan data *iso-surface backward facing step*.

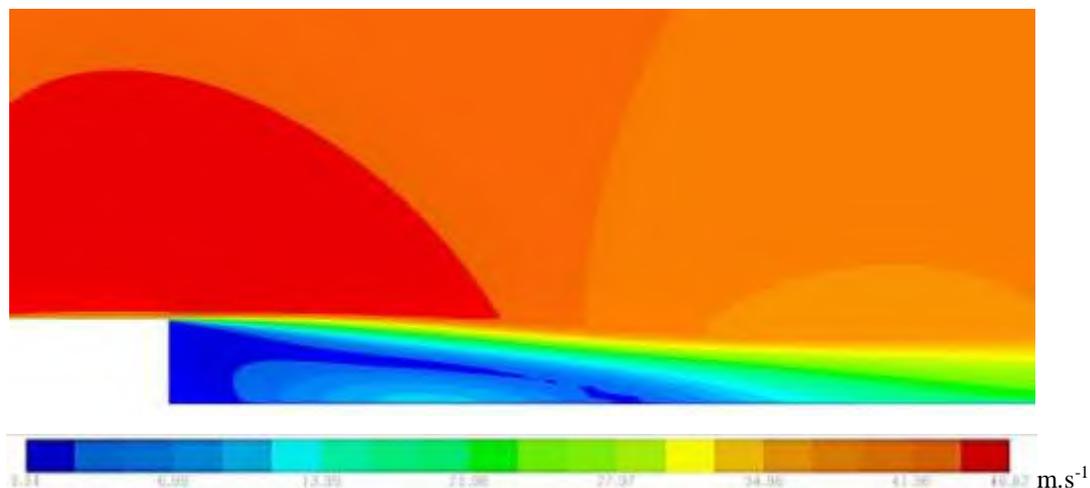
Gambar 4.3 merupakan posisi pengambilan data (*iso-surface*) yang digunakan. *Iso-surface* yang dibuat berada pada daerah *midspan* yaitu  $\frac{z}{h} = 5$ , sedangkan pengambilan data distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) dan *skin friction* ( $C_f$ ) secara kuantitatif dilakukan dengan membuat *iso-surface* pada bagian *lower wall* daerah *midspan*. Profil kecepatan ( $\frac{U}{U_\infty}$ ) diambil di beberapa titik yaitu  $\frac{x}{h} = 3, 5, \text{ dan } 10$  pada *iso-surface midspan* yang telah dibuat seperti ditunjukkan Gambar 4.4. Profil kecepatan dibuat di beberapa titik untuk mengetahui vektor kecepatan sebelum dan sesudah melewati titik *reattachment*. Profil kecepatan ( $\frac{U}{U_{maks}}$ ) juga dibuat pada titik *backward-facing step* yang selanjutnya data tersebut akan diolah agar didapatkan nilai *shape factor*.



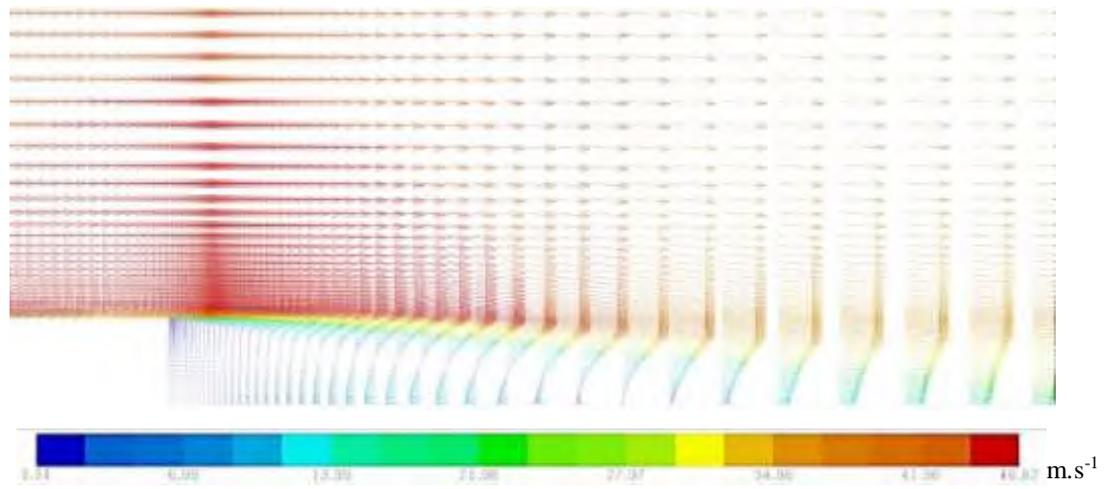
Gambar 4.4 Posisi titik pengambilan vektor kecepatan

### 4.3 Karakteristik Aliran pada *Backward Facing Step*

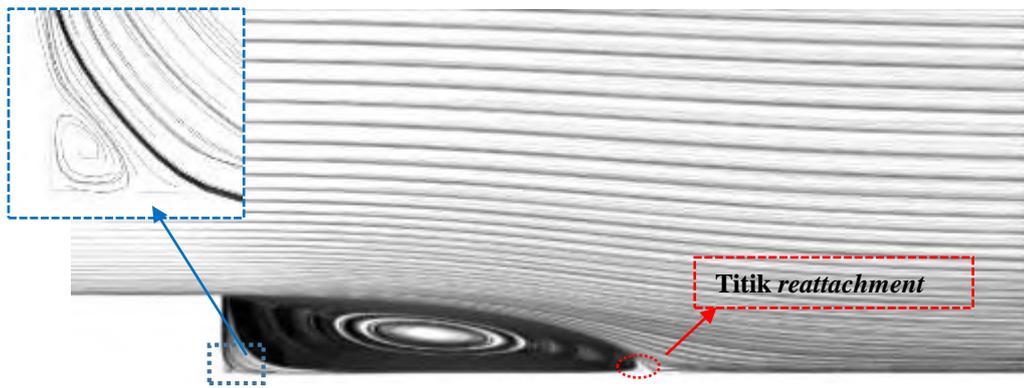
Pada sub bab ini akan dijelaskan fenomena yang terjadi pada aliran *backward-facing step* tanpa penambahan *triangular bump* dengan bilangan Reynolds  $3.8 \times 10^4$  melalui data kuantitatif dan kualitatif. Ulasan ini akan diawali dengan analisa visualisasi aliran berupa kontur kecepatan, vektor kecepatan, *velocity pathline* dan kontur tekanan. Visualisasi aliran digunakan untuk memperjelas data hasil kuantitatif berupa grafik profil kecepatan ( $\frac{U}{U_\infty}$ ), dan *shape factor* (H). Pada bagian ini profil kecepatan akan ditampilkan pada jarak  $\frac{x}{h} = 3, 5,$  dan 10. Gambar 4.5 menunjukkan visualisasi aliran berupa kontur kecepatan, vektor kecepatan, *velocity pathline*, dan kontur tekanan pada aliran *backward-facing step*.



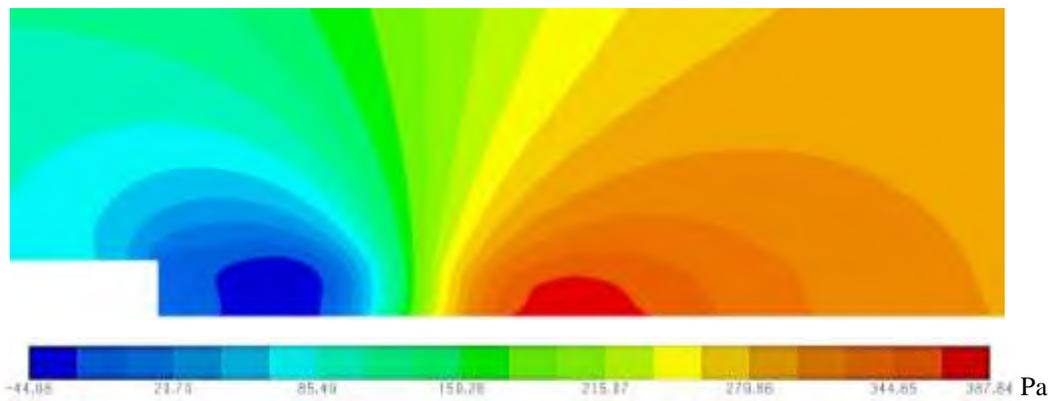
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.5 Visualisasi kontur pada *iso-surface midspan* (a) Kontur kecepatan (b) Vektor kecepatan (c) *Velocity pathline* (d) Kontur tekanan**

Kontur kecepatan pada *iso-surface midspan* dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a). Kontur kecepatan ini hanya difokuskan pada daerah *downtream* dekat dengan

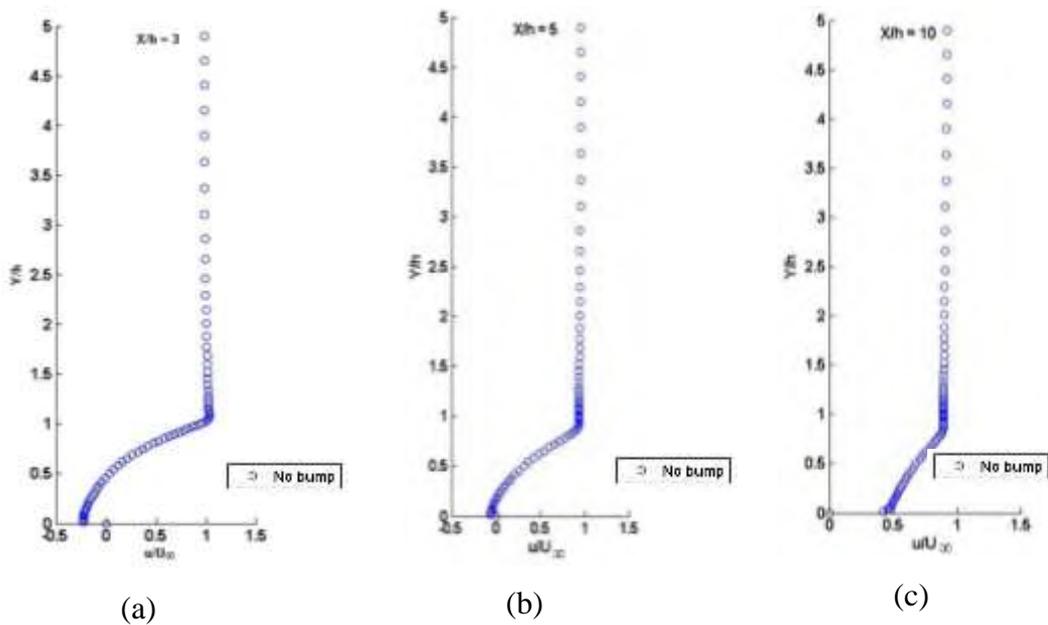
*backward-facing step*. Berdasarkan kontur tersebut terlihat kecepatan aliran maksimum adalah 46.6 m/s dan secara berangsur-angsur menurun. Kecepatan paling kecil mendekati nol berada pada dekat dinding *backward-facing step* dan meningkat sepanjang sumbu x di daerah *downstream*. Hal ini dapat dilihat dari visualisasi kontur warna dari biru tua ke hijau kuning. Kecepatan yang berada pada daerah di atas *shear layer* mendekati kecepatan *inlet* ( $U_\infty$ ) yaitu 44.2 m/s, dikarenakan sudah tidak terpengaruh *separation bubble*. Hal ini ditunjukkan dari visualisasi kontur warna jingga tua.

Kontur kecepatan juga berkorelasi dengan vektor kecepatan seperti pada Gambar 4.5 (b) dimana arah aliran yang berasal dari *inlet* memasuki daerah *upstream* kemudian terseparasi saat melewati *backward-facing step* sehingga terjadi *separation bubble* di daerah *downstream*. Vektor kecepatan di daerah *upstream* terlihat memiliki arah yang seragam nilainya sekitar 44.32 m/s sampai 46.6 m/s. Aliran setelah terseparasi, vektor kecepatan menunjukkan terjadinya aliran *irrotational* yang menyebabkan pembentukan resirkulasi kecepatan rendah pada daerah *downstream*. Nilai kecepatan kecil mendekati nol m/s berada di dekat dinding *backward-facing step* yang ditunjukkan dengan panjang vektor kecepatan yang pendek. Penurunan tekanan yang terjadi pada aliran ini mengakibatkan *shear layer* bergerak turun membentuk kurva menuju dinding bagian bawah dan menimpa pada suatu titik yang disebut titik *reattachment*. Titik *reattachment* ditunjukkan dengan vektor kecepatan yang berarah sama atau sudah tidak ada vektor kecepatan yang berbalik arah. Berdasarkan pengukuran didapatkan panjang *reattachment* yaitu  $\frac{x_r}{h} = 5.61$ . Panjang *reattachment* adalah jarak horizontal antara bagian bawah dinding *backward-facing step* dengan titik *reattachment*. Gambar 4.5 (b) juga menunjukkan vektor kecepatan yang berada di atas *shear layer* memiliki nilai dan arah yang seragam.

Gambar 4.5 (c) menunjukkan *streamline* kecepatan pada aliran *backward-facing step*. *Separation bubble* terlihat jelas di bagian bawah *shear layer* yang ditunjukkan berupa pusaran besar atau *vorteks* utama. Selain *vorteks* utama juga terlihat *vorteks* sekunder yang berada diujung bawah dinding *backward-facing step*. Ukuran

*vorteks* sekunder ini sangat kecil dibandingkan dengan ukuran *vorteks* utama. *Vorteks* sekunder diperlihatkan garis putus-putus pada Gambar 4.5 (c).

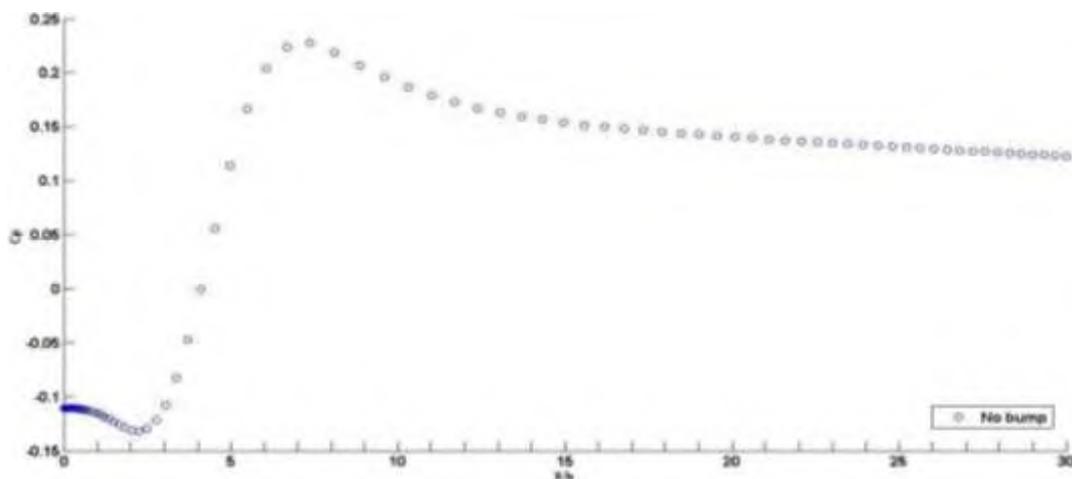
Daerah *separation bubble* memiliki distribusi tekanan yang rendah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 (d). Pada Gambar 4.5 (d) menunjukkan daerah didekat dinding *backward-facing step* memiliki tekanan rendah yang ditampilkan dengan warna biru tua, dan distribusi tekanan berangsur meningkat seiring bergerak ke arah sumbu x positif. Titik *reattachment* juga terlihat pada Gambar 4.5 (c) yang ditunjukkan dengan tanda lingkaran merah. Terlihat arah *streamline* pada tanda merah tersebut sudah tidak ada yang berbalik arah bahkan terlihat seperti dibengkokkan ke kanan. Titik *reattachment* merupakan batas daerah *separation bubble*.



Gambar 4.6 Grafik vektor kecepatan aliran *backward-facing step* di titik (a)  $\frac{x}{h} = 3$ , (b)  $\frac{x}{h} = 5$ ,  
(c)  $\frac{x}{h} = 10$

Grafik vektor kecepatan pada Gambar 4.6 menguatkan pernyataan panjang *reattachment*. Pada grafik tampak bahwa pada  $\frac{x}{h} = 5$  menunjukkan masih terdapat *back flow* sehingga terdapat nilai  $\frac{u}{U_{\infty}}$  bernilai dibawah nol walaupun sedikit. Hal ini menunjukkan pada  $\frac{x}{h} = 5$  aliran yang terbentuk terjadi di dalam daerah *separation*

*bubble*. Pada  $\frac{x}{h} = 10$  terlihat nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  sudah diatas nol, namun nilainya masih belum seragam seluruhnya. Besar kecepatan dari dinding *lower wall* meningkat bertambah dari nol hingga mulai seragam pada ketinggian  $\frac{y}{h} = 0.83$ . Hal ini sesuai dengan hasil kontur kecepatan pada daerah *downstream* ( $\frac{y}{h} < 1$ ) kecepatan berangsur meningkat yang ditampilkan dari warna biru muda berubah menjadi orenge muda. Perubahan kecepatan tersebut dikarenakan pengaruh dari *sudden expansion* saat aliran melewati *backward-facing step* sehingga pada daerah *downstream* terjadi *pressure drop* yang besar seperti ditunjukkan dalam grafik Cp berikut.

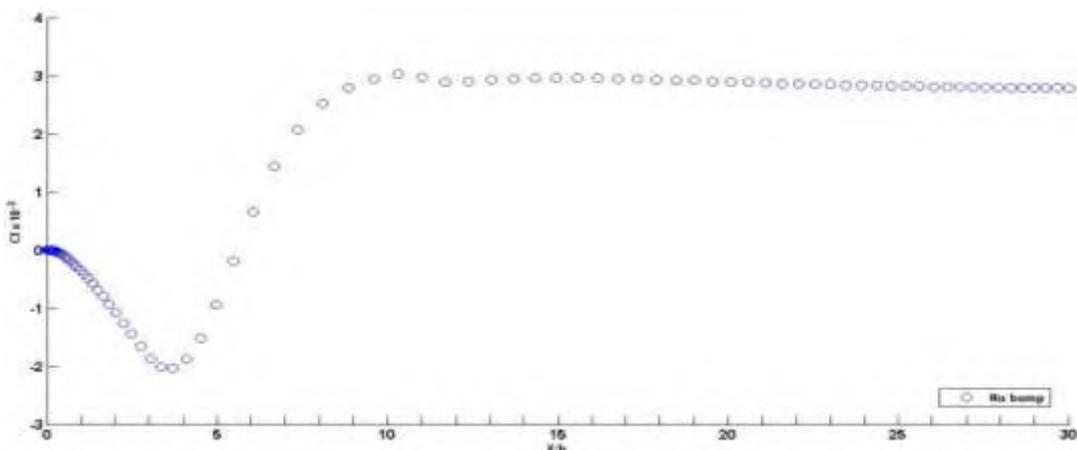


**Gambar 4.7** Grafik distribusi *pressure coefficient* (Cp) pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward-facing step* tanpa penambahan *triangular bump*

Grafik distribusi *pressure coefficient* pada Gambar 4.7 menampilkan besar *pressure drop* yang terjadi sepanjang *lower wall* pada daerah *downstream*. Nilai Cp negatif dari titik  $\frac{x}{h} = 0$  hingga  $\frac{x}{h} = 4,1$  menandakan pada rentang jarak tersebut tekanannya berada di bawah tekanan *inlet* yaitu 115,15 Pa. Hasil ini sesuai dengan warna yang ditampilkan pada kontur tekanan ditunjukkan Gambar 4.5 (d) yang berwarna biru. Nilai Cp dari  $\frac{x}{h} = 0$  turun kebawah artinya mengalami *accelaration* hingga bernilai minimum terjadi di titik  $\frac{x}{h} = 2.25$ . Nilai Cp minimum tersebut menunjukkan tekanan *static* bernilai paling kecil. Pada Gambar 4.5 (d) tekanan terkecil ini ditampilkan warna biru tua yaitu bernilai -44.08 Pa. Setelah mengalami

*acceleration*, nilai  $C_p$  meningkat hingga pada  $\frac{x}{h} = 4.1$  berharga nol. Nilai  $C_p$  nol menunjukkan tekanan pada titik tersebut sama dengan tekanan *inlet*. Pada titik  $\frac{x}{h} = 7.35$ , nilai  $C_p$  bernilai maksimum yaitu 0.227. Pada Gambar 4.5 (d) nilai  $C_p$  maksimum dapat dilihat pada daerah yang ditampilkan dengan warna merah dan mewakili nilai tekanan *static* paling besar.

Gambar 4.8 menunjukkan distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) sepanjang *lower wall* pada daerah *downstream*. Berdasarkan grafik tersebut diperlihatkan nilai  $C_f$  pada awalnya bernilai negatif. Nilai negatif berarti *wall shear stress* pada daerah tersebut berlawanan dengan arah kecepatan. Hal ini menunjukkan daerah tersebut merupakan daerah *separation bubble*. Pada saat  $\frac{x}{h} = 5.6$ , nilai  $C_f = 0$  sehingga besar *wall shear stress* di titik tersebut juga nol. Dikarenakan *wall shear stress* merupakan hasil dari  $\frac{du}{dy}$  maka saat nilainya nol, kecepatan di titik  $\frac{x}{h} = 5.6$  daerah *lower wall* juga nol. Hal ini menunjukkan titik tersebut adalah titik *reattachment*. Gambar 4.8 juga menunjukkan nilai  $C_f$  maksimum pada titik  $\frac{x}{h} = 10.3$ . Setelah melewati titik tersebut, perubahan nilai  $C_f$  tidak signifikan. Hal ini sama seperti yang ditunjukkan pada distribusi *pressure coefficient* Gambar 4.7. Kolerasi tersebut memperlihatkan perubahan kecepatan dan tekanan saat  $\frac{x}{h} > 10$  tidak besar dibandingkan perubahan yang terjadi pada saat  $\frac{x}{h} < 10$ .



**Gambar 4.8** Grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward-facing step* tanpa penambahan *triangular bump*

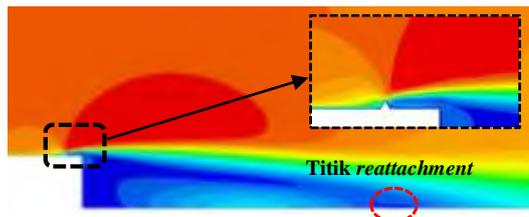
#### 4.4 Fenomena dan Analisa Aliran pada *Backward-Facing Step* dengan Penambahan *Triangular Bump*

Pada sub bab ini akan dijelaskan fenomena yang terjadi pada aliran *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump* pada ketinggian  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan  $\frac{d}{h} = 0.1$ . Variasi jarak *triangular bump* terhadap tepi *backward-facing step* divariasikan yaitu  $\frac{s}{d} = 7, 10, 15$  dan  $20$  yang akan diulas melalui data kuantitatif dan kualitatif. Dipilih variasi jarak tersebut dikarenakan sesuai hasil penelitian **Venas, dkk (2000)**, titik *reattachment* oleh *obstacle* segitiga  $\frac{s}{d} = 9.7$ , sehingga jarak–jarak tersebut mewakili aliran sebelum terpecah oleh *backward-facing step* belum *reattachment*, tepat *reattachment* dan jauh sudah *reattachment*.

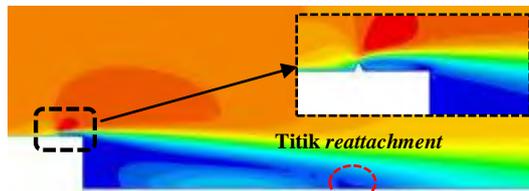
Data kualitatif yang akan dibahas berupa kontur kecepatan, vektor kecepatan, *velocity pathline* dan kontur tekanan, sedangkan data kuantitatif berupa panjang *reattachment*, distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) dan *skin friction* ( $C_f$ ) sepanjang *lower wall iso-surface midspan*, dan grafik profil kecepatan ( $\frac{U}{U_\infty}$ ). Untuk profil kecepatan akan diambil beberapa titik yaitu  $\frac{x}{h} = 3, 5$  dan  $10$  untuk variasi jarak *triangular bump* ( $\frac{s}{h}$ ) yang berbeda. Hal ini dilakukan karena terjadinya fenomena yang berbeda pada setiap pergeseran jarak *triangular bump* terhadap tepi *backward-facing step*.

##### 4.4.1 Karakteristik Aliran pada *Backward Facing Step* dengan Penambahan *Triangular Bump* $\frac{d}{h} = 0.05$

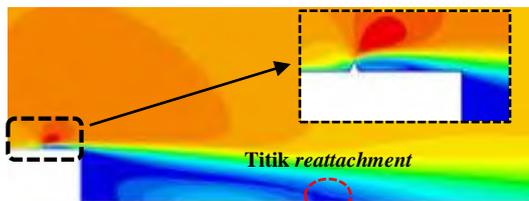
Fenomena fisis yang akan diuraikan pada bagian ini diawali dengan melakukan interpretasi pada data kualitatif berupa visualisasi aliran kontur kecepatan dan diperjelas dengan vektor kecepatan dan *velocity pathline*. Data kuantitatif panjang *reattachment* dan profil kecepatan ditampilkan untuk memperkuat penjelasan fenomena dari data kualitatif. Visualisasi kontur tekanan, grafik distribusi *pressure coefficient* dan grafik distribusi *skin friction* diberikan untuk mengetahui perubahan tekanan dan *wall shear stress* yang terjadi pada daerah *downstream* akibat penambahan *triangular bump*.



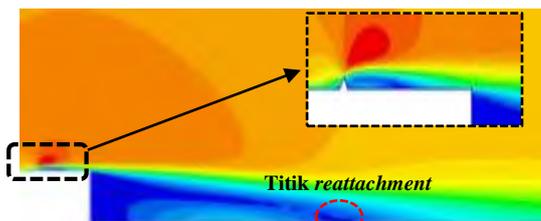
(a)



(b)

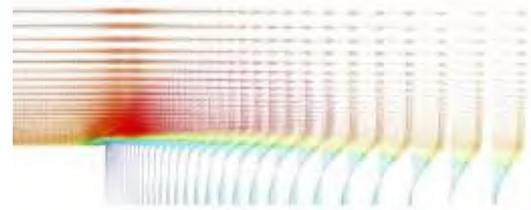


(c)

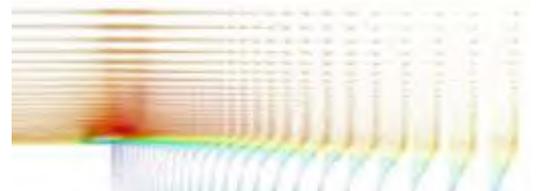


(d)

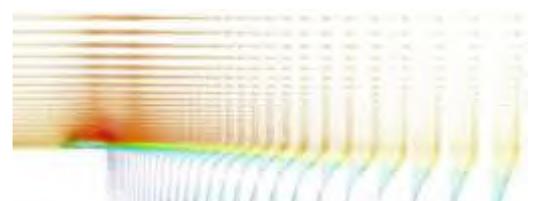
**Gambar 4.9** Kontur kecepatan dengan variasi jarak *triangular bump* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ , (b)  $\frac{s}{d} = 10$ , (c)  $\frac{s}{d} = 15$ , (d)  $\frac{s}{d} = 20$



(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.10** Vektor kecepatan dengan variasi jarak *triangular bump* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ , (b)  $\frac{s}{d} = 10$ , (c)  $\frac{s}{d} = 15$ , (d)  $\frac{s}{d} = 20$

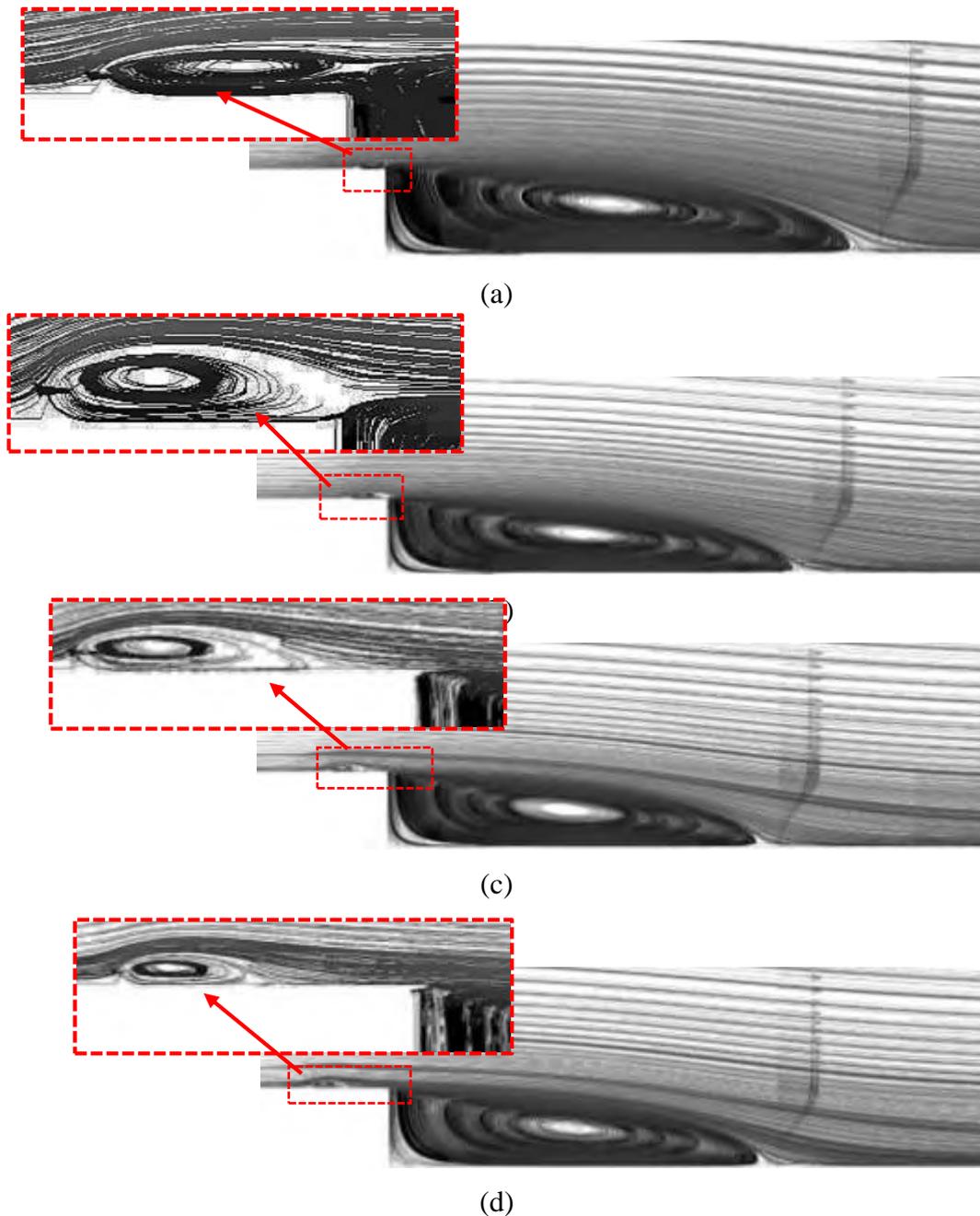
Gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan visualisasi aliran berupa kontur kecepatan dan vektor kecepatan pada aliran *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$ . Keberadaan pengganggu yang ditempatkan pada sisi *upstream* sebelum *backward-facing step* sangat mempengaruhi kecepatan aliran sebelum terseparasi oleh *backward-facing step*. Gambar 4.9 menunjukkan aliran saat mengenai *triangular bump* mengalami separasi lebih dulu di puncak *triangular bump* sebelum mengenai tepi *backward-facing step*. Hal ini ditunjukkan adanya

peningkatan kecepatan di ujung puncak *triangular bump* yang ditampilkan dengan warna merah sehingga aliran menjadi lebih turbulenta setelah melewati pengganggu. Peningkatan kecepatan terbesar terjadi saat jarak *triangular bump* terdekat (Gambar 4.6 (a)) terhadap tepi *backward-facing step*. Dari Gambar 4.6 (a) terlihat area peningkatan kecepatan ini lebih besar dibandingkan variasi jarak yang lain. Area kecepatan tinggi yang lebar menyebabkan *pressure drop* di bagian bawah menjadi lebih besar. Hal ini membuat daerah *separation bubble* yang memiliki kecepatan rendah lebih luas.

Saat jarak *triangular bump* digeser menjauhi dari *backward-facing step*, peningkatan kecepatan yang terseparasi di puncak *triangular bump* berkurang. Pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 bahkan terlihat peningkatan kecepatan ini paling kecil. Untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  terlihat penurunan kecepatan setelah melewati *triangular bump* masih berhubungan dengan aliran terseparasi oleh *backward-facing step*. Sedangkan untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20, *vorteks* yang terbentuk di belakang *triangular bump* walaupun memberikan penurunan kecepatan namun karena jarak yang cukup jauh sehingga tidak langsung menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Dalam kontur kecepatan, penurunan kecepatan yang dimaksud ditampilkan dengan area yang berwarna biru dan tidak terlalu luas dibelakang *bump*. Karena penurunan kecepatan pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  tidak berhubungan langsung dengan aliran yang terseparasi di *backward-facing step*, hal ini mengakibatkan pembentukan *separation bubble* lebih kecil dibandingkan variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan  $\frac{s}{d} = 10$ .

Pada Gambar 4.10 menunjukkan vektor kecepatan daerah di dekat dengan dinding *backward-facing step* bernilai sangat kecil, sesuai dengan hasil kontur kecepatan yang ditampilkan berwarna biru tua. Hal ini ditunjukkan dengan panjang vektor kecepatan yang kecil. Pada titik *reattachment*, panjang vektor kecepatan di *lower wall* tidak ada yang berarah ke kiri dan diawali nilai nol. Saat dikorelasikan dengan kontur kecepatan ditunjukkan dengan tanda lingkaran merah yang ditampilkan warna biru tua.

Gambar 4.11 menunjukkan *velocity pathline* dan vektor kecepatan tepat di titik *reattachment*. Terlihat vektor kecepatan bergeser mendekati dinding *backward-facing step* yang menunjukkan panjang *reattachment* bergeser menjadi lebih pendek seiring jarak *triangular bump* digeser menjauhi tepi *backward-facing step*.



Gambar 4.11 *Velocity pathline* dan vektor kecepatan *backward facing step* dengan variasi *triangular bump* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ , (b)  $\frac{s}{d} = 10$ , (c)  $\frac{s}{d} = 15$ , (d)  $\frac{s}{d} = 20$

Saat jarak *triangular bump* = 7 (Gambar 4.11 (a)) nampak daerah *separation bubble* pada *downstream* paling besar dibandingkan variasi jarak yang lain. Adanya *triangular bump* yang jaraknya berdekatan dengan *backward-facing step*, menyebabkan aliran yang terseparasi oleh puncak *triangular bump* belum sempat *reattachment*, sehingga *vorteks* menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Hal ini memberikan *shear layer* yang lebih berkembang pada daerah *downstream* dan mengakibatkan *separation bubble* yang terbentuk menjadi lebih besar. Perkembangan *shear layer* ini menyebabkan *pressure drop* yang besar di dalamnya. Warna biru pada kontur tekanan Gambar 4.12 (a) menunjukkan tekanan di daerah *separation bubble* berharga kecil berkisar -87.16 Pa hingga 218.12 Pa. Tekanan *inlet* ( $P_{\infty}$ ) hasil simulasi yang besar yaitu 237.414 Pa sehingga menyebabkan *pressure drop* sangat besar di dalam daerah *shear layer*. Titik *reattachment* yang diwakilkan dengan vektor kecepatan terlihat berada paling jauh pada variasi ini. Besar panjang *reattachment* dapat dilihat dalam Tabel 4.3.

Saat jarak *triangular bump* digeser menjauhi *backward-facing step* yaitu pada jarak  $\frac{s}{d} = 10$  (Gambar 4.11 (b)) aliran yang terseparasi oleh puncak *triangular bump* sudah mendekati *reattach* sebelum terseparasi oleh *backward-facing step*. Sesuai hasil penelitian **Venas, dkk** (2000) aliran yang terseparasi oleh *obstacle* segitiga memberikan jarak *reattachment* yaitu  $\frac{s}{d} = 9.7$ . Gambar 4.11 (b) menunjukkan *vorteks* yang terbentuk dibelakang *triangular bump* tidak sepenuhnya menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step* sehingga memberikan pengaruh kecil pada perkembangan *shear layer* di daerah *downstream*. Perkembangan *shear layer* yang kecil ini, menyebabkan *pressure drop* di dalamnya lebih kecil dibandingkan variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$ . Hal ini sesuai seperti ditunjukkan pada kontur tekanan Gambar 4.12 (b) bahwa tekanan di daerah *separation bubble* memiliki nilai lebih besar sedikit yaitu -80.10 Pa hingga 197.42 Pa. *Pressure drop* kecil ini mengakibatkan penurunan *shear layer* lebih cepat sehingga titik *reattachment* lebih pendek dibandingkan variasi jarak pertama. Pada Gambar 4.11 (b) terlihat vektor kecepatan yang mewakili titik *reattachment* jauh berada di

sebelah kiri dibandingkan vektor kecepatan yang ditampilkan pada Gambar 4.11 (a). Perbandingan panjang *reattachment* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

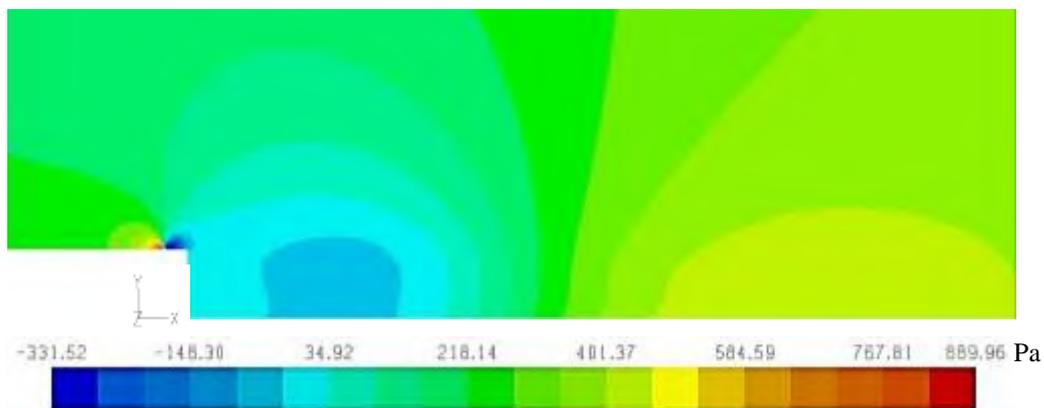
Gambar 4.11 (c) dan (d) menunjukkan *vorteks* yang terbentuk dibelakang *triangular bump* tidak langsung menyatu pada aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Jarak *triangular bump* yang cukup jauh dari tepi *backward-facing step* membuat aliran yang terseparasi oleh puncak *bump reattachment* terlebih dulu jauh di depan. Kedua variasi jarak ini memberikan pengaruh pada perkembangan *shear layer* daerah *downstream* cenderung mengecil. Hal ini dapat dilihat daerah *separation bubble* yang terbentuk lebih kecil dibandingkan variasi sebelumnya. Kecenderungan perkembangan *shear layer* yang kecil ini disebabkan kecepatan sebelum terseparasi oleh *backward-facing step* sudah berkurang, sehingga saat terseparasi memiliki momentum yang kecil.

Tekanan di daerah *separation bubble* yang ditampilkan warna hijau pada gambar 4.12 (c) dan 4.12 (d) memiliki nilai yang besar dibandingkan nilai tekanan dari dua variasi sebelumnya sekitar  $-70$  Pa hingga  $100$  Pa. Tekanan yang besar ini menyebabkan *shear layer* turun lebih cepat, sehingga panjang *reattachment* lebih kecil. Perbandingan panjang *reattachment* dapat dilihat pada Tabel 4.3. Pada kedua variasi ini terlihat tekanan di daerah *separation bubble* memiliki kontur tekanan yang mirip, sehingga nilai *pressure drop* pada kedua variasi juga mendekati sama. *Pressure drop* yang sama ini akan dijelaskan pada distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ).

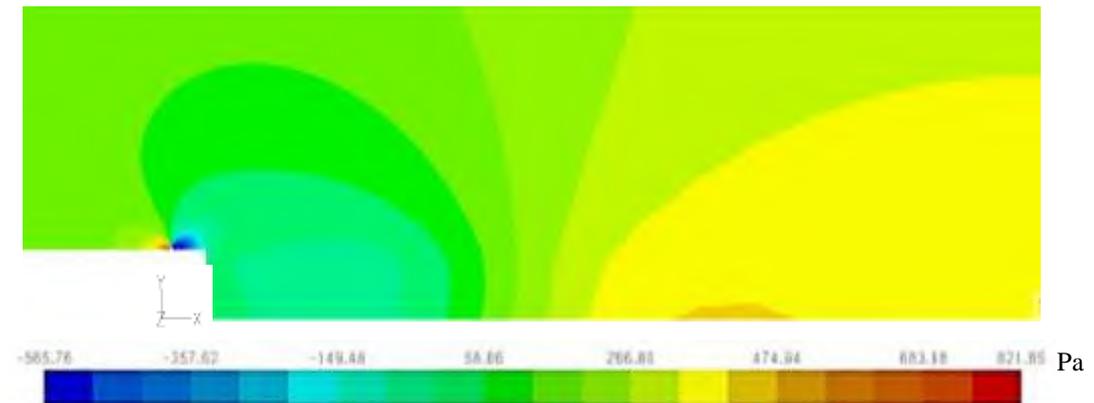
**Tabel 4.3 Panjang *reattachment* pada *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$**

Variasi Jarak <i>Triangular Bump</i> ( $\frac{s}{d}$ )	Panjang <i>Reattachment</i> ( $\frac{x_r}{h}$ )
7	6.19
10	5.40
15	4.98
20	4.82

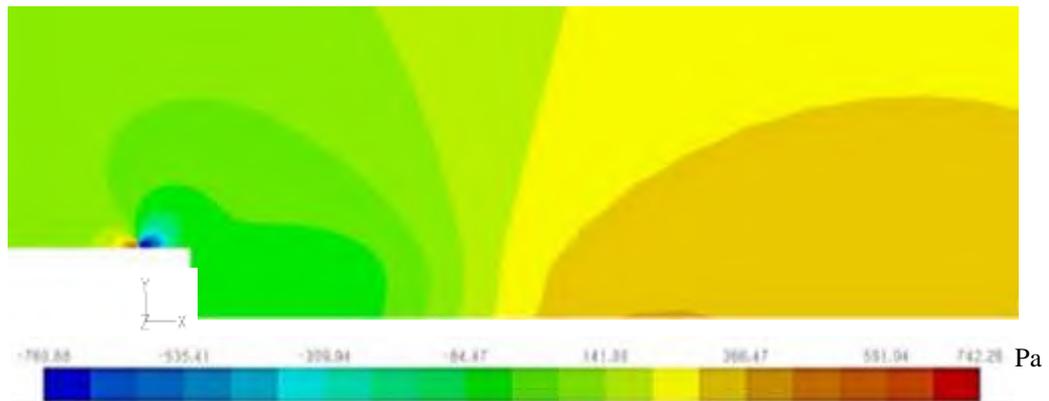
Tabel 4.3 menunjukkan perbandingan panjang *reattachment* terhadap variasi jarak *triangular bump*. Pada jarak  $\frac{s}{d} = 7$  memberikan nilai panjang *reattachment* yang paling panjang dan pada jarak  $\frac{s}{d} = 20$  memberikan nilai panjang *reattachment* paling pendek. Untuk jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  perubahan panjang *reattachment* tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan jarak *bump* yang jauh dari *backward-facing step* menyebabkan *vorteks* yang terbentuk di belakang *bump* tidak menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, panjang *reattachment* yang besar menunjukkan daerah *separation bubble* yang besar juga. Adanya *vorteks* utama atau *separation bubble* ini membuat *losses* pada aliran *backward-facing step*. Berdasarkan perbandingan panjang *reattachment*, jarak *triangular bump* yang optimum pada jarak  $\frac{s}{d} = 20$ . Hal ini dikarenakan pada jarak  $\frac{s}{d} = 20$  menghasilkan panjang *reattachment* paling pendek sehingga *losses* yang terjadi pada aliran *backward-facing step* juga paling kecil. Berdasarkan hasil panjang *reattachment* Tabel 4.3, dapat dilihat semakin dekat jarak *triangular bump* terhadap *backward-facing step*, maka menyebabkan panjang *reattachment* yang lebih panjang.



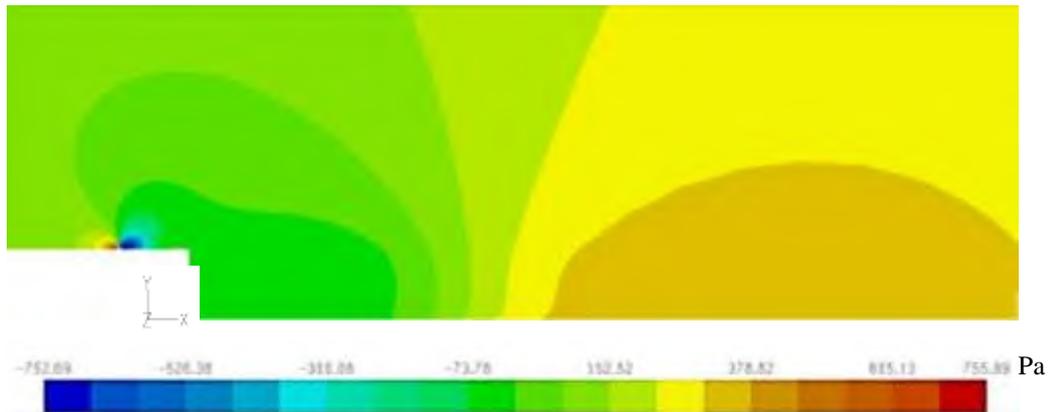
(a)



(b)



(c)

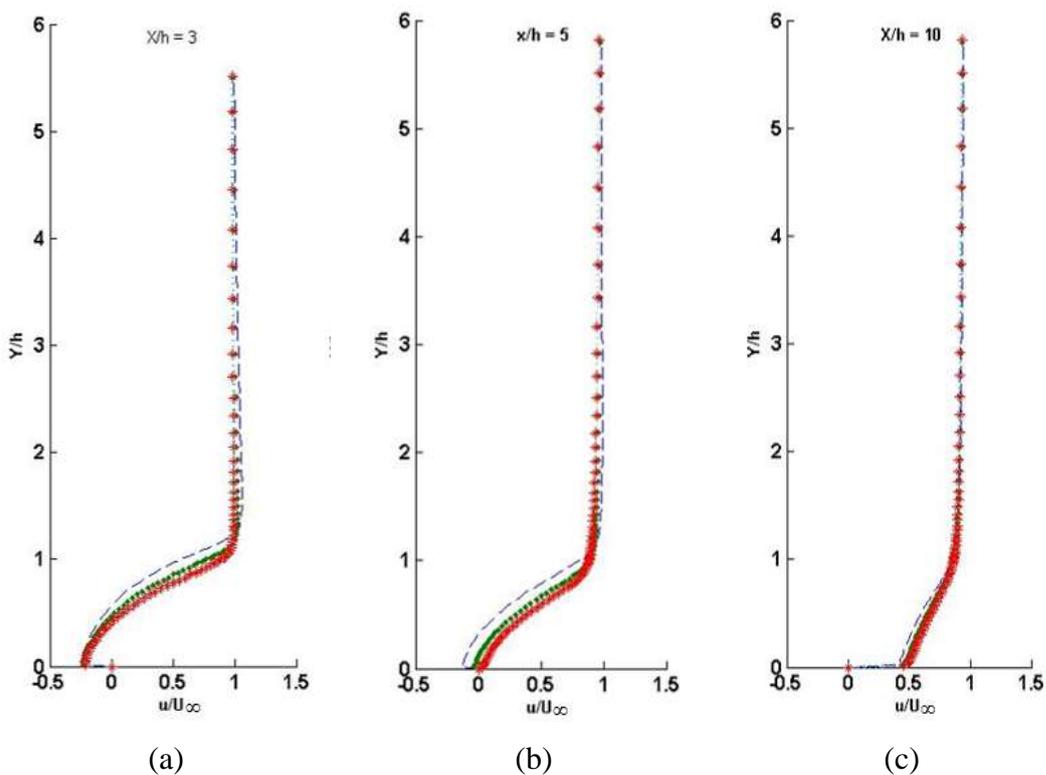


(d)

**Gambar 4.12** Kontur tekanan dengan variasi *triangular bump* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ , (b)  $\frac{s}{d} = 10$ , (c)  $\frac{s}{d} = 10$ ,  
(d)  $\frac{s}{d} = 20$

Grafik vektor profil kecepatan pada Gambar 4.13 menguatkan pernyataan panjang *reattachment*. Pada Gambar 4.13 (a) tampak bahwa pada  $\frac{x}{h} = 3$  dari

keempat variasi jarak terdapat nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  yang bernilai dibawah nol. Nilai ini menunjukkan pada  $\frac{x}{h} = 3$  masih terdapat *backflow* sehingga ada arah vektor kecepatan kekiri atau negatif. Adanya *back flow* tersebut menunjukkan pada jarak  $\frac{x}{h} = 3$ , keempat variasi jarak belum terjadi *reattachment*. Gambar 4.13 (b) tampak bahwa pada  $\frac{x}{h} = 5$  terlihat nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  sudah dimulai diatas nol untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20. Berarti untuk variasi jarak ini aliran sudah terjadi *reattachment* sehingga tidak ada arah vektor kecepatan yang kekiri atau negatif. Sedangkan untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  dibawah nol masih terlihat cukup besar. Hal ini menunjukkan untuk jarak  $\frac{s}{d} = 7$  titik *reattachment* masih jauh sehingga di titik  $\frac{x}{h} = 5$  masih ada arah kecepatan ke kiri. Pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  walaupun hanya sedikit masih ada nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  yang dibawah nol. Nilai yang sedikit ini dikarenakan titik *reattachment* untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  berdekatan dengan titik pengambilan data.

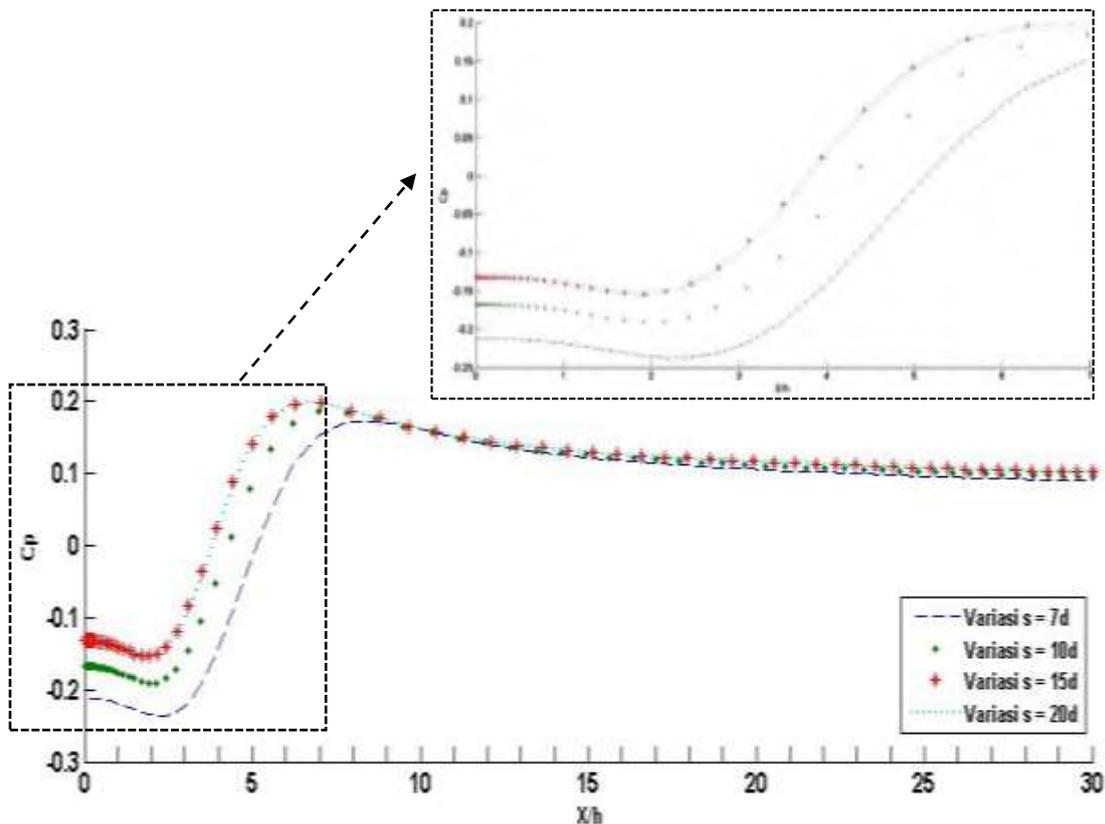


**Gambar 4.13** Grafik vektor kecepatan aliran *backward-facing step* di titik (a)  $\frac{x}{h} = 3$ , (b)  $\frac{x}{h} = 5$ , (c)  $\frac{x}{h} = 10$  --- jarak  $\frac{s}{d} = 7$ ; • jarak  $\frac{s}{d} = 10$ ; \* jarak  $\frac{s}{d} = 15$ ; .... jarak  $\frac{s}{d} = 20$ .

Gambar 4.13 (c) menunjukkan pada  $\frac{x}{h} = 10$  untuk keempat variasi jarak nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  sudah dimulai diatas nol. Berarti pada titik pengambilan data tidak ada arah vektor kecepatan yang ke kiri atau bernilai negatif. Grafik jarak  $\frac{s}{d} = 7$  terlihat lebih lambat dibandingkan variasi jarak yang lain agar kecepatannya menjadi seragam. Hal ini disebabkan pengaruh *pressure drop* yang besar di daerah *separation bubble* sehingga walaupun sudah melewati titik *reattachment*, pemulihan kecepatan masih tertinggal. Pengaruh *pressure drop* yang besar pada variasi ini juga dapat dilihat dari distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) berikut.

Pada Gambar 4.14 menunjukkan distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) pada *lower wall backward-facing step*. Dari gambar tersebut dapat dilihat distribusi  $C_p$  saat  $\frac{x}{h} < 8$  untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  jauh dibawah dibandingkan variasi jarak lainnya. *Pressure drop* yang besar pada variasi ini menyebabkan nilai  $C_p$  tersebut menjadi lebih kecil. Saat  $\frac{x}{h} = 0$  hingga  $\frac{x}{h} = 2.73$  aliran mengalami percepatan hingga mencapai  $C_p$  minimum.  $C_p$  minimum mengindikasikan terjadinya akselerasi maksimum. Berdasarkan perhitungan, saat nilai  $C_p$  minimum di dapatkan *pressure drop* sebesar  $-277,7$  Pa. Hasil simulasi memberikan tekanan *inlet* ( $P_\infty$ ) =  $237.414$  sehingga tekanan *static* didapatkan  $-40.3$  Pa. Hasil ini sesuai dengan kontur tekanan Gambar 4.12 (a).

Untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$ , distribusi  $C_p$  pada  $\frac{x}{h} < 8$  berada diatas dibandingkan  $C_p$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$ . Hal tersebut mengindikasi *pressure drop* pada variasi jarak ini lebih kecil. *Pressure drop* yang kecil menyebabkan daerah *separation bubble* berkurang. Aliran mengalami percepatan hingga mencapai  $C_p$  minimum pada titik  $\frac{x}{h} = 1.90$ . Berdasarkan perhitungan, *pressure drop* pada  $C_p$  minimum yang dihasilkan adalah  $-227,9$  Pa sehingga tekanan *static* pada titik tersebut bernilai  $-35.84$  Pa. Tekanan ini merupakan tekanan paling kecil dalam variasi ini, dimana berdasarkan kontur tekanan Gambar 4.12 (b) ditampilkan dengan warna biru sedikit tua.



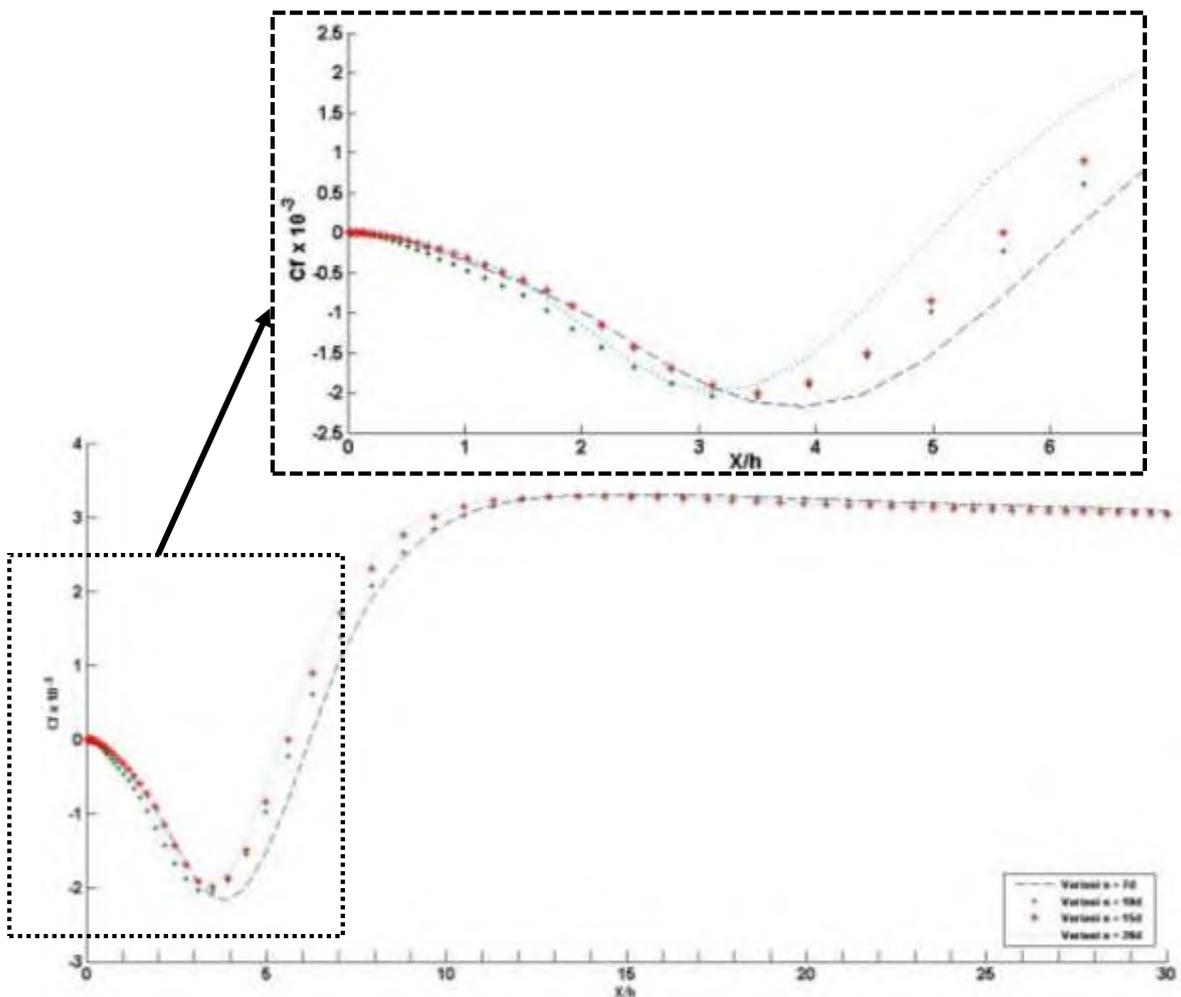
**Gambar 4.14** Grafik distribusi pressure coefficient ( $C_p$ ) *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward facing step*

Pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  terlihat dalam Gambar 4.14 distribusi nilai  $C_p$  berhimpit. Hal tersebut menunjukkan perubahan jarak *triangular bump* yang cukup jauh terhadap *backward-facing step* menyebabkan perubahan distribusi  $C_p$  tidak signifikan, sehingga *pressure drop* kedua variasi ini hampir sama. Berdasarkan perhitungan, *pressure drop* untuk variasi  $\frac{s}{d} = 15$  saat  $C_p$  minimum yaitu  $-184.368$  Pa, dan variasi  $\frac{s}{d} = 20$  yaitu  $-184.41$  Pa. Nilai  $C_p$  dari kedua variasi ini lebih kecil dibandingkan variasi sebelumnya.

Gambar 4.15 menunjukkan grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) pada *lower wall*. Pada grafik tersebut terdapat nilai  $C_f$  yang negatif. Nilai negatif ini dikarenakan terdapat *back flow* pada rentang jarak ( $\frac{x}{h}$ ) tersebut. Dalam Gambar 4.15 terlihat area nilai  $C_f$  negatif yang dibentuk grafik variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  lebih lebar dibandingkan grafik variasi lainnya. Area yang dibentuk saat  $C_f$  bernilai negatif,

mengindikasikan adanya daerah *separation bubble*. Sehingga dapat dikatakan daerah *separation bubble* untuk  $\frac{s}{d} = 7$  lebih lebar dibandingkan variasi jarak lainnya.

Seperti yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya, saat nilai  $C_f = \text{ nol}$  menunjukkan titik *reattachment*. Dalam Gambar 4.15 terlihat saat  $C_f = \text{ nol}$  untuk variasi  $\frac{s}{d} = 7$ , jarak  $\frac{x}{h}$  yang didapatkan paling jauh. Sedangkan untuk variasi  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20, jarak  $\frac{x}{h}$  yang didapatkan saling berhimpitan dan paling dekat. Hal ini sesuai dengan Tabel 4.4 bahwa panjang *reattachment* untuk variasi  $\frac{s}{d} = 7$  adalah paling jauh dan untuk variasi  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 paling dekat.



Gambar 4.15 Grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward facing step*

Setelah melewati nilai nol, grafik distribusi  $C_f$  naik hingga mencapai nilai yang konstan atau tidak mengalami perubahan. Nilai  $C_f$  konstan disebabkan pengaruh dari daerah *separation bubble* sudah tidak ada lagi, sehingga kecepatan di titik – titik tersebut sudah seragam. Dalam Gambar 4.15 terlihat untuk variasi  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 lebih cepat mencapai nilai  $C_f$  yang konstan dibandingkan variasi  $\frac{s}{d} = 7$  dan 10. Hal ini menunjukkan daerah *separation bubble* yang dibentuk pada variasi  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 lebih kecil dibandingkan variasi lainnya, sehingga aliran lebih cepat mencapai kecepatan seragam.

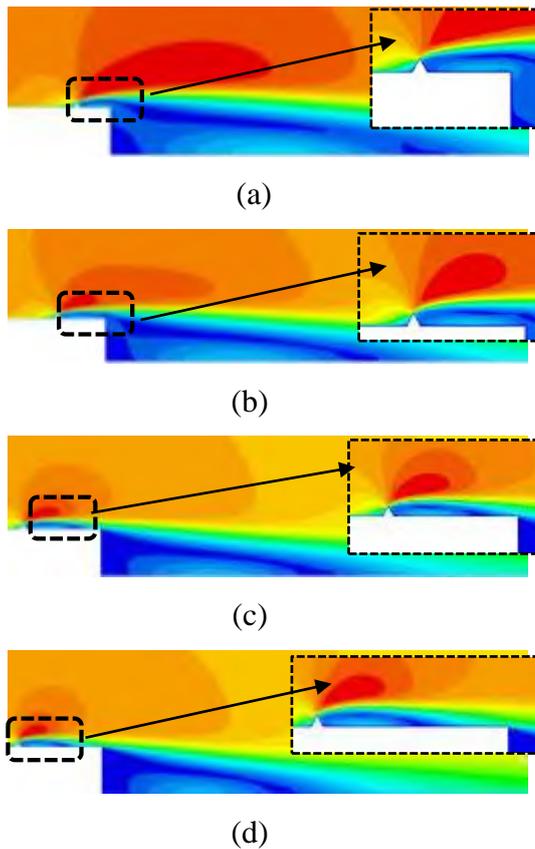
#### 4.4.2 Karakteristik Aliran pada *Backward-Facing Step* dengan Penambahan

##### *Triangular Bump* $\frac{d}{h} = 0.1$

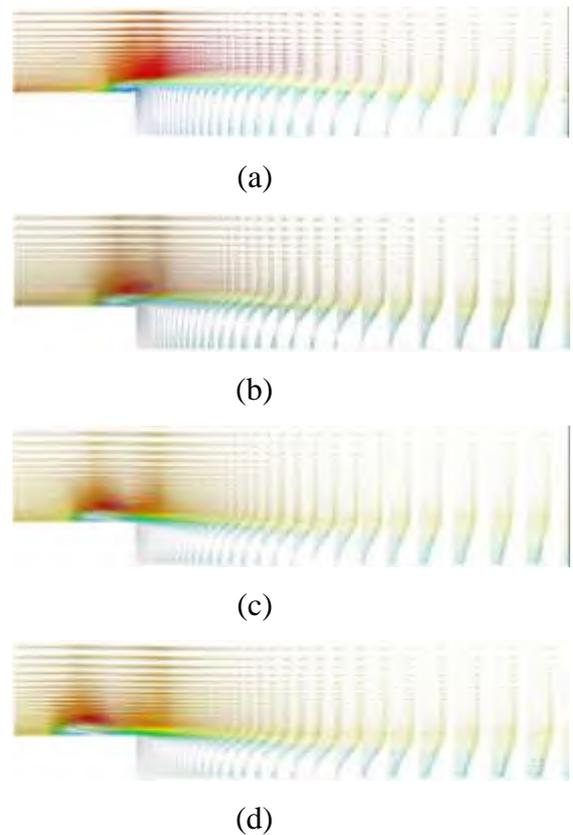
Pada sub bab ini akan dibahas karakteristik aliran *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump* pada ketinggian  $\frac{d}{h} = 0.1$ . Ketinggian *triangular bump* dirubah agar dapat diketahui pengaruh dari ketinggian *triangular bump* terhadap aliran *backward-facing step* pada variasi jarak yang sama. Fenomena fisis yang akan diuraikan pada bagian ini diawali dengan melakukan *interpretasi* pada data kualitatif berupa visualisasi aliran kontur kecepatan dan diperjelas dengan vektor kecepatan dan *velocity pathline*. Data kuantitatif panjang *reattachment* dan distribusi profil kecepatan ditampilkan untuk memperkuat penjelasan fenomena dari data kualitatif. Visualisasi kontur tekanan, grafik distribusi *pressure coefficient* dan grafik distribusi *skin friction* diberikan untuk mengetahui perubahan tekanan yang terjadi pada daerah *downstream* akibat penambahan *triangular bump*.

Gambar 4.16 dan 4.17 menunjukkan visualisasi aliran berupa kontur kecepatan dan vektor kecepatan pada aliran *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$ . Seperti yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya, keberadaan pengganggu yang ditempatkan pada sisi *upstream* sebelum *backward-facing step* sangat mempengaruhi kecepatan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Gambar 4.16 menunjukkan aliran saat mengenai *triangular bump*

mengalami separasi lebih dulu di puncak *triangular bump* sebelum terseparasi pada tepi *backward-facing step*. Hal ini ditunjukkan adanya peningkatan kecepatan di ujung puncak *triangular bump* yang ditampilkan dengan warna merah sehingga aliran menjadi lebih turbulent setelah melewati pengganggu. Peningkatan kecepatan terbesar terjadi saat jarak *triangular bump* terdekat yaitu  $\frac{s}{d} = 7$  dan terkecil pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$ .



**Gambar 4.16** Kontur kecepatan dengan variasi *triangular bump* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ , (b)  $\frac{s}{d} = 10$ , (c)  $\frac{s}{d} = 15$ , (d)  $\frac{s}{d} = 20$



**Gambar 4.17** Vektor kecepatan dengan variasi *triangular bump* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ , (b)  $\frac{s}{d} = 10$ , (c)  $\frac{s}{d} = 15$ , (d)  $\frac{s}{d} = 20$

Saat diamati, area peningkatan kecepatan setelah terseparasi oleh puncak *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  untuk Gambar 4.16 (a) lebih kecil dibandingkan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  yaitu Gambar 4.6 (a). Hal ini menunjukkan perubahan ketinggian *bump* mempengaruhi peningkatan kecepatan yang terseparasi tepat di puncak

bump. Saat jarak *triangular bump* digeser menjauhi dari *backward-facing step*, area peningkatan kecepatan yang terseparasi di puncak *triangular bump* berkurang. Pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 dapat dilihat Gambar 4.16 (c) dan (d) bahkan terlihat peningkatan kecepatan ini paling kecil.

Adanya *triangular bump* di depan *backward-facing step* menimbulkan *vorteks* kecil dibelakang *bump*, sehingga kecepatan menjadi turun yang ditampilkan dengan warna biru pada Gambar 4.16. Untuk Gambar 4.16 (a) dan Gambar 4.16 (b) terlihat jarak *bump* yang berdekatan dengan *backward-facing step* mengakibatkan aliran didalam *vorteks* mengalami penggabungan dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Menyatunya *vorteks* ini menyebabkan kecepatan sesaat setelah terseparasi masih cukup besar yaitu yang ditampilkan warna biru sedikit tua. Kecepatan yang cukup besar ini dikarenakan pada tepi *backward-facing step* masih dipengaruhi aliran *backflow* dari *vorteks* tersebut. Hal ini ditandai dengan nilai *shape factor* melebihi 2.5 yang akan dibahas pada sub bab berikutnya. Meskipun kedua variasi jarak ini menyebabkan kecepatan aliran yang terseparasi cukup besar, akan tetapi area kecepatan yang dibentuk jarak  $\frac{s}{d} = 10$  lebih sempit dibandingkan jarak  $\frac{s}{d} = 7$ . Hal tersebut mengakibatkan momentum yang dimiliki aliran yang terseparasi pada jarak  $\frac{s}{d} = 7$  lebih lebar, sehingga daerah *separation bubble* yang ditampilkan kontur kecepatan berwarna biru juga lebih luas.

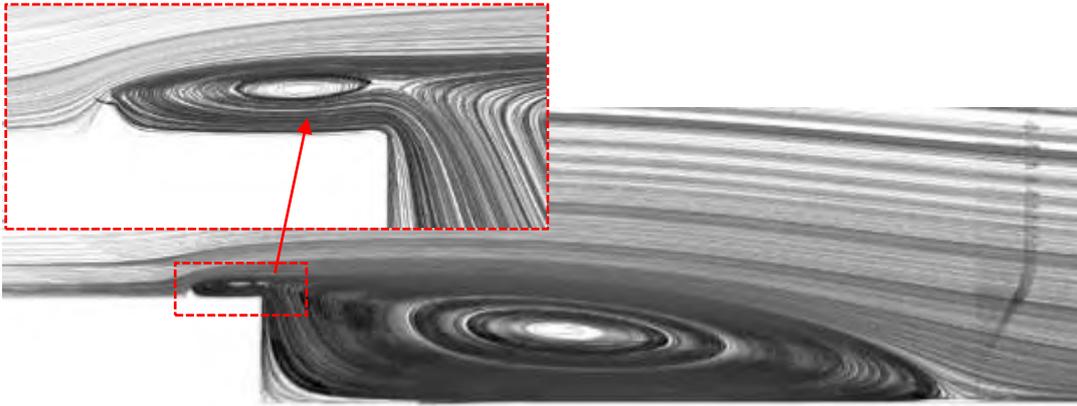
Untuk Gambar 4.16 (c) dan (d), terlihat jarak *bump* yang jauh mengakibatkan *vorteks* yang terbentuk tidak langsung menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Hal ini membuat kecepatan setelah terseparasi lebih kecil dibandingkan variasi jarak sebelumnya. Pada kontur kecepatan, area kecepatan setelah terseparasi ditampilkan dengan warna biru tua. Area kecepatan tersebut menyebabkan momentum aliran yang terseparasi kecil, sehingga membuat daerah *separation bubble* pada *downstream* bergerak menyempit.

Pada Gambar 4.17 menunjukkan vektor kecepatan daerah di dekat dengan dinding *backward-facing step* bernilai sangat kecil sesuai dengan hasil kontur kecepatan yang ditampilkan berwarna biru tua. Hal ini ditunjukkan dengan panjang vektor kecepatan yang kecil. Untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  yang dapat dilihat

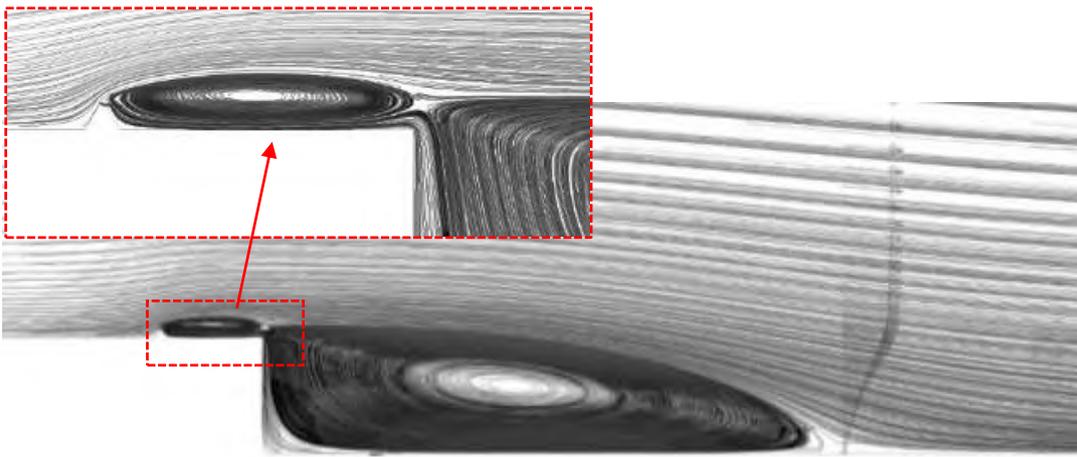
Gambar 4.17 (c) dan (d), aliran *backflow* yang ditampilkan dengan vektor kecepatan ke kiri lebih cepat untuk pulih dibandingkan variasi jarak yang lain. Hal ini ditunjukkan letak titik *reattachment* pada dua variasi ini lebih dekat dengan *backward-facing step*. Titik *reattachment* yaitu titik dimana panjang vektor kecepatan di *lower wall* mendekati nol. Saat dikorelasikan dengan kontur kecepatan ditunjukkan dengan tanda lingkaran merah yang ditampilkan warna biru tua.

Selain kontur kecepatan dan vektor kecepatan, untuk menginterpretasi kan data kualitatif juga digunakan *velocity pathline*. Pada *velocity pathline*, yang diamati adalah bagian daerah *separation bubble* dan *vorteks* yang terbentuk di belakang *triangular bump*. Selain itu vektor kecepatan tepat di titik *reattachment* juga diperlihatkan.

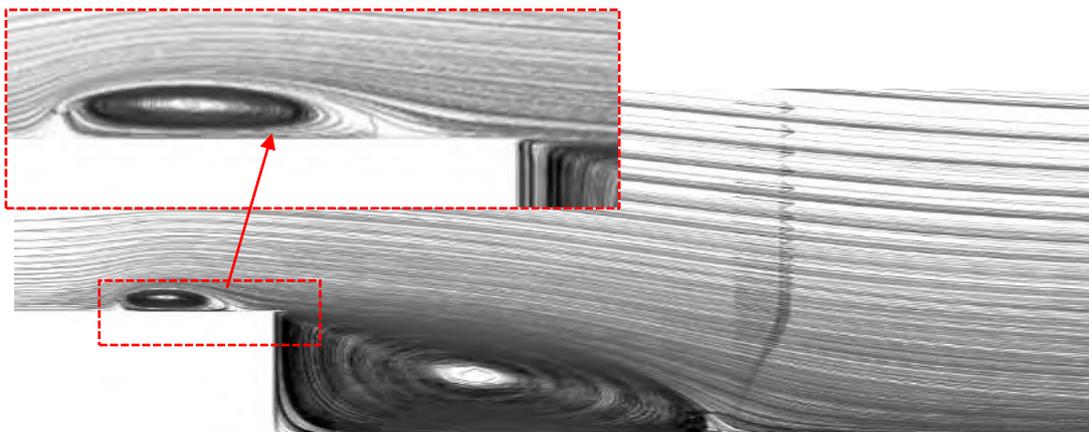
Gambar 4.18 menunjukkan *velocity pathline* dan vektor kecepatan tepat di titik *reattachment*. Sama halnya pada *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$ , terlihat vektor kecepatan bergeser mendekati dinding *backward-facing step*. Hal tersebut menunjukkan meskipun tinggi *triangular bump* dirubah lebih besar, panjang *reattachment* tetap bergeser menjadi lebih pendek seiring jarak *triangular bump* digeser menjauhi tepi *backward-facing step*. Saat jarak *triangular bump*  $\frac{s}{d} = 7$  (Gambar 4.18 (a)) nampak daerah *separation bubble* paling besar dibandingkan variasi jarak yang lain. Dikarenakan tinggi bump yang lebih tinggi, *vorteks* yang terbentuk di belakang *bump* juga menjadi lebih besar dibandingkan penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$ . *Vorteks* tersebut menyatu dengan aliran yang terseparasi di tepi *backward-facing step* sehingga memberikan dampak *shear layer* yang lebih berkembang pada daerah *downstream*. Dibandingkan dengan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  (Gambar 4.11 (a)), perkembangan *shear layer* akibat *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  sedikit lebih besar. Perkembangan *shear layer* ini menyebabkan *pressure drop* yang besar di dalamnya. Panjang *reattachment* yang diwakilkan dengan vektor kecepatan terlihat berada paling jauh pada variasi jarak ini. Besar panjang *reattachment* dapat dilihat dalam Tabel 4.4.



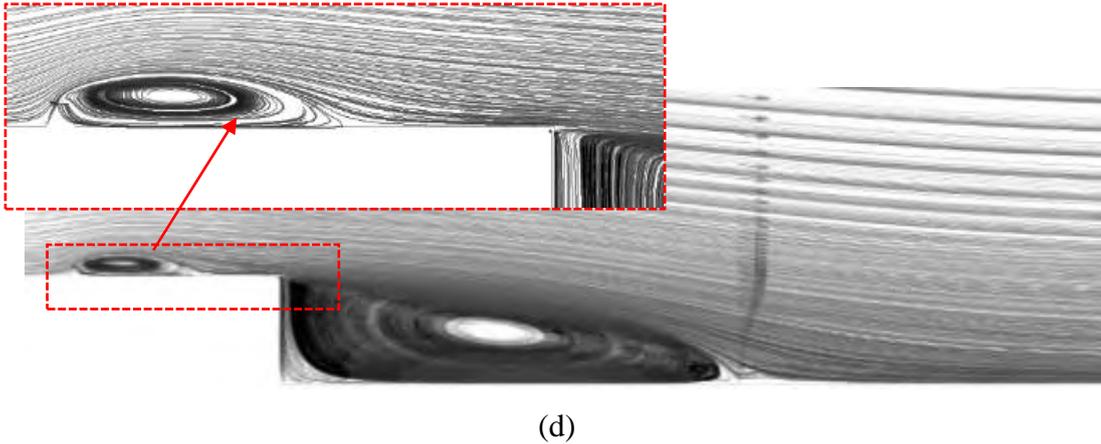
(a)



(b)



(c)



**Gambar 4.18** *Velocity pathline* dan vektor kecepatan pada *backward facing step* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ ,  
(b)  $\frac{s}{d} = 10$ , (c)  $\frac{s}{d} = 15$ , (d)  $\frac{s}{d} = 20$

Saat jarak *triangular bump* digeser menjauhi *backward-facing step* yaitu pada jarak  $\frac{s}{d} = 10$  (Gambar 4.18 (b)) *vorteks* yang terbentuk sudah tidak banyak yang menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Sama yang terjadi pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  untuk ketinggian *bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$ , hal tersebut memberikan pengaruh kecil pada perkembangan *shear layer* di daerah *downstream*. Perkembangan *shear layer* ini menyebabkan daerah *separation bubble* juga menjadi lebih kecil. Pada Gambar 4.18 (b) terlihat vektor kecepatan di titik *reattachment* jauh berada di sebelah kiri dibandingkan vektor kecepatan yang ditampilkan pada Gambar 4.18 (a).

Gambar 4.11 (c) dan (d) menunjukkan *vorteks* yang terbentuk dibelakang *triangular bump* tidak langsung menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step*. Jarak *triangular bump* yang cukup jauh dari tepi *backward-facing step* membuat aliran yang terseparasi oleh puncak *bump* mengalami *reattachment* terlebih dulu sebelum terseparasi oleh *backward-facing step*. Kedua variasi jarak ini memberikan pengaruh pada perkembangan *shear layer* daerah *downstream* cenderung mengecil. Hal ini dapat dilihat dari daerah *separation bubble* yang terbentuk lebih kecil dibandingkan variasi sebelumnya. Vektor kecepatan yang ditampilkan tepat di titik *reattachment* berada paling dekat terhadap

*backward-facing step*. Pengaruh dari jarak *bump* yang jauh terhadap *backward-facing step*, baik antara  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan  $\frac{d}{h} = 0.1$  memberikan panjang *reattachment* yang lebih pendek dibandingkan jarak *bump* yang lain. Panjang *reattachment* untuk variasi  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 dapat dilihat dari Tabel 4.4.

**Tabel 4.4 Panjang *reattachment* pada *backward-facing step* dengan penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$**

Variasi Jarak <i>Triangular Bump</i> ( $\frac{s}{d}$ )	Panjang <i>Reattachment</i> ( $\frac{x_r}{h}$ )
7	6.95
10	5.78
15	4.52
20	4.66

Tabel 4.4 menunjukkan perbandingan panjang *reattachment* terhadap variasi jarak *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$ . Pada jarak  $\frac{s}{d} = 7$  memberikan panjang *reattachment* yang paling panjang yaitu  $\frac{x_r}{h} = 6.95$ , dan pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$  memberikan panjang *reattachment* paling pendek yaitu  $\frac{x_r}{h} = 4.52$ . Berbeda dengan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  dimana panjang *reattachment* paling pendek saat jarak  $\frac{s}{d} = 20$ . Perubahan ketinggian *bump* dari  $\frac{d}{h} = 0.05$  menjadi  $\frac{d}{h} = 0.1$  menyebabkan *vorteks* yang terbentuk dibelakang *bump* menjadi lebih besar. Hal tersebut membuat intensitas turbulen aliran setelah melewati *bump* meningkat, sehingga saat jarak *bump*  $\frac{s}{d} = 15$  sudah memberikan panjang *reattachment* yang paling pendek. Saat jarak *bump* dijauhkan, malah membuat panjang *reattachment* bergeser sedikit menjauhi *backward-facing step*. Meskipun begitu, perubahan panjang *reattachment* untuk kedua jarak ini tidak terlalu signifikan.

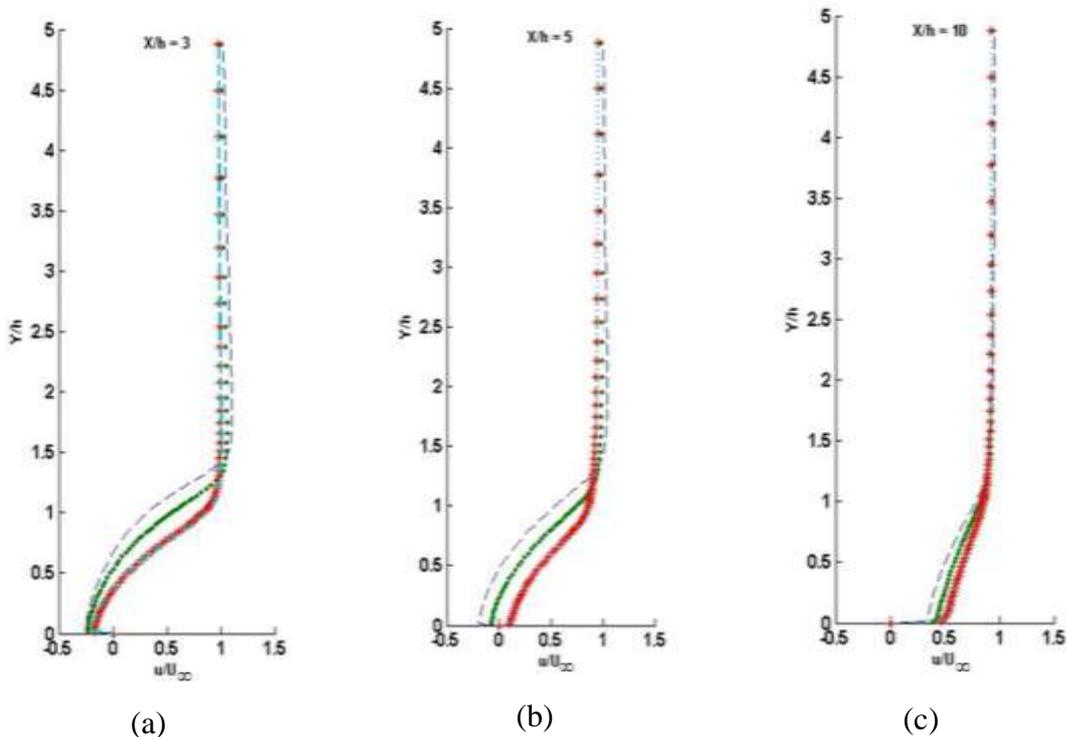
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, panjang *reattachment* yang besar menunjukkan daerah *separation bubble* yang besar juga. Adanya *vorteks* utama atau *separation bubble* ini membuat *losses* pada aliran *backward-facing step*.

Berdasarkan perbandingan panjang *reattachment* pada Tabel 4.5 jarak *triangular bump* yang optimum yaitu variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$ . Hal ini dikarenakan pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$ , panjang *reattachment* paling pendek sehingga *losses* yang terjadi pada aliran *backward-facing step* juga paling kecil.

Pada Gambar 4.19 menunjukkan profil vektor kecepatan di beberapa titik  $\frac{x}{h}$  pada *downstream*. Ada 3 titik yang diambil yaitu  $\frac{x}{h} = 3, 5$  dan  $10$ , dikarenakan 3 titik tersebut sudah mewakili profil vektor kecepatan sebelum dan sesudah *reattachment*. Gambar 4.19 (a) tampak bahwa pada  $\frac{x}{h} = 3$  dari keempat variasi jarak terdapat nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  yang bernilai negatif. Nilai negatif ini menunjukkan masih terdapat *backflow* sehingga arah vektor kecepatan ke kiri atau negatif. Adanya *backflow* tersebut menunjukkan pada jarak  $\frac{x}{h} = 3$  belum terjadi *reattachment*. Berdasarkan Gambar 4.19 (a) grafik variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  terlihat lebih lambat untuk mencapai kecepatan yang seragam, sedangkan grafik variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $20$  lebih cepat untuk mencapai kecepatan seragam. Hal tersebut dikarenakan tinggi daerah *separation bubble* pada jarak  $\frac{s}{d} = 7$  lebih tinggi, sehingga untuk melewati *shear layer* agar kecepatannya mencapai  $u = 0.99U_\infty$  membutuhkan tinggi ( $\frac{y}{h}$ ) yang lebih besar juga. Ketinggian  $\frac{y}{h}$  saat  $u = 0.99U_\infty$  disebut *boundry layer thickness*.

Gambar 4.19 (b) menunjukkan grafik profil vektor kecepatan pada variasi jarak  $\frac{x}{h} = 5$ . Pada Gambar 4.19 (b) tampak terlihat nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  sudah dimulai diatas nol untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $20$ . Berarti pada titik tersebut, untuk kedua variasi jarak ini sudah terjadi *reattachment* sehingga tidak ada arah vektor kecepatan yang ke kiri atau negatif. Sedangkan untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  dibawah nol masih terlihat cukup besar. Hal ini menunjukkan untuk jarak  $\frac{s}{d} = 7$  titik *reattachment* masih cukup jauh dari titik  $\frac{x}{h} = 5$  sehingga masih terdapat *backflow* yang cukup besar. Pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  walaupun hanya sedikit, masih ada nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  yang

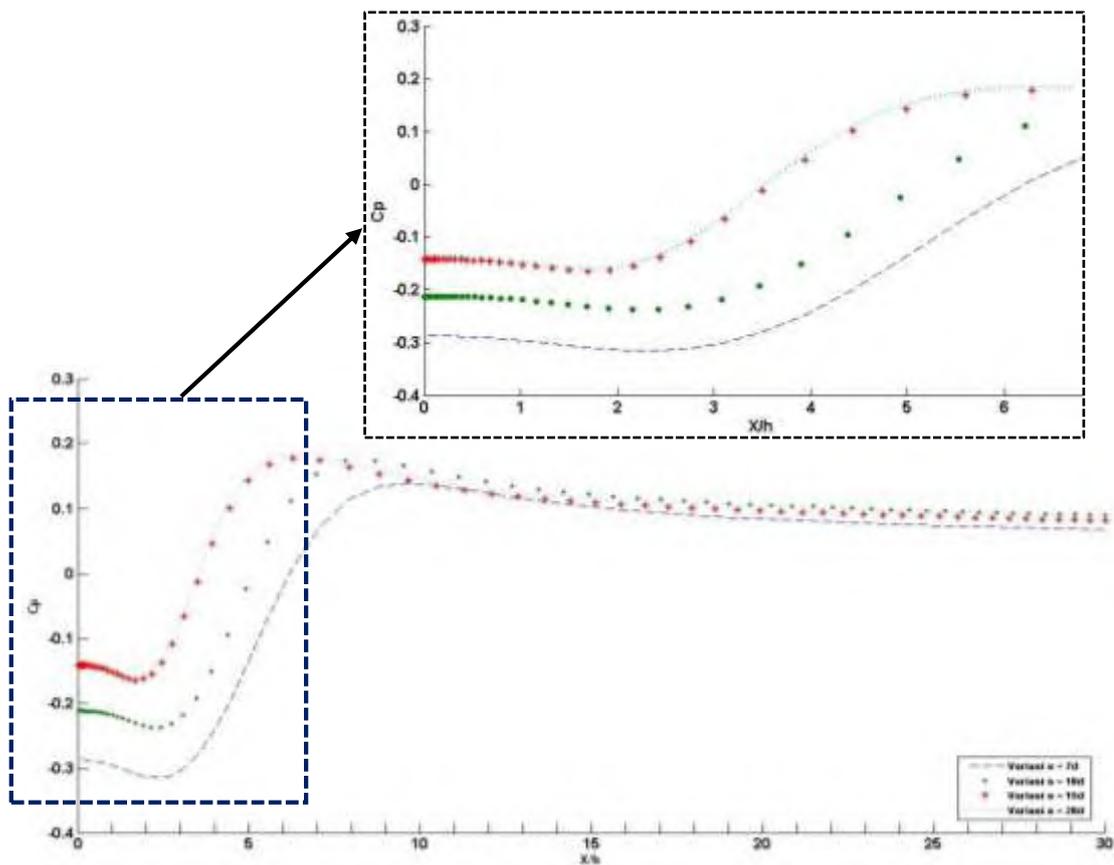
dibawah nol. Nilai yang sedikit ini dikarenakan titik *reattachment* untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  berdekatan dengan titik pengambilan data.



**Gambar 4.19** Grafik vektor kecepatan aliran *backward facing step* di titik (a)  $\frac{x}{h} = 3$ , (b)  $\frac{x}{h} = 5$ , (c)  $\frac{x}{h} = 10$  --- variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$ ; ● variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$ ; \* variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$ ; ... variasi jarak  $\frac{s}{d} = 20$ .

Gambar 4.19 (c) menunjukkan grafik profil vektor kecepatan pada variasi jarak  $\frac{x}{h} = 10$ . Pada gambar tersebut terlihat setiap grafik untuk masing – masing variasi jarak nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  sudah dimulai diatas nol. Nilai  $\frac{u}{U_\infty}$  yang dimulai positif menunjukkan pada titik  $\frac{x}{h} = 10$  semua variasi jarak telah melewati titik *reattachment*. Dilihat pada Gambar 4.19 (c) grafik untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  tertinggal dibandingkan grafik variasi jarak yang lain. Hal tersebut menunjukkan besar kecepatan pada titik  $\frac{y}{h}$  tertentu untuk variasi  $\frac{s}{d} = 7$  lebih kecil dibandingkan variasi lainnya.

Visualisasi grafik distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) dan kontur tekanan diberikan untuk menganalisa *pressure drop* yang terjadi pada daerah *downstream*. Distribusi nilai  $C_p$  diambil pada *lower wall* dari  $\frac{x}{h} = 0$  sampai  $\frac{x}{h} = 30$ . Grafik ini nantinya akan dikorelasikan dengan kontur tekanan sehingga akan didapatkan analisa *pressure drop* yang terjadi, dimana *pressure drop* ini mempengaruhi perkembangan *shear layer* pada daerah *downstream*.



**Gambar 4.20** Grafik distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward-facing step*

Pada Gambar 4.20 menunjukkan distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) pada *lower wall backward-facing step*. Berdasarkan gambar tersebut terlihat distribusi nilai  $C_p$  saat  $\frac{x}{h} < 10$  untuk grafik variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  berada paling bawah dibandingkan grafik variasi lainnya, sedangkan untuk grafik variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  berada paling atas. Grafik yang terbawah ini menunjukkan *pressure drop*

pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  lebih besar dibandingkan *pressure drop* variasi lainnya. Berdasarkan Gambar 4.20 pada awalnya keempat grafik mengalami tren *line* turun pada jarak  $\frac{x}{h} < 3$  yang menandakan terjadinya akselerasi hingga nilai  $C_p$  minimum. Nilai  $C_p$  minimum mengindikasikan terjadinya akselerasi maksimum. Untuk  $\frac{s}{d} = 7$  nilai  $C_p$  minimum terjadi saat  $\frac{x}{h} = 2.45$  yaitu -0.315 dan untuk  $\frac{s}{d} = 10$  nilai  $C_p$  minimum terjadi saat  $\frac{x}{h} = 2.42$  yaitu -0.237. Sedangkan untuk  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  nilai  $C_p$  minimum bergeser sedikit kekiri yaitu saat  $\frac{x}{h} = 1.69$  dan  $\frac{x}{h} = 1.71$  yang masing – masing bernilai 0.164 dan 0.159.

Berdasarkan perhitungan dengan Persamaan 3.6 saat  $C_p$  minimum untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  didapatkan *pressure drop* yaitu -377.5 Pa. Sedangkan untuk variasi jarak yang lain *pressure drop* masing – masing didapatkan besarnya yaitu -284.2 Pa, -196.8 Pa, dan -191.0 Pa. Terlihat *pressure drop* pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  paling besar sedangkan pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 paling kecil dan tidak berbeda jauh. Hal tersebut mengakibatkan *vorteks* utama atau *separation bubble* yang terjadi pada daerah *downstream* untuk variasi  $\frac{s}{d} = 7$  lebih besar dibandingkan yang lain.

*Pressure drop* yang besar pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  tidak membuat tekanan *static* di titik tersebut paling kecil, namun berdasarkan perhitungan tekanan *static* menunjukkan nilai terbesar dibandingkan variasi jarak yang lain. Hal ini dikarenakan tekanan *inlet* yang besar sehingga mengimbangi *pressure drop* yang besar tersebut. Nilai tekanan *static* variasi jarak ini yaitu 27.34 Pa dan sesuai seperti kontur tekanan Gambar 4.21 (a) yang ditampilkan warna biru sedikit tua. Berbeda untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  walaupun *pressure drop* nya kecil namun berdasarkan perhitungan tekanan *static*nya juga bernilai kecil. Hal ini dikarenakan tekanan *inlet* yang kecil sehingga didapatkan besar tekanan *static* untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  berturut – turut -59.24 Pa dan -56.69 Pa. Berdasarkan kontur tekanan Gambar 4.21 (c) dan (d), nilai tekanan *static* yang kecil ini ditampilkan

warna biru sedikit muda kehijauan. Tekanan yang kecil ini menyebabkan *shear layer* bergerak turun lebih cepat dibandingkan variasi lainnya sehingga titik *reattachment* juga terjadi lebih dahulu.





(d)

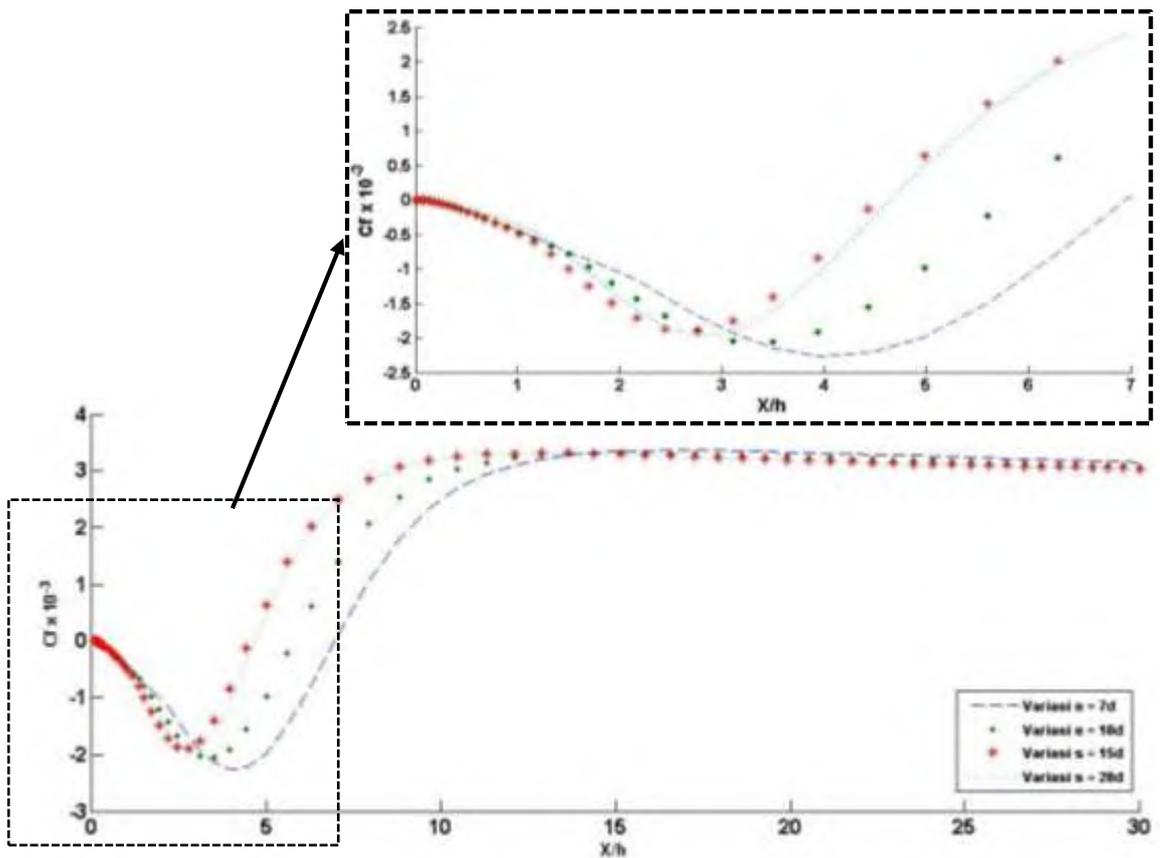
Gambar 4.21 Kontur tekanan dengan variasi jarak *triangular bump* (a)  $\frac{s}{d} = 7$ , (b)  $\frac{s}{d} = 10$ ,

(c)  $\frac{s}{d} = 10$ , (d)  $\frac{s}{d} = 20$

Data kuantitatif juga ditampilkan dalam grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ). Gambar 4.22 menunjukkan grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  pada *lower wall*. Nilai  $C_f$  memberikan informasi besarnya *wall shear stress* pada titik – titik *lower wall*. Dalam Gambar 4.22 distribusi nilai  $C_f$  terdapat nilai dibawah nol atau negatif. Nilai  $C_f$  yang negatif ini disebabkan pada rentan jarak  $\frac{x}{h}$  tersebut adanya *backflow* sehingga nilai *wall shear stress* bernilai negatif. Luas area yang dibentuk antara grafik saat nilai  $C_f$  negatif dengan garis saat nilai  $C_f$  nol menunjukkan area daerah *separation bubble*. Pada Gambar 4.22 terlihat luas area ini untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  paling besar sehingga dapat dikatakan daerah *separation bubble* juga paling besar. Hal tersebut sesuai dengan hasil *velocity pathline* Gambar 4.18 yang telah dibahas sebelumnya. Untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  terlihat kedua grafik saling berhimpit sehingga luas area yang dibentuk tidak berbeda jauh dan paling kecil dibandingkan variasi lainnya. Jarak penempatan *triangular bump* yang jauh membuat daerah *separation bubble* yang terbentuk mengecil dan sesuai dengan hasil *velocity pathline* Gambar 4.18.

Gambar 4.22 juga menunjukkan untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  mencapai nilai  $C_f = 0$  berada paling jauh dibandingkan variasi lainnya. Sedangkan untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10, 15$  dan  $20$  saat mencapai nilai  $C_f = 0$  bergeser mendekat ke kiri. Jarak  $\frac{x}{h}$  yang dicapai saat nilai  $C_f = 0$  menunjukkan panjang *reattachment*. Hal ini seperti yang

dijelaskan pada sub bab sebelumnya, nilai  $C_f = 0$  menunjukkan titik *reattachment* sehingga semakin jauh grafik mencapai nilai  $C_f = 0$  maka semakin panjang *reattachment* yang didapatkan. Berdasarkan Gambar 4.22 dikarenakan grafik variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  mencapai nilai  $C_f = 0$  berada paling jauh, maka panjang *reattachment* juga terbesar. Sedangkan untuk grafik variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  saat mencapai nilai  $C_f = 0$  berada paling dekat, maka panjang *reattachment* yang didapatkan juga paling kecil. Hal ini sesuai dengan hasil perbandingan panjang *reattachment* yang ditampilkan Tabel 4.5.



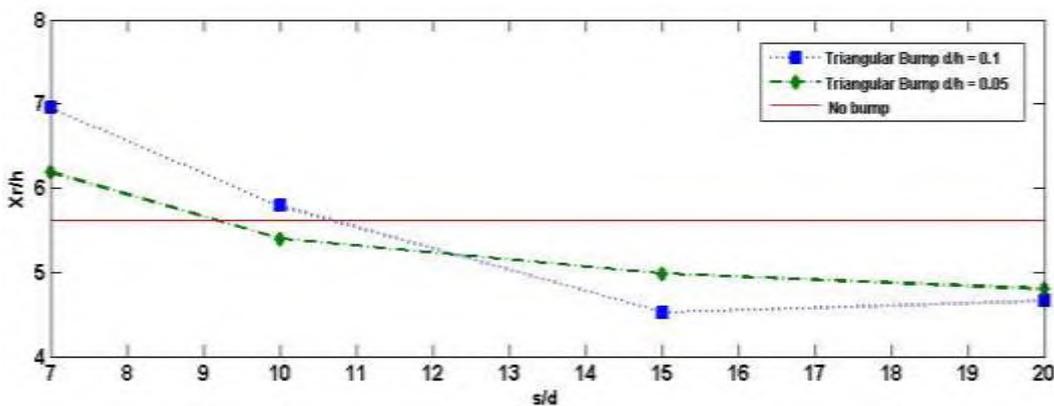
Gambar 4.22 Grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward-facing step*

#### 4.5 Perbandingan Fenomena Aliran pada *Backward-Facing Step* tanpa Penambahan *Triangular Bump* dengan Penambahan *Triangular Bump*

Pada subbab ini akan dibahas perbandingan fenomena yang terjadi pada *backward-facing step* tanpa penambahan *triangular bump* dan penambahan *triangular bump* pada ketinggian yang berbeda dan variasi jarak *triangular bump* yang berbeda. Parameter yang akan dibandingkan di sini adalah panjang *reattachment*, grafik distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), grafik distribusi *skin frictin* ( $C_f$ ), dan *shape factor*.

##### 4.5.1 Analisa Perbandingan Panjang *Reattachment* ( $\frac{x_r}{h}$ )

Titik *reattachment* merupakan salah satu paramater penting dalam aliran *backward-facing step*. Jarak horizontal antara bagian bawah *backward-facing step* dengan titik *reattachment* didefinisikan sebagai panjang *reattachment*. Dalam pembahasan berikut panjang *reattachment* dibuat *non dimensionles* ( $\frac{x_r}{h}$ ). Panjang *reattachment* pada masing – masing variasi jarak ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Perbandingan panjang *reattachment* ( $\frac{x_r}{h}$ ) pada *backward-facing step* dengan jarak *triangular bump* ( $\frac{s}{d}$ )

Dari Gambar 4.23 dapat dilihat bahwa semakin jauh jarak *triangular bump* maka panjang *reattachment* cenderung berkurang lebih kecil. Hal ini dapat dilihat dari kecenderungan tren line dari masing masing grafik penambahan *triangular bump* bergerak turun. Untuk penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$ , pada jarak  $\frac{s}{d} \geq 10$  memberikan panjang *reattachment* lebih pendek dibandingkan tanpa

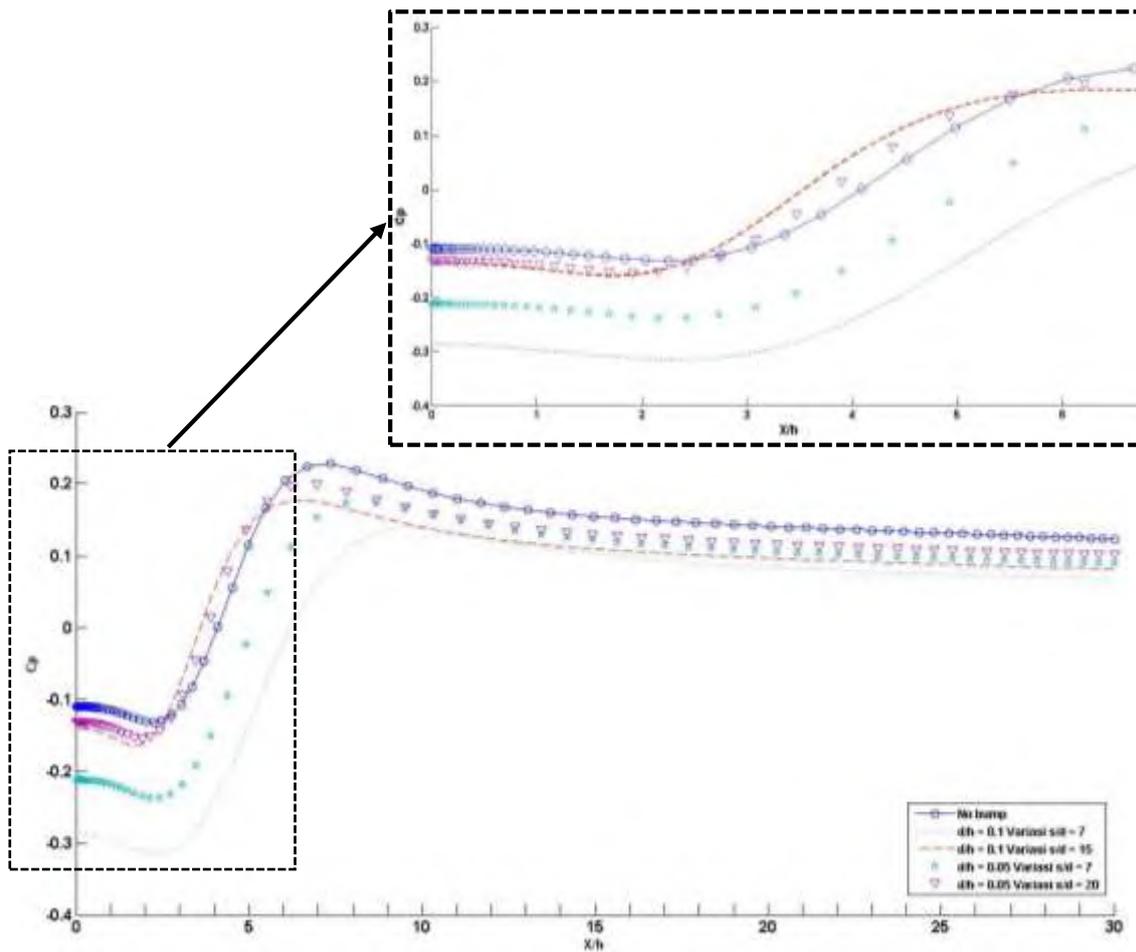
penambahan *bump*. Sedangkan untuk penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  dengan jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  memberikan panjang *reattachment* yang lebih pendek dibandingkan tanpa penambahan *bump*.

Untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  pada penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$ , terlihat panjang *reattachment* lebih kecil dibandingkan tanpa penambahan *triangular bump*, sedangkan pada penambahan *bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  memberikan panjang *reattachment* lebih besar dibandingkan tanpa penambahan *bump*. Perubahan ketinggian *triangular bump* membuat *vorteks* yang terbentuk dibelakang *bump* lebih besar, sehingga untuk  $\frac{d}{h} = 0.1$  *vorteks* yang menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step* lebih banyak dibandingkan  $\frac{d}{h} = 0.05$ . Hal ini akan dijelaskan pada pembahasan *shape factor* pada sub bab selanjutnya. Pada jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dengan penambahan *triangular bump* sama – sama memberikan panjang *reattachment* yang lebih besar dibandingkan tanpa penambahan *bump*. Hal tersebut dikarenakan pada jarak  $\frac{s}{d} = 7$  aliran yang terseparasi di puncak *triangular bump* belum sempat *reattachment* namun sudah terseparasi lagi oleh *backward-facing step*.

Nilai panjang *reattachment* terkecil terdapat pada jarak  $\frac{s}{d} = 20$  untuk  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$  untuk  $\frac{d}{h} = 0.1$ . Hal ini berarti bahwa konfigurasi ini merupakan yang paling optimum dalam mereduksi panjang *reattachment*. Antara penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  dengan  $\frac{d}{h} = 0.1$  yang optimum memberikan panjang *reattachment* kecil adalah  $\frac{d}{h} = 0.1$ .

#### **4.5.2 Analisa Perbandingan Distribusi Pressure Coefficient (Cp)**

Grafik distribusi *pressure coefficient* (Cp) ditampilkan untuk melihat distribusi tekanan yang terjadi di sepanjang *lower wall* daerah *downstream* pada setiap pergeseran variasi jarak ( $\frac{s}{d}$ ). Grafik distribusi *pressure coefficient* (Cp) dengan variasi jarak ditunjukkan pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Grafik distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward-facing step*

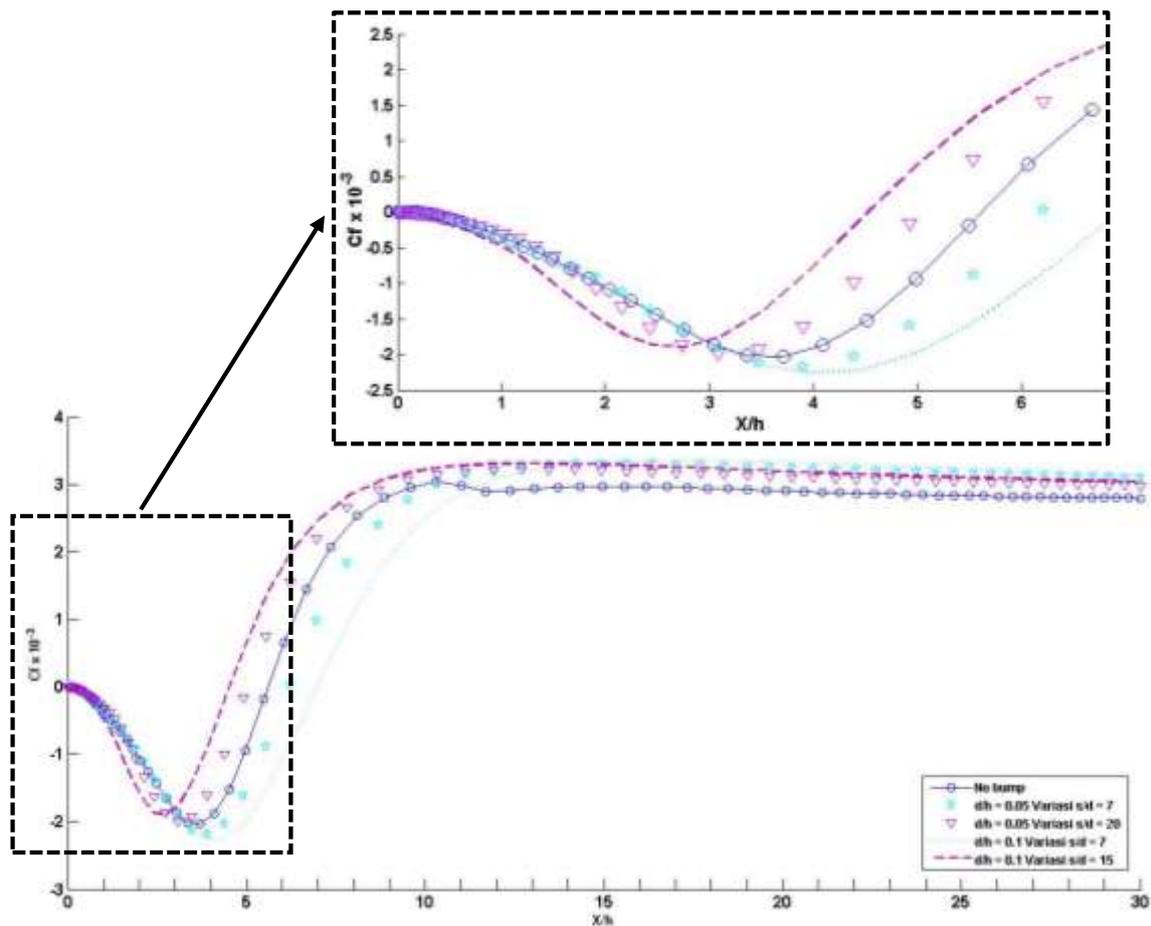
Dalam Gambar 4.24 ditampilkan perbandingan grafik distribusi *pressure coefficient* tanpa penambahan *triangular bump*, penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan 20, dan penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan 15. Secara keseluruhan nilai  $C_p$  dengan penambahan *triangular bump* lebih kecil dibandingkan tanpa penambahan *triangular bump*. Hal ini menunjukkan dengan penambahan *triangular bump* membuat *pressure drop* di daerah *downstream* lebih meningkat. Untuk tanpa penambahan *bump*, di  $C_p$  minimum besar *pressure drop* yaitu -157.97 Pa. Saat di tambahkan *triangular bump* nilai *pressure drop* menjadi -377.507 Pa, -196.47 Pa untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} =$

7 dan 15 dengan  $\frac{d}{h} = 0.1$ , sedangkan *pressure drop* untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan 15 dengan  $\frac{d}{h} = 0.05$  yaitu -277.72 Pa dan -184.41 Pa. Namun untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan 20 pada rentang jarak  $3 < \frac{x}{h} < 5.5$  nilai distribusi  $C_p$  lebih besar sedikit dibandingkan tanpa penambahan *bump*, sehingga *pressure drop* pada rentang daerah tersebut lebih kecil. Hal tersebut mengakibatkan *shear layer* bergerak turun lebih cepat menuju *lower wall*. *Shear layer* yang bergerak turun lebih cepat membuat titik *reattachment* terjadi dahulu dibandingkan tanpa penambahan *bump*, dimana sesuai dengan hasil perbandingan panjang *reattachment* yang dibahas sebelumnya.

Pada gambar 4.24 nampak juga untuk grafik  $\frac{d}{h} = 0.1$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  memiliki besar  $C_p$  paling kecil untuk jarak  $\frac{x}{h} < 10$ . Nilai  $C_p$  yang paling kecil mengindikasikan *pressure drop* yang terjadi paling besar. Hal ini mengakibatkan pembentukan daerah *separation bubble* pada variasi ini lebih besar dibandingkan tanpa penambahan *bump*, sehingga panjang *reattachment* juga lebih besar. Saat jarak  $\frac{x}{h} > 12$  terlihat distribusi  $C_p$  masing masing grafik sudah mendekati nilai konstan. Namun distribusi  $C_p$  *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  lebih besar dibandingkan distribusi  $C_p$  *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  untuk masing masing variasi jarak. Hal ini dikarenakan pengaruh perubahan ketinggian *triangular bump* dari  $\frac{d}{h} = 0.05$  menjadi 0.1 sehingga aliran setelah melewati pengganggu lebih turbulente. Peningkatan turbulensi aliran ini akan dibahas pada sub bab berikutnya perbandingan *shape factor*.

### 4.5.3 Analisa Perbandingan Distribusi *Skin friction* ( $C_f$ )

Grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) ditampilkan untuk melihat distribusi *wall shear stress* yang terjadi di sepanjang *lower wall* daerah *downstream* pada setiap pergeseran variasi jarak ( $\frac{s}{d}$ ). Grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) dengan variasi jarak ditunjukkan pada Gambar 4.25.



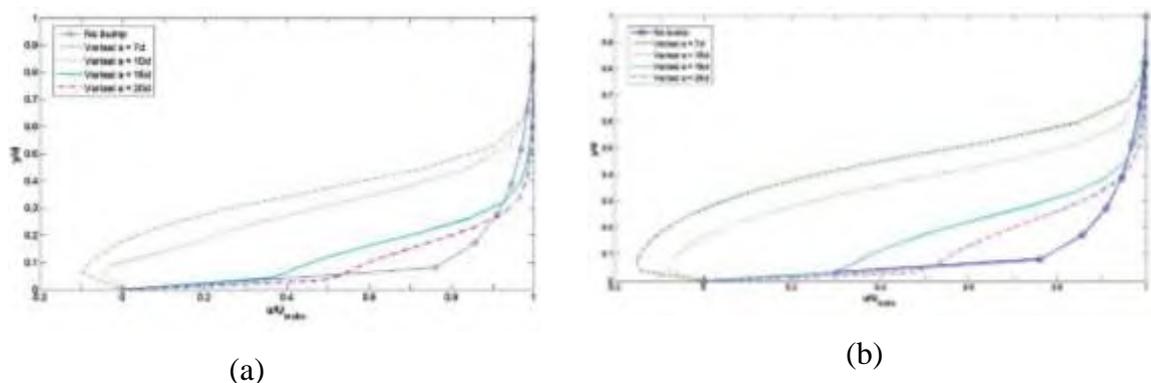
Gambar 4.25 Grafik distribusi *skin friction* ( $C_f$ ) pada *lower wall* dari *iso-surface medspin backward-facing step*

Dalam Gambar 4.25 ditampilkan perbandingan grafik distribusi *skin friction* tanpa penambahan *triangular bump*, penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan  $20$ , serta penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan  $15$ . Pada Gambar 4.25 terlihat area yang terbentuk oleh grafik distribusi  $C_f$  yang berada dibawah nilai nol untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  lebih luas dibandingkan grafik tanpa penambahan *bump*. Sedangkan area yang dibentuk grafik  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  lebih kecil dibandingkan grafik tanpa penambahan *bump*. Hal ini menunjukkan daerah *separation bubble* yang terbentuk lebih luas untuk variasi  $\frac{s}{d} = 7$  dan lebih kecil untuk variasi  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$  dibandingkan tanpa penambahan

*bump*. Grafik distribusi Cf  $\frac{d}{h} = 0.1$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  mencapai nilai nol lebih cepat dibandingkan grafik lainnya. Nilai Cf = nol menunjukkan titik *reattachment* sehingga dapat dikatakan panjang *reattachment* untuk variasi ini paling pendek. Sedangkan grafik distribusi Cf  $\frac{d}{h} = 0.1$  variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  mencapai nilai nol paling jauh dibandingkan grafik lainnya. Hal tersebut menunjukkan panjang *reattachment* untuk variasi ini paling jauh. Hasil distribusi Cf ini sesuai dengan perbandingan panjang *reattachment* yang telah dibahas sebelumnya.

#### 4.5.4 Analisa Perbandingan Shape Factor

Gambar 4.26 menunjukkan grafik distribusi profil kecepatan di titik tepat tepi *backward facing step*. Titik pengambilan data profil kecepatan yaitu di titik  $\frac{x}{h} = 0$ . Grafik distribusi profil kecepatan  $\frac{y}{\delta}$  terhadap  $\frac{u}{U_{maks}}$  tepat pada tepi *backward facing step* diberikan untuk mengetahui pengaruh penambahan *triangular bump* terhadap turbulensi aliran. Aliran saat mengenai *bump* akan terjadi *separation*. Menurut literatur, *separation* ada dua yaitu *separation massive* dan *separation bubble*. *Separation massive* terjadi pada *triangular bump* akibat momentum aliran tidak mampu mengatasi *adverse pressure gradient* dan tegangan geser antara permukaan pengganggu dengan aliran fluida. *Separation bubble* terjadi dibelakang *triangular bump* setelah aliran *reattachment*. Adanya *bump* ini diinginkan meningkatkan turbulensi aliran saat terseparasi oleh tepi *backward facing step* sehingga dapat mereduksi panjang *reattachment* di daerah *downstream*.



Gambar 4.26 Grafik distribusi profil kecepatan ( $\frac{u}{U_{maks}}$ ) pada *backward-facing step* (a)

Penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$ , (b) Penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.1$

*Boundary thickness* ( $\delta$ ) merupakan jarak yang tegak lurus terhadap permukaan batas dimana kecepatan aliran ( $u$ ) =  $0.99U_\infty$ . Hasil simulasi memberikan untuk tanpa penambahan *bump* besar *boundary thickness* ( $\delta$ ) yaitu 2.19 mm. Secara teori panjang *boundary thickness* yaitu  $1/40$  dari panjang sisi *upstream* sehingga di dapatkan  $\delta$  secara teori yaitu 1.27 mm. Perbedaan nilai ini dikarenakan pada hasil simulasi,  $\delta$  yang diambil yaitu saat kecepatan maksimum di titik pengambilan data. Hasil simulasi menunjukkan kecepatan maksimum dengan kecepatan *inlet* sedikit berbeda. Kecepatan maksimum lebih besar sedikit dibandingkan kecepatan *inlet* sehingga  $\delta$  secara simulasi juga lebih besar sedikit dibandingkan  $\delta$  prediksi secara teori.

Pada Gambar 4.26 (a) dan (b) terlihat untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan  $\frac{s}{d} = 10$  terdapat aliran *backflow*. Hal ini ditunjukkan dengan nilai  $\frac{u}{U_{maks}}$  dibawah nol atau bernilai negatif. Aliran *backflow* ini disebabkan *vorteks* yang terbentuk dibelakang *triangular bump* belum *reattachment* namun sudah mengenai *backward facing step*. Besar nilai  $\frac{u}{U_{maks}}$  yang negatif untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  lebih besar dibandingkan untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 10$  dikarenakan jarak *bump* yang terlalu dekat dengan *backward-facing step*. Untuk variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$ , nilai  $\frac{u}{U_{maks}}$  pada Gambar 4.26 tidak ada yang bernilai negatif. Hal ini menunjukkan aliran saat mengenai *backward facing step* sudah terjadi *separation bubble*. Nilai positif ini membuat besar *shape factor* kedua nilai jarak ini kecil. Perbandingan nilai *shape factor* dapat dilihat Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** *Shape factor* titik  $\frac{x}{h} = 0$  dan panjang *reattachment* pada *backward-facing step*

		Separation	Shape factor	Panjang <i>reattachment</i> $\frac{x_r}{h}$
<i>No Bump</i>		-	1.835	5.61
<i>Triangular bump</i> $\frac{d}{h} = 0.05$	$s/d = 7$	massive	5.418	6.19
	$s/d = 10$	massive	4.335	5.4
	$s/d = 15$	bubble	1.791	4.98
	$s/d = 20$	bubble	1.667	4.82
<i>Triangular bump</i>	$s/d = 7$	massive	6.017	6.95
	$s/d = 10$	massive	4.652	5.78

$\frac{d}{h} = 0.1$	s/d = 15	bubble	1.6478	4.52
	s/d = 20	bubble	1.668	4.66

Penambahan *triangular bump* pada sisi *upstream* dapat meningkatkan turbulensi aliran sebelum terseparasi oleh *backward facing step*. Hal ini dapat dilihat dari nilai *shape factor*. Aliran turbulen memiliki nilai *shape factor* dari 1.3 sampai 2.6. Berdasarkan perhitungan nilai *shape factor* untuk jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan  $\frac{s}{d} = 10$  baik penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  maupun  $\frac{d}{h} = 0.1$  memiliki nilai *shape factor* melebihi 2.6. Hal tersebut menunjukkan pada kedua jarak ini aliran sebelum terseparasi oleh *backward-facing step* masih terjadi *separation massive* akibat *triangular bump*. Nilai *shape factor* yang besar tersebut juga menyebabkan panjang *reattachment* pada daerah *downstream* menjadi lebih jauh dibandingkan tanpa adanya penambahan *bump*.

Untuk penambahan *triangular bump* pada jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $\frac{s}{d} = 20$ , nilai *shape factor* yang ditunjukkan pada Tabel 4.5 kurang dari 2.6. Hal ini menunjukkan aliran saat terseparasi oleh *backward-facing step* sudah tidak terjadi *separation bubble* dikarenakan jarak *bump* yang jauh dari *backward-facing step*. Pada Tabel 4.5 terlihat juga nilai *shape factor* untuk kedua variasi ini lebih kecil dibandingkan nilai *shape factor* tanpa penambahan *bump*. Nilai yang kecil tersebut menunjukkan peningkatan turbulensi aliran sehingga saat terseparasi oleh *backward-facing step* aliran lebih turbulenta. Peningkatan turbulensi aliran tersebut menyebabkan panjang *reattachment* berkurang. Panjang *reattachment* optimum terjadi saat nilai *shape factor* paling kecil yaitu pada penambahan *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  dengan jarak  $\frac{s}{d} = 20$  dan  $\frac{d}{h} = 0.1$  dengan jarak  $\frac{s}{d} = 15$ .

**Halaman Ini Sengaja Dikosongkan**

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penelitian mengenai pengaruh penambahan pengganggu berupa *triangular bump*  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan  $\frac{d}{h} = 0.1$  pada sisi *upstream* dengan bervariasi *triangular bump*  $\frac{s}{d} = 7, 10, 15$  dan  $20$  terhadap karakteristik aliran *backward-facing step* telah dilakukan dengan baik secara simulasi numerik *Steady* menggunakan model *viscous Realizable k-ε* dan *non equilibrium wall function*. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa:

1. Penempatan pengganggu *triangular bump* pada sisi *upstream backward-facing step* dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran sebelum terpecah oleh *backward-facing step*.
  - a. Reduksi panjang *reattachment* optimum terjadi penambahan *triangular bump* dengan variasi jarak  $\frac{s}{d} = 20$  untuk konfigurasi  $\frac{d}{h} = 0.05$  dan pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  untuk konfigurasi  $\frac{d}{h} = 0.1$ , masing-masing sebesar 13.0 % dan 19.4 %.
  - b. *Pressure drop* yang terjadi pada *lower wall* paling besar dengan penambahan *triangular bump* pada variasi jarak  $\frac{s}{d} = 7$  dan paling kecil dengan variasi jarak  $\frac{s}{d} = 15$  dan  $20$  yang ditampilkan pada perbandingan grafik distribusi *pressure coefficient*.
2. Dari visualisasi aliran pada *velocity pathline* dan *velocity vector* dapat diamati bahwa:
  - a. Penambahan *triangular bump* mengakibatkan pembentukan *vorteks* kecil dibelakang *triangular bump* sehingga mempengaruhi perkembangan *shear layer* pada daerah *downstream*.

- b. Keberadaan *triangular bump* yang dekat dengan *backward-facing step* membuat *vorteks* yang terbentuk menyatu dengan aliran yang terseparasi oleh *backward-facing step* sehingga daerah *separation bubble* menjadi lebih besar.

## 5.2 Saran

Penelitian mengenai aliran *backward-facing step* masih akan terus dikembangkan melalui filosofi *boundary layer* dengan cara kontrol aliran, baik itu melalui eksperimen maupun simulasi numerik. Untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang sama, ada beberapa yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Penggunaan *meshing* harus diperhatikan, sebaiknya dilakukan *grid independent analysis* untuk setiap pergeseran variasi jarak dari *triangular bump* sehingga hasil tidak terpengaruh oleh ukuran mesh atau grid.
2. Dilakukan penelitian secara eksperimen penambahan *triangular bump* pada aliran *backward-facing step* untuk menunjang hasil simulasi yang telah dilakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adams EW, Johnston JP (1988), "Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure part 2: reattachment length and wall shear stress", *Exp Fluid* 6:493–499.
- Armaly BF, Durst F, Pereira JCF, Schonung B (1983), "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow," *J Fluid, Mech* 127:473–496.
- Biswas G, Breuer M, Durst F (2004), "Backward-facing step flows for various expansion ratios at low and moderate reynolds numbers," *Trans ASME J Fluids, Eng* 126:362–374.
- Driver DM, H. L Seegmiller (1985), "Features of a reattaching turbulent shear-layer in divergent channel flow," *AIAA J* 23(2):163–171. doi:10.2514/3.8890.
- Driver DM, H. L. Seegmiller, J. G. Marvin (1987), "Time-dependent behaviour of a reattaching shear layer," *AIAA Journal*, vol. 25, no. 7, pp. 914–919.
- Durst F, Tropea C (1982), "Flows over two-dimensional backwardfacing steps. Structure of complex turbulent shear flow," *IUTAMsymposium, Marseille, France, August 31–September 3, 1982.*
- Eaton JK, Johnston JP (1980), "Turbulent flow reattachment: an experimental study of the flow and structure behind a backwardfacing setp," Rept MD-39, Dept of Mech Eng, Stanford University, Stanford, CA.
- Goren, Omer et al. (2010), "Effect of Turbulence Modelling on The Computation of The Near-Wake Flow Of A Circular Cylinder", *Ocean engineering*, Vol. 37, Hal. 387-399.
- Kang SW, Choi H (2002), "Suboptimal feedback control of turbulent flow over a backward-facing step," *J Fluid Mech*, 463:201–227.
- Kim Jae Yong, Afshin J. Ghajar, Clement Tang, dan Gary L. Foutch (2005), "*Comparison of near-wall treatment methods for high Reynolds number backward-facing step flow*," *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. DOI: 10.1080/10618560500502519.

- K. M. F. Hussain, "Coherent structures and turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 173, pp. 303–356, 1986.
- Kuehn DM (1980), "Effects of adverse pressure-gradient on the incompressible re-attaching flow over a rearward-facing step," *AIAA J* 18(3):343–344.
- Lee, T dan D. Mattessu (1997), "Experimental an numerical investigation of 2-D Backward Facing Step flow," *Journal of fluids and Structures* 12,703-716.
- Le H, Moin P, Kim J (1997), "Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step," *J Fluid Mech* 330:349–374.
- Otugen MV (1991), "Expansion-ratio effects on the separated shearlayer and reattachment downstream of a backward-facing step," *Exp Fluid* 10(5):273–280.
- Scarano F, Benocci C, Riethmuller ML (1999), "Pattern recognition analysis of the turbulent flow past a backward facing step," *Phys Fluids* 11(12):3808–3818.
- Sutardi dan Wawan, Aries Widodo (2008), "Studi eksperimental dan numerik karakteristik boundry layer pada permukaan pelat datar dengan gangguan sebuah obstacle berbentuk rectangular," *Laboratorium Mekanika dan Mesin – Mesin Fluida Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS*.
- Williams PT, Baker AJ (1997), "Numerical-solutions of laminar flow over a 3D backward-facing step," *Int J Numer Methods Fluids* 24:1159–1183.
- Venas, B. dan Saetran, L. R (1999), "Space-Time Correlations in Separated Flow Behind a Surface Mounted Obstacle", *Internal Report of Department of Mechanics, Thermo and Fluid Dynamics Norwegian University of Science and Technology N-7034 Trondheim, Norway*.
- ANSYS FLUENT. (2006), *FLUENT 6.3 User's Guide*, Macrovision Corporation.

[WWW.script.com](http://WWW.script.com)

[WWW.google.com](http://WWW.google.com)

## BIODATA PENULIS



Muhammad Masrur lahir di Gresik pada tanggal 12 Maret 1990. Penulis yang gemar mengajar ini menempuh pendidikan formal di TK. Muslimat 1, MINU Teratte Putra, SMP Negeri 2 Gresik dan SMA Negeri 1 Gresik. Setelah lulus dari SMA, pada tahun 2008 penulis melanjutkan pendidikannya ke Jurusan Fisika FMIPA Institut Sepuluh Nopember Surabaya melalui program PMDK prestasi. Di jurusan Fisika penulis mengambil bidang studi Akustik.

Selama menjalani masa kuliah, penulis aktif di beberapa organisasi diantaranya penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Fisika ITS sebagai Dewan Perwakilan Anggota tahun 2009/2010 dan sebagai kepala departemen DAGRI periode 2010/2011. Selain itu penulis juga aktif dalam organisasi tingkat fakultas yaitu sebagai Dirjen departemen PSDM periode 2010/2011. Untuk mengisi waktu luang penulis mengajar di beberapa LBB diantaranya LBB Bintang Meteor di Gresik dan LBB Prisma di Gresik. Dua tahun terakhir di masa perkuliahannya penulis menjadi asisten Laboratorium Fisika Dasar I dan II serta menjadi asisten dosen Fisika Dasar I dan II.

Pada tahun 2014 penulis masuk program pascasarjana di jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur beasiswa DIKTI. Penulis berhasil menyelesaikan program pascasarjana bidang keahlian Rekayasa Konversi Energi tepat waktu.

Email : [Masrur.me14@gmail.com](mailto:Masrur.me14@gmail.com)