



Disertasi-No.

**REDUKSI KERUGIAN ENERGI AKIBAT ALIRAN  
SEKUNDER MELALUI *FORWARD FACING STEP*  
*TURBULENCE GENERATOR***

Sutrisno  
2110301201

Dosen Pembimbing  
Prof.Dr. Ing.Herman Sasongko  
Dr. Ir.Heru Mirmanto, MT

PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN  
BIDANG REKAYASA KONVERSI ENERGI  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
2017



Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar  
Doktor (Dr.)

Di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
Sutrisno  
Nrp.2110301201

Tanggal Ujian : 17-2- 2017  
Periode Wisuda: Gasal 2017/2018

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko  
NIP : 19601004 198601 1 001

(Pembimbing I)

2. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT  
NIP : 19620216 199512 1 001

(Pembimbing II)

3. Prof. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng  
NIP : 19681030 199303 1 001

(Penguji I)

4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.  
NIP : 19641228 199003 1 002

(Penguji II)

5. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.  
NIP : 19710405 199702 1 001

(Penguji III)

6. Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., Ph.D  
NIP :19751206 200501 1 002

(Penguji IV)

Dekan,

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST, MT

NIP : 19690507 199512 1 001



# REDUKSI KERUGIAN ENERGI AKIBAT ALIRAN SEKUNDER MELALUI *FORWARD FACING STEP* *TURBULENCE GENERATOR*

Nama mahasiswa : Sutrisno  
NRP : 2110301201  
Pembimbing : Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

## ABSTRAK

Ketika fenomena aliran sekunder telah diketahui mendominasi terjadi kerugian hidrolis, maka para peneliti kembali melakukan penelitian secara fundamental untuk mereduksi aliran sekunder. Kejadian aliran sekunder disebabkan akibat ketidak-mampuan aliran *viscous* menghadapi *adverse pressure*. Oleh karena itu salah satu upaya untuk mereduksi aliran sekunder dengan memperkuat energi aliran *viscous* dekat bidang tumpu melalui penambahan *forward facing step turbulent generator*(FFST).

Metode penelitian dilakukan melalui eksperimen dan simulasi numerik, hal ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan karakteristik aliran sekunder tanpa FFST dan dengan penambahan FFST. Metode eksperimen dilakukan dengan teknik *oil flow visualization* (OFV) pada terowongan angin yang membentuk goresan *skin friction* di permukaan bidang tumpu. Hasil eksperimen dipertegas dengan hasil simulasi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamic*, dimana simulasi ini mempertegas dan melengkapi informasi terhadap fenomena aliran sekunder akibat penambahan FFST. Kondisi aliran *free stream* pada penelitian ini digunakan nilai  $Re_c = 10^5$  dan Intensitas turbulensi 5%, panjang *chord* bodi  $C=120$  mm. Selain itu Model *viscous* yang digunakan Standard K Epsilon dengan *Non Equilibrium Wall Functions*. Model *dicreatization equation* pada setiap parameter digunakan *criteria convergence*  $10^{-5}$ . Kerugian energi dipresentasikan dengan kontur koefisien kerugian tekanan total aksial (*axial total pressure coefficient*) di daerah *downstream*.

Teori penelitian ini menyatakan bahwa aliran 3D dibatasi oleh *ESP*, sedangkan didalam aliran 3D aliran terbagi menjadi *attachment line* dan *3D-separated line*. *Attachment line* disebabkan oleh muara aliran yang mampu menyentuh *leading edge* bodi. *3D separation line* disebabkan oleh muara aliran yang tidak mampu menyentuh *leading edge* bodi, aliran ini yang dibatasi oleh  $3D-\delta$ . Dimensi FFST yang digunakan  $d=4.8$  mm,  $d/L_u=0.075$ , proses optimasi posisi FFST diletakan pada  $L/C=8/12$ . Hasil penambahan FFST di bidang tumpu mampu mereduksi aliran sekunder antara 10-25%, hal ini sangat tergantung dari bentuk profil bodi *angle of attack*, dan *camber*.

Kata kunci : Aliran sekunder, Aliran 3D, *Forward facing step*, turbulen.

# **SECONDARY LOSS REDUCTION WITH FORWARD FACING STEP TURBULENCE GENERATOR**

By : Sutrisno  
Student Identity Number : 2110103201  
Supervisor : Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

## **ABSTRACT**

When the secondary flow phenomena is known to dominate the event of hydraulic loss, so the researchers returned to conduct fundamental research for the reduction of secondary flow. Genesis secondary flow caused by the inability of viscous flow to counter adverse pressure. Therefore, another to reduce secondary flow through strengthen energy in near wall with the addition of Forward Facing Step-Turbulence Generated (FFST).

The research method through experiment and numerical simulations, it aims to determine differences in the characteristics of secondary flow without and with the addition of FFST. Experimental method is done with oil flow visualization techniques (OVF) in the wind tunnel that forms scratches skin friction in endwall. The experimental results are reinforced by the results of numerical simulations using computational fluid dynamic, where the results of the simulation is to strengthen and complement the information on the phenomenon of secondary flow due to the addition FFST. Freestream flow conditions in this study used the value  $Re_c = 10^5$  and turbulence intensity of 5%, body chord length  $C=120\text{mm}$ . The models used viscous Standard K Epsilon with Non Equilibrium Wall Functions. Model dicreatization equation for each parameter used  $10^{-5}$  convergence criteria. The energy losses presented to the contours axial total pressure coefficient in downstream area .

The theory of this research stated that the 3D flow is restricted by ESP. While in the 3D flow, the flow is divided into attachment line and 3D-separation line. Attachment line caused by the flow able to touch the leading edge body. Attachment line caused by the flow able to touch the leading edge body. 3D-separation caused by the flow not able to touch the leading edge body, this flow is limited by the 3D- $\delta$ . Result of the addition FFST reduced of secondary flow between 10-25%, this reduction depend on the shape of the body profile, angle of attack and camber

Keynote : Secondary flow, 3D flow, Forward Facing Step, Turbulent.

## DAFTAR ISI

Lembar pengesahan .....	iii
Abstrak .....	iv
Daftar Isi .....	vi
Daftar Gambar .....	ix
Daftar Notasi .....	xvii
1 PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	7
1.3. Batasan Masalah .....	8
1.4. Tujuan Penelitian .....	9
2. STUDI LITERATUR DAN TEORI .....	13
2.1 Teori Aliran Sekunder .....	13
2.1.1 Separasi Aliran .....	13
2.1.2 Topologi aliran 3D. ....	15
2.2 Aliran 3D pada sebuah Sayap (Wing). ....	18
2.3 Aliran 3D Pada Turbomachinary. ....	25
2.4 Reduksi terhadap aliran 3D. ....	31
2.5 Turbulen Generator (Turbulator). ....	34
2.5.1 Riblet. ....	37
2.5.2 Groove. ....	39
2.5.3 Obstacle. ....	41
2.5.4 Blunt/bluff. ....	42
2.5.5 Turbulator Forward Facing Step. ....	47
2.6 Parameter Fluida yang digunakan proses simulasi. ....	50
2.6.1 Solver .....	50
2.6.2 Turbulent model .....	53
2.6.3 Wall Function .....	62
3. METODOLOGI PENELITIAN .....	65
3.1 Analisa Boundary Layer (Dimensi FFST). ....	66
3.2 Metode Eksperimen. ....	69

3.2.1	Model Uji	69
3.2.2	Visualisasi Shear Stress Lines	75
3.2.3	Bagan Alur Eksperimen.	76
3.2.4	Kalibrasi Lorong Angin.	77
3.2.5	Ketidak pastian (uncertainty) pengukuran laju aliran lorong angin.	81
3.3	Metode Numerik	83
3.3.1	Model dan Mesh pada kasus 3D.	85
3.4	Validasi simulasi aliran pada blunt rectangular berdasarkan eksperimen Djilali.	88
4	HASIL DAN ANALISA	99
4.1	Optimasi Ketebalan dan Posisi Forward Facing Step Turbulent Generator (FFST) dari Inlet dengan Simulasi Numerik 2D.	99
4.2	Perkembangan boundary layer setelah melintasi FFST dengan Simulasi numerik 2D .	103
4.3	Efektivitas FFST terhadap posisi Bodi.	110
4.4	Aplikasi FFST pada asimetris bodi tunggal (9C7/32.C50)	127
4.4.1	Karakteristik aliran 3D lower side.	130
4.4.2	Karakteristik aliran 3D upper side.	132
4.4.3	Karakteristik aliran 3D pada daerah downstream.	133
4.4.4	Karateristik aliran 3D akibat peningkatan $\alpha$ .	137
4.5	Aplikasi FFST pada bodi simetris tunggal (NACA 0015).	147
4.5.1	Pengaruh peningkatan $\alpha$ pada bodi simetris.	155
4.6	Aplikasi FFST Pada Bodi Tunggal dengan Kelengkungan Kuat (9C7/42.5C50).	159
4.6.1	Dampak Peningkatan $\alpha$ Pada Bodi Kelengkungan Kuat.	166
4.7	Pengaruh $\alpha$ (angel of attack) dan Kelengkungan Bodi (camber).....	172
4.8	Evaluasi Simulasi Numerik dengan Model Unsteady state.	181
4.9	Teori konversi energi Turbulent Kinetik Energi menjadi Momentum	187
4.10	Revolusi elemen fluida dari upstream menuju downstream.....	200

4.11 Arti Fisik Peran Energi Kinetik Turbulensi menjadi Energi Momentum. .....	211
4.12 Pembuktian Dampak Variasi Inlet Domain Simulasi .....	213
4.6 Diskusi .....	215
BAB 5 KESIMPULAN .....	225
5.1 Kesimpulan .....	225
5.2 Saran .....	228
DAFTAR PUSTAKA .....	229

**Sengaja dikosongkan**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Fenomena Bubble Separasi Aliran, .....	14
Gambar 2-2 Terbentuk Aliran Tiga Dimensi .....	14
Gambar 2-3 Klasifikasi Singular Point a)Node, b).Spiral Node (Focus/Foci), c).Saddle.....	16
Gambar 2-4 Limiting Streamline .....	16
Gambar 2-5 Kondisi Separation line dan Attachment line.....	17
Gambar 2-6 Dua Node Berdekatan dengan Sebuah <i>Saddle Point</i> .....	17
Gambar 2-7 Topologi Separasi Aliran Berbentuk <i>Horseshoe</i> .....	18
Gambar 2-8 Topologi Aliran di <i>Upstream</i> .....	19
Gambar 2-9 Topologi Aliran di <i>Upstream-3D</i> .....	20
Gambar 2-10 Topologi Aliran Dengan Variasi Reynolds .....	20
Gambar 2-11 Topologi Aliran Melalui <i>Appendage</i> .....	21
Gambar 2-12 <i>Horseshoe Vortex</i> Pada <i>Bluff Rectangular</i> [34]a). $Re = 1000$ , b). $Re = 3200$ , c). $Re = 10.000$ , d) $Re = 40.000$ .....	21
Gambar 2-13 <i>Corner Wake</i> Pada <i>Trailing Edge</i> .....	22
Gambar 2-14 Pengaruh $\alpha$ terhadap aliran sekunder pada sebuah sayap dengan profil elips. ....	23
Gambar 2-15 Pengaruh $\alpha$ terhadap aliran sekunder .....	24
Gambar 2-16 <i>Saddle Point</i> Aliran 3D Pada Bodi Sayap a).Model Wilcox, b).Model MSST.....	25
Gambar 2-17 Topologi aliran pada kompresor aksial. (a,b,c model pengujian). Laksminaraya dan Horclock.....	26
Gambar 2-18 Fenomena <i>Blade Stall</i> atau <i>Corner Stall</i> . Pada <i>Stagger</i> $30^\circ$ , <i>Angle of</i> <i>Attack</i> ( $\alpha$ ) $18^\circ$ .....	27
Gambar 2-19 Fenomena <i>Wall Stall</i> . Pada <i>Stagger</i> $50^\circ$ , <i>Angle of Attack</i> ( $\alpha$ ) $12^\circ$ . .....	28
Gambar 2-20 Perbandingan Topologi Aliran 3D antara Bodi Kelengkungan $22.5^\circ$ dan $42.5^\circ$ , Pada <i>Stagger</i> $50^\circ$ , <i>Angle of Attack</i> ( $\alpha$ ) $12^\circ$ .....	30
Gambar 2-21 <i>Corner Stall</i> Pada <i>Suction Side</i> .....	31
Gambar 2-22 Dimensi <i>fairing</i> .....	31

Gambar 2-23 Perbedaan <i>Oil flow visualization</i> tanpa dan dengan <i>fairing leading edge</i> .....	32
Gambar 2-24 Penggunaan Fairing pada leading edge (FX1), dan pada bump trailing edge(FX2) .....	33
Gambar 2-25 Aliran 3D pada <i>Trailing Edge</i> di sayap .....	33
Gambar 2-26 Visualisasi jejal aliran pada bodi tanpa dan dengan <i>fairing</i> . .....	33
Gambar 2-27 <i>Total pressure losses coefficient</i> ( $\xi$ ).....	34
Gambar 2-28. Perbandingan profil kecepatan aliran laminar dan turbulen[39].....	35
Gambar 2-29 Fluktuasi kecepatan.....	35
Gambar 2-30 Definisi <i>boundary layer</i> .....	36
Gambar 2-31 Ekperimen dan Profil <i>Riblets</i> .....	37
Gambar 2-32 Vektor kecepatan dan <i>Turbulent Kinetic</i> .....	38
Gambar 2-33 Koefisien tekanan pada bodi dengan dan tanpa <i>riblet</i> .....	39
Gambar 2-34 Domain penelitian <i>groove</i> persegi.....	40
Gambar 2-35 Visualisasi <i>smoke</i> pada <i>groove</i> . .....	40
Gambar 2-36 Domain ekperimen dan profil <i>obstacle</i> .....	41
Gambar 2-37 Perbandingan profil kecepatan plat datar dan dengan <i>obstacle</i> . .....	41
Gambar 2-38 Hasil visualisasi asap dan numerik pada <i>groove</i> . .....	42
Gambar2-39 Karakteristik Aliran Melintasi <i>Bluff Rectangular Body</i> a)Ekperimen dan b).Numerik.....	43
Gambar 2-40 Perbandingan Ekperimen dan Numerik Aliran Melintasi <i>Bluff Rectangular Body</i> .....	44
Gambar 2-41 Karateristik Aliran Melewati <i>Bluff Rectangular Body</i> a). Profil Kecepatan, b). Intensitas Turbulensi.....	45
Gambar 2-42Visualization CFD Bubble Separation Unsteady .....	46
Gambar 2-43 Karakteristik aliran pada <i>Bluff Rectangular Body 3D</i> .....	46
Gambar 2-44 Bentuk <i>streamline</i> aliran akibat ketajam FFST 2D dan 3D .....	47
Gambar 2-45 <i>Streamline</i> aliran melintasi FFST. ....	48
Gambar 2-46 Topologi aliran berdasarkan simulasi numerik. ....	49

Gambar 2-47 Profil kecepatan di daerah <i>upstream</i> dan pengelompokan peningkatan <i>bubble separation size</i> .....	49
Gambar 2-48 Topologi terjadi aliran 3D. Wu dan Zhong.....	50
Gambar 2-49 Jendela pembuka fluent. ....	51
Gambar 2-50 Skema <i>Pressure Base Solution</i> . ....	52
Gambar 2-51 Model Turbulensi pada FLUENT, .....	54
Gambar 2-52 Lapisan batas boundary layer.....	62
Gambar 2-53 Perbandingan <i>wall function</i> dan <i>near wall model</i> . ....	64
Gambar 3-1 Bagan alur penelitian .....	67
Gambar 3-2 Domain analisa simulasi 2D. ....	68
Gambar 3-3 Profil Airfoil Simetris NACA0015 .....	69
Gambar 3-4 Sudut camber pada airfoil asimetris.....	70
Gambar 3-5 Sudut camber pada airfoil asimetris 32.5 dan 42.5.. ....	71
Gambar 3-6 Foto sayap dengan airfoil NACA0015 dan Brisith 9C7 .....	71
Gambar 3-7 Peletakan dan dimensi FFST pada bidang tumpu. ....	72
Gambar 3-8 Dimensi terowongan angin di Laboratorium Fluida ITS. ....	72
Gambar 3-9 Terowongan angin di Laboratorium Sistem Termal dan Fluid UK.Petra .....	73
Gambar 3-10 Posisi penempatan <i>pressure static</i> .....	74
Gambar 3-11 <i>Inclined Manometer</i> .....	74
Gambar 3-12 Bagan Alur Ekperimen OVF .....	74
Gambar 3-13 Hubungan Tekanan Manometer dan Arus Pressure Tranduser .....	78
Gambar 3-14 Karakteristik terowongan angin di laboratorium sistem termal dan fluida UK. Petra. ....	80
Gambar 3-15 Bagan Alur Numerik .....	84
Gambar 3-16 Domain analisa numerik 3D.....	85
Gambar 3-17 Parameter analisa numerik 3D.....	86
Gambar 3-18 <i>Worst Element</i> pada model .....	87
Gambar 3-19 Meshing pada permukaan model.....	87
Gambar 3-20 Koefisien Seret (Drag) pada silinder[40]. ....	88

Gambar 3-21 Domain numerik <i>bluff rectangular</i> .....	89
Gambar 3-22 Bagan Alur Validasi .....	90
Gambar 3-23 Variasi <i>Meshing</i> untuk proses <i>grid independency</i> .....	91
Gambar 3-24 Profil kecepatan pada $X = 1.08 X_r$ .....	92
Gambar 3-25 Profil kecepatan tidak berdimensi pada $X = 1.08 X_r$ .....	96
Gambar 4-1 Domain simulasi perbandingan tebal dengan arak FFST .....	99
Gambar 4-2 Profil kecepatan pada variasi ketebalan FFST. ....	100
Gambar 4-3 Profil Intensitas turbulensi pada variasi ketebalan FFST .....	100
Gambar 4-4 Dimensi dan posisi evaluasi karakteristik aliran.....	103
Gambar 4-5 <i>Streamline</i> aliran pada FFST setiap ketebalan .....	105
Gambar 4-6 <i>Bubble separation size</i> terhadap ketebalan FFST.....	106
Gambar 4-7 Profil Kecepatan setelah melintasi FFST.....	107
Gambar 4-8 Profil Intensitas Turbulensi setelah melintasi FFST.....	108
Gambar 4-9 Domain Penempatan Bodi dan FFST.....	110
Gambar 4-10 <i>Streamline centerline</i> pada daerah <i>upstream</i> .....	112
Gambar 4-11 Profil kecepatan saat di <i>leading edge</i> .....	113
Gambar 4-12 Posisi <i>3D-Disturbance Thicknes</i> dan kontur <i>Pressure Coefficient</i> . ....	115
Gambar 4-13 Topologi aliran 3D di <i>leading edge</i> (a).Detail aliran sekunder. (b). Perbandingan Posisi <i>3D- Disturbance Thicknes</i> dan kontur <i>Pressure Coefficient</i> .....	115
Gambar 4-14 Distribusi Tekanan Saat di <i>Leading edge</i> . ....	117
Gambar 4-15 Distribusi Kecepatan Saat di <i>Leading edge</i> . ....	117
Gambar 4-16 Distribusi <i>Turbulence Kinetic Energy</i> Saat di <i>Leading edge</i> . ....	118
Gambar 4-17 Distribusi <i>Turbulence Kinetic Energy</i> Saat di <i>Leading edge</i> (bilangan tidak dimensional).....	119
Gambar 4-18 Topologi aliran akibat perubahan posisi bodi .....	121
Gambar 4-19 Kontur kecepatan dan topologi aliran 3D.....	122
Gambar 4-20 Axial Iso total pressure loss coefficient.....	126
Gambar 4-21 Efektivitas reduksi penyumbatan aliran pada daerah <i>downstream</i> . .....	126
Gambar 4-22 Perbandingan kontur <i>Pressure Coefficient</i> pada $\alpha = 12^\circ$ . ....	128

Gambar 4-23 Perbandingan hasil visualisasi jejak aliran pada $\alpha = 12^\circ$ .....	129
Gambar 4-24 Perbandingan hasil numerik pada <i>lower side</i> .....	131
Gambar 4-25 Perbandingan hasil eksperimen dan numerik pada <i>lower side</i> , $\alpha = 12^\circ$ .....	132
Gambar 4-26 Perbandingan hasil numerik pada <i>downstream</i> , $\alpha = 12^\circ$ .....	135
Gambar 4-27 Perbedaan <i>Blockage</i> di <i>upper side body</i> antara <i>without</i> dan dengan FFST, $\alpha = 12^\circ$ .....	135
Gambar 4-28 Perbandingan hasil numerik di <i>downstream</i> .....	136
Gambar 4-29 Topologi aliran hasil perbandingan eksperimen dan numeric pada $\alpha =$ $8^\circ$ .....	138
Gambar 4-30 Distribusi kontur tekanan di daerah <i>leading edge</i> .....	139
Gambar 4-31 Topologi aliran pada <i>upper side</i> hasil eksperimen akibat peningkatan $\alpha$ .....	140
Gambar 4-32 Perbandingan topologi aliran pada <i>corner trailing edge</i> hasil eksperimen dan numerik akibat peningkatan $\alpha$ .....	141
Gambar 4-33 Perbandingan topologi aliran pada <i>upper side body</i> akibat peningkatan $\alpha$ .....	142
Gambar 4-34 <i>Iso Total Pressure Loss Coefficient</i> di daerah <i>downstream</i> .....	143
Gambar 4-35 Koefisien penurunan tekanan di pada $X/C = 14/12$ .....	146
Gambar 4-36 Struktur aliran melintasi <i>leading edge</i> .....	149
Gambar 4-37 Struktur aliran sekunder pada simetris airfoil tanpa $\alpha$ .....	150
Gambar 4-38 Topologi aliran sekunder NACA0015 $\alpha = 12^\circ$ pada <i>lower side</i> .....	152
Gambar 4-39 Topologi aliran sekunder NACA0015 $\alpha = 12$ pada <i>upper</i> <i>side</i> .....	153
Gambar 4-40 Kontur kerugian energi pada daerah <i>downstream</i> NACA 0015 .....	154
Gambar 4-41 Perbandingan struktur aliran sekunder antara tanpa dan dengan FSST seiring dengan peningkatan $\alpha$ .....	158
Gambar 4-42 Topologi aliran 3D pada daerah <i>upsteam</i> .....	159
Gambar 4-43 <i>End Stagnation Point</i> dan <i>3D Disturbance thickness</i> pada permukaan bodi kelengkungan kuat dengan $\alpha = 4^\circ$ .....	160

Gambar 4-44 Perbandingan ekperimen dan numerik struktur aliran sekunder pada $\alpha= 4^\circ$ .....	161
Gambar 4-45 Distribusi tekanan statis pada bodi kelengkungan kuat dengan $\alpha= 4^\circ$ .....	162
Gambar 4-46 Karakteristik aliran sekunder pada daerah <i>downstream</i> . ....	163
Gambar 4-47 Perbandingan Kontur vektor kecepatan pada daerah <i>downstream</i> tanpa dan dengan FFST.....	164
Gambar 4-48 <i>Corner wake</i> di daerah <i>downstream</i> pada $\alpha= 4^\circ$ .....	165
Gambar 4-49 <i>Axial Pressure Loss Coefficient</i> di daerah <i>downstream</i> pada $\alpha= 4^\circ$ .....	166
Gambar 4-50 Perbandingan ekperimen dan numerik struktur aliran sekunder pada $\alpha =12^\circ$ . ....	168
Gambar 4-51 Distrisbusi <i>axial total pressure loss coefficient</i> .....	171
Gambar 4-52 Perbandingan Karakterisik Aliran Sekunder Terhadap Peningkatan $\alpha$ dan <i>camber</i> .....	173
Gambar 4-53 Perbandingan Karakterisik Aliran Sekunder Terhadap <i>Camber</i> Pada $\alpha= 4^\circ$ .....	175
Gambar 4-54 Perbandingan Karakterisik Aliran Sekunder Terhadap <i>Camber</i> Pada $\alpha= 12^\circ$ . ....	178
Gambar 4-55 Hasil simulasi URANS-RMS .....	183
Gambar 4-56 Hasil simulasi menggunakan model LES.....	186
Gambar 4-57 Perbandingan <i>bubble separation</i> dengan URANS dan LES.....	187
Gambar 4.58 Fenomena tumbukan antara elemen pada aliran turbulen.....	188
Gambar 4-59 profil kecepatan arah x ( $U^+ = \frac{u}{u_\tau}$ ).....	188
Gambar 4-60 Reynolds stress pada setiap arah x dan y.....	189
Gambar 4-61 Profil kecepatan arah y (V).....	190
Gambar 4-62 Elemen pada <i>forward facing step turbulator</i> .....	191
Gambar 4-63 Profil Kecepatan U without dan FFST.....	192
Gambar 4-64 Profil Kecepatan V without dan FFST. ....	193
Gambar 4-65 Profil Reynolds stress $u'u'$ . ....	195
Gambar 4-66 profil Reynolds stress $v'v'$ . ....	195

Gambar 4-67 <i>Skewness</i> dan <i>flatness</i> .....	197
Gambar 4-68 Profil perkembangan <i>Skewness</i> dan <i>Flatness</i> . ....	199
Gambar 4-69 <i>center line body</i> .....	200
Gambar 4-70 Distribusi kecepatan dan TKE pada <i>leading edge</i> .....	202
Gambar 4-71 Distribusi kecepatan dan TKE <i>lower side</i> .....	203
Gambar 4-72 Distribusi kecepatan dan TKE pada <i>lower side</i> .....	205
Gambar 4-73 Distribusi kecepatan dan TKE pada <i>lower – upper side</i> .....	206
Gambar 4-74 Distribusi kecepatan dan TKE pada daerah <i>center</i> . ....	208
Gambar 4-75 Distribusi kecepatan dan TKE pada <i>leading edge</i> pada variasi posisi Z (ketinggian). ....	210
Gambar 4-76 Ilustrasi Momentum aliran di dalam <i>boundary layer</i> menjadi TKE. ....	211
Gambar 4-77 Perbedaan domain inlet tanpa dan dengan FFST.....	213
Gambar 4-78 Distribusi kecepatan pada <i>centerline</i> .....	214
Gambar 4-79 Topologi aliran sekunder pada bodi tunggal 9C7/32.5C50, $\alpha=4^\circ$ .....	215
Gambar 4-80 ESP dan 3D- $\delta$ pada bodi tunggal 9C7/32.5C50, $\alpha=4^\circ$ .....	217
Gambar 4-81 Topologi aliran sekunder bodi tunggal 9C7/32.5C50, $\alpha=4^\circ$ ,(a) <i>streamline surface</i> , (b) <i>streamline volume</i> .....	217
Gambar 4-82 OFV perbandingan without dan groove pada bidang tumpu ( <i>endwall</i> ). ....	219
Gambar 4-83 <i>Total pressure loss</i> perbandingan without dan groove pada bidang tumpu ( <i>endwall</i> ). ....	219
Gambar 4-84 Perbandingan Topologi aliran sekunder bodi tunggal 9C7/32.5C50, $\alpha=12^\circ$ tanpa dan dengan FFST,(a) <i>streamline surface</i> , (b) <i>streamline volume</i> ..	221
Gambar 4-85 Perbandingan <i>Axial pressure loss coefficient</i> pada bodi bodi tunggal 9C7/32.5C50, $\alpha=12^\circ$ . ....	222
Gambar 4.86 Perbandingan hasil eksperimen OFV a). Fairing , b). FFST. ....	223

## DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Hasil Ekperimen 3D Flow terhadap <i>mass averaged loss coefficient</i> ...	27
Tabel 2-2 Peneliti yang membahas turbulator. ....	37
Tabel 3-1 Variasi camber pada airfoil asimetris.....	70
Tabel 3-2 Hasil pengukuran manometer dan <i>pressure different</i> . ....	77
Tabel 3-3 Data konversi DAQ pada putara 500RPM .....	79
Tabel 3-4 Variasi <i>Meshing</i> terhadap grid independency.....	91
Tabel 3-5 Variasi Model Turbulence Viscous.....	93
Tabel 3-6 Evaluasi <i>Discretization</i> .....	93
Tabel 3-7 Hubungan tekanan dan kecepatan pada proses simulasi.....	94
Tabel 3-8 Parameter FLUENT 3D yang direkomendasikan. ....	94
Tabel 3-9 Evaluasi <i>grid independency</i> pelat datar .....	95
Tabel 3-10 Parameter FLUENT 2D yang direkomendasikan.....	97
Tabel 4-1 Parameter <i>Boundary Layer</i> tanpa dan dengan FFST. ....	102
Tabel 4-2 <i>Shape factor</i> aliran pada variasi ketebalan FFST .....	109
Tabel 4-3 Tekanan total pada daerah downstream akibat variasi ketebalan FFST .....	109
Tabel 4-4 Reduksi kerugian energi pada daerah <i>downstream</i> .....	147
Tabel 4-5 <i>Energy Loss Reduction</i> pada airfoil simetris. ....	154
Tabel 4-6 <i>Axial total pressure loss coefficient</i> pada bodi kelengkungan kuat...	172
Tabel 4-7 Terbentuk <i>backward saddle point</i> . ....	180
Tabel 4-8 Koefisien aksial total <i>pressure loss</i> .....	180

## DAFTAR NOTASI

$\alpha$	= <i>angle of attack</i>
$\delta$	= <i>disturbance thickness</i>
$\delta^*$	= <i>displacment thickness</i>
$\xi$	= <i>total pressure loss coefficient</i>
$\xi_x$	= <i>axial total pressure loss coefficient</i>
$\rho$	= <i>density</i>
$\omega$	= <i>rotational velocity</i>
$\Theta$	= <i>momentum thickness</i>
$\tau$	= <i>shear stress</i>
$\tau_w$	= <i>wall shear stress</i>
$\mu$	= <i>dynamic viscosity</i>
$\nu$	= <i>kinematic viscosity</i>
$U$	= <i>mean velocity x direction</i>
$V$	= <i>mean velocity y direction</i>
$W$	= <i>mean velocity z direction</i>
$U_\tau$	= <i>shear stress velocity</i>
$U^+$	= <i>dimensionless velocity</i>
$y^+$	= <i>dimensionless mesh</i>
$u'$	= <i>fluctuation component velocity x direction</i>
$v'$	= <i>fluctuation component velocity y direction</i>
$w'$	= <i>fluctuation component velocity z direction</i>
$u' u'$	= <i>Reynolds stress x direction</i>
$v' v'$	= <i>Reynolds stress x direction</i>
$w' w'$	= <i>Reynolds stress x direction</i>
$C$	= <i>chord length</i>

Re	= <i>Reynolds number</i>
Re <sub>C</sub>	= <i>Reynolds number base chord length</i>
Re <sub>θ</sub>	= <i>Reynolds number base momentum thickness</i>
TKE	= <i>turbulence kinetic energy</i>
T <sub>u</sub>	= <i>turbulence intensity</i>
FFST	= <i>forward facing step turbulator</i>
BRT	= <i>bunt/bluff rectangular turbulator.</i>
FSP	= <i>forward saddle point.</i>
BSP	= <i>backward saddle point.</i>
ESP	= <i>end stagnation point.</i>
3D-δ	= <i>3D disturbance thickness</i>
RANS	= <i>Reynolds Average Navier Stokes</i>
URANS	= <i>Unsteady Reynolds Average Navier Stokes</i>
LES	= <i>Large Eddies Simulation</i>
S <sub>τ</sub>	= <i>Skewness</i>
F <sub>τ</sub>	= <i>Flatness</i>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Energi mempunyai peranan yang sangat penting untuk keberlangsungan kehidupan manusia, karena energi diperlukan untuk mengoperasikan semua peralatan mesin yang digunakan dalam kehidupan manusia. Kebutuhan energi di Negara Indonesia sangatlah tinggi, hal ini disebabkan oleh populasi penduduk Indonesia berada pada peringkat terpadat keempat di dunia, dibawah China, India dan Amerika Serikat. Selain itu kebutuhan energi selalu meningkat seiring dengan berkembang waktu dan teknologi, sehingga pemerintah menargetkan pembangunan pembangkit listrik rata-rata 5.700 MW per tahun untuk mencukupi kebutuhan listrik dalam negeri saja. Oleh karena itu aktivitas penelitian yang berorientasi pada penghematan energi sangat diharapkan untuk dikembangkan pada masa depan.

*Turbomachinery* (seperti pompa, kompresor dan turbin) merupakan jenis mesin yang paling banyak dan populer digunakan oleh industri pembangkitan maupun industri proses, hal ini dikarenakan *turbomachinery* memiliki efisiensi yang lebih tinggi dan dimensi yang lebih kecil (*compact*). Selain itu salah satu jenis mesin turbo dapat dioperasikan dengan menggunakan tenaga panas bumi, dimana energi tersebut merupakan salah satu jenis energi terbarukan. Aplikasi turbin tersebut menegaskan bahwa jenis-jenis mesin turbo (*turbomachinery*) dapat beroperasi dengan sistem energi terbarukan dan berpotensi untuk dikembangkan untuk teknologi masa depan. Oleh karena itu penelitian tentang peningkatan unjuk kerja mesin-mesin turbo sangat berperan penting dalam upaya penghematan energi fosil dan pengembangan energi terbarukan.

*Turbomachinery* jenis aliran aksial (*axial turbomachinery*) memiliki *span-chord ratio* besar berdampak terhadap terjadinya aliran yang lebih rumit, apabila dibandingkan dengan jenis *centrifugal turbomachinery* dengan *span-chord ratio* kecil. Pada area lorong aliran yang besar menyebabkan aliran tidak mampu dituntun secara baik sehingga rawan terhadap terjadinya separasi aliran.

Khususnya kompresor aksial, aliran menghadapi medan dengan kenaikan tekanan sehingga terjadinya separasi aliran semakin kuat. Fenomena tersebut berdampak terhadap terjadinya struktur aliran yang semakin rumit. Salah satu peneliti kompresor aksial Horlock dan Lakshminarayana [1] menyatakan bahwa kerugian energi secara kualitatif disebabkan oleh kejadian aliran sekunder (separasi aliran 3D) sebesar 50% dari kerugian energi hidrolis total. Sedangkan kerugian lainnya dikelompokkan menjadi dua faktor yaitu 30% disebabkan kerugian akibat friksi pada dinding annulus dan 20% disebabkan kerugian akibat bentuk atau profil. Fakta ini merupakan indikasi bahwa kerugian akibat aliran sekunder mendominasi kerugian hidrolis pada saluran annulus kompresor aksial. Sehingga upaya peningkatan efisiensi kinerja kompresor aksial dapat dilakukan melalui reduksi aliran sekunder.

Semenjak diketahui bahwa aliran sekunder mendominasi kinerja kompresor aksial, maka beberapa peneliti kembali melakukan penelitian secara fundamental terhadap aliran sekunder pada bidang tumpu bodi tunggal. Pada bodi tunggal interaksi aliran sekunder terjadi secara independen dibandingkan kejadian pada susunan *cascade*. Peneliti terdahulu selalu menyatakan bahwa indikator terjadi aliran sekunder dimulai dari terbentuknya titik singular yaitu *forward saddle point*. Konsep aliran sekunder pertama kali dipaparkan oleh peneliti Tobak dan Peake [2],[3] tentang klasifikasi sketsa topologi aliran sekunder berdasarkan kinematis aliran. Selain itu didalam topologi tersebut dipaparkan bahwa kerangka aliran dapat dijadikan interpresentasi aliran struktur dengan beberapa kombinasi bentuk *skin friction* aliran. Mirmanto dan Sasongko [4] berdasarkan konsep Tobak dan Peake mempertegas bahwa aliran sekunder berawal dari ketidak mampuan aliran primer khususnya didaerah aliran viscous bertemu dengan *attachment line* dari *leading edge*, sehingga interaksi kedua aliran tersebut terseparasi 3D bergerak menuju arah *orthogonal*. Merati et al [5] mempertegas pernyataan bahwa aliran sekunder merupakan aliran memiliki komponen arah ortogonal terhadap aliran primer. Selain itu Abddula et al [6] menyatakan bahwa aliran sekunder merupakan interaksi dua aliran *viscous* yang saling berdekatan. Ketika aliran sekunder berinteraksi dengan aliran primer yang lain menyebabkan

terbentuknya *skewed boundary layer* yang memicu terjadinya *adverse pressure gradient* di depan *leading edge*.

Pada metode eksperimen tentang aliran sekunder masih belum mampu memaparkan secara tepat geometri aliran. Hal ini disebabkan kompleksnya bentuk struktur aliran sekunder yang terjadi. Kemudian Surana et al [7],[8],[9] dengan melakukan penelitian fenomena terjadinya separasi aliran 3D dirumuskan secara *exact theory* dengan menggunakan *nonlinear dynamical system methods* pada persamaan *Navier Stokes*. Oleh karena itu analisa aliran sekunder dilakukan secara langsung (eksperimen), kemudian divalidasi dengan metode numerik atau simulasi numerik. Simulasi numerik *Computation Fluid Dynamic (CFD)* lebih mampu memprediksi aliran di daerah yang sulit dijangkau oleh metode eksperimen. Metode ini telah digunakan oleh Hermanson et al [10] dimana secara kualitatif hasil simulasi numerik memiliki pendekatan yang sama dengan hasil eksperimen, apabila telah dilakukan proses validasi terlebih dahulu. Selain itu hasil penelitian Hergt et al [57] menunjukkan bahwa hasil dari simulasi numerik mendekati sama dengan hasil eksperimen.

Pada susunan kaskade intensitas aliran sekunder semakin hebat jika dibandingkan dengan bodi tunggal. Hal ini disebabkan oleh interaksi beberapa aliran sekunder (*multi secondary flow*) yang disebut sebagai *cascade secondary flow* yang mendominasi terjadi *blockage*. Kang dan Hursch [11] menyatakan bahwa terbentuknya separasi aliran 3D selalu diawali dengan terbentuknya *saddle point* di depan *leading edge* sama seperti kejadian pada bodi tunggal. Selain itu dampak adanya interaksi antara *lower side* dan *upper side* bodi yang bersebelahan menyebabkan terjadinya *cross passage vortex* yang melintang antara sudu dengan sudu. Selain itu interaksi *curl flow* dengan *cross flow* menyebabkan terjadi *vortex* di *trailing edge* sehingga sering disebut sebagai *trailing vortex*. Pada kompresor aksial terjadinya *blockage* berdampak terhadap penurunan tekanan dan efisiensi kerja, kejadian ini sering disebut sebagai *cornerstall*. Peneliti Store dan Cumpsty [12] melakukan penelitian yang menitik beratkan terhadap separasi aliran 3D pada daerah interaksi hub dengan stator yang menyatakan pengaruh *tip clearance* sangat dominan terjadi aliran 3D yang disebut sebagai *tip vortex*. Horclock dan Lakshminarayana [1] memaparkan aliran

sekunder yang terjadi pada kompresor aksial terdiri dari *cascade secondary flow*, *trailing vortex* dan *tip leakage vortex*. Selain itu Sasongko [13] mengemukakan pengaruh *stagger* pada susunan kaskade terhadap karakteristik aliran. Pada *stagger* kuat tidak ditemukan adanya *cross passage flow* namun dijumpai aliran melintang (tangensial) dari sudu ke sudu yang memberikan efek *blockage* yang lebih besar dibanding dengan separasi aliran 3D. Fenomena tersebut dinamakan sebagai *Wall Stall Theory* yang membedakan dengan *Blade Stall* maupun *Corner Stall*.

Upaya untuk mengurangi terjadi aliran sekunder telah dilakukan oleh beberapa peneliti antara lain Devenport et al [14]. Penelitian ini difokuskan pada pengaruh penggunaan *fillet radius* konstan di sambungan dasar antara *wing* dan *bidang tumpu*. Namun pembahasan tersebut belum mampu merubah struktur aliran. Kemudian Devenport et al [15] melanjutkan penelitiannya dengan menambahkan *fairing* di depan *leading edge*, yang berdampak penurunan *nonuniformity*, *unsteadiness wake* dan intensitas turbulensi. Selain itu peneliti yang lain, Steenaert et al [16] memaparkan hal yang serupa yaitu pada sambungan *fairing wing* dan plat datar ditemukan laminarisasi separasi *vortex*. Selain itu hal yang serupa telah dilakukan oleh Mirmanto dan Sasongko [4], yang menyatakan *fairing* berdampak terhadap berkurangnya *adverse pressure gradient*, dimana *forward saddle point* lebih mendekati *leading edge* dengan intensitas *vortex* lebih mengecil. Selain itu perbandingan distribusi *iso total pressure loss coefficient* di *downstream* antara bodi tanpa dengan *fairing* lebih sempit sehingga *blockage* dan aliran *momentum* lebih besar. Indikator tersebut menginformasikan bahwa dengan menggunakan *fairing* dapat berperan penting untuk mengurangi terjadi aliran sekunder. Namun *leading edge fairing* tidak efektif digunakan pada *angle of attack* besar. Dimana haluan pada *upper side* semakin panjang sehingga aliran rentan terhadap terjadinya separasi aliran. Oleh karena itu diperlukan upaya lain untuk mereduksi aliran sekunder.

Schlichting [17] menyatakan bahwa pada *boundary layer* aliran yang lebih turbulen (*high turbulent intensity*) selalu dihasilkan profil momentum yang lebih *fuller*, sehingga energi aliran semakin kuat khususnya di daerah dekat permukaan bidang tumpu. Oleh karena itu reduksi terjadinya aliran sekunder

dapat dilakukan dengan meningkatkan turbulensi aliran, sehingga aliran dekat dinding lebih mampu menghadapi *adverse pressure*. Upaya peningkatan turbulensi aliran salah satunya melalui penambahan *turbulent generator* (turbulator) pada bidang tumpu.

Turbulator merupakan alat pemicu untuk mempersingkat fenomena transisi aliran dari aliran laminar menjadi aliran turbulen. Jenis turbulator beraneka ragam, salah satunya yang telah diteliti oleh Sutardi dan Chi [18] merupakan turbulator jenis *groove* dengan berbagai bentuk yaitu *square*, *semi circular* dan *triangular*. Hasil dari penelitiannya menyatakan bahwa *square groove* merupakan turbulator yang terbaik. Kemudian Wahidi et al [19] melanjutkan penelitian dengan mengkonfigurasi tiga *square groove*. Penelitian tersebut memfokuskan pada pengaruh jarak pemisah antara *multiple groove* terhadap karakteristik aliran di dekat dinding. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan penggunaan *multiple groove* dapat mengurangi gaya Drag dibandingkan dengan *single groove*. Kemudian Sutardi [20] melanjutkan penelitiannya dan menyatakan bahwa turbulator bentuk *groove* tidak terlalu berpengaruh signifikan terhadap disturbance thickness ( $y/\delta$ ) dan profil kecepatan ( $u/u_\infty$ ) secara keseluruhan. Namun penggunaan *groove* hanya sangat berpengaruh pada daerah *viscous sublayer*. Sehingga dalam penelitian ini turbulator bentuk *groove* kurang baik digunakan mereduksi aliran sekunder, sebab profil kecepatan di daerah *viscous flow* tidak mengalami perubahan yang berarti.

Viswamath [21] melakukan penelitian dengan bentuk turbulator *riblets* pada sirip permukaan pesawat. *Riblets* merupakan turbulator berupa penambahan kekasaran permukaan atau *multi small groove*. Hasilnya dengan menggunakan *riblets* terjadi peningkatan momentum di dekat dinding, namun hanya terjadi di daerah *viscous sublayer* seperti yang terjadi pada penggunaan *groove*. Selain itu Peet et al [22] melakukan penelitian yang sama penggunaan *riblet* dengan profil sinusoidal, menunjukkan hal yang sama. Aplikasi *riblets* sangat rentan terhadap terjadinya endapan aliran sehingga mudah tersumbat. Selain itu variasi tebal celah dan kedalaman geometri *riblets* sangat sensitive terhadap nilai *Reynolds number flow*. Sehingga disimpulkan penggunaan *riblets* dan *groove* hanya dapat meningkatkan koefisien tekanan ( $C_p$ ) dipermukaan bodi yang berdampak

terhadap *drag* dan *lift force*. Namun *riblet* masih belum mampu mendeformasi profil kecepatan aliran secara signifikan khususnya di daerah *disturbance thickness* secara keseluruhan.

Turbulator diharapkan dapat menghasilkan aliran momentum dan intensitas turbulensi yang lebih besar. Jenis turbulator yang dapat menghasilkan hal tersebut adalah jenis *bluff rectangular* atau *blunt plate*. Beberapa peneliti seperti Yaghoubi [23] melakukan eksperimen terhadap karakteristik aliran di sekitar *bluff rectangular*. Dimana karakteristik aliran selalu dijumpai *bubble separation* tepat setelah melintasi *bluff rectangular*. *Bubble separation size* sangat ditentukan oleh dimensi *bluff rectangular*. Hal ini didukung hasil simulasi *large eddies simulation unsteady state* (LES) yang telah dilakukan oleh Suksangpanomrung et al [24]. Hasil simulasi tersebut divalidasi dengan hasil eksperimen Djilali dan Gratshore [26], namun sebelumnya Djilali et al telah melakukan validasi dengan simulasi model viscous Standard K-Epsilon *Steady State*. Seiring dengan perkembangan pengetahuan tentang *Bluff Rectangular* (BRT), apabila diletakkan sejajar dengan pelat datar (bidang tumpu) disebut sebagai *Forward Facing Step* (FFS), seperti yang diungkapkan oleh Serry et al [27]. Karakteristik aliran setelah melintasi FFS memiliki *double bubble separation* dibandingkan dengan BRT. Aliran mengalami dua resirkulasi (*bubble separation*) sehingga berdampak peningkatan intensitas turbulensi dan momentum yang lebih besar. Oleh karena itu *Forward Facing Step Turbulent Generator* (FFST) sangat dimungkinkan berpotensi untuk peningkatan momentum dan intensitas turbulensi, sehingga penambahan tersebut mampu mereduksi kerugian energi akibat aliran sekunder.

Hergt et al [57] telah melakukan modifikasi *contour endwall* dengan bentuk FFST. Hasil kerugian energi dalam bentuk *total pressure loss coefficient* di *downstream* ditunjukkan tereduksi secara signifikan, selain itu *corner wake* di bodi kaskade kompresor secara *oil flow visualization* (OFV) dapat tampak dengan jelas. Oleh karena itu teknik *oil flow visualization* dapat mempresentasikan fenomena aliran sekunder yang terjadi pada daerah interaksi bodi bidang tumpu. Namun hasil penelitian Hergt et al [57] tidak mengungkap

fenomena topologi aliran sekunder sehingga terjadinya *corner wake* dapat tereduksi akibat penambahan FFST di bidang tumpu.

## 1.2. Rumusan Masalah

Penurunan tekanan dan kecepatan di dalam *horseshoe vortex* salah satu aliran sekunder, dapat secara langsung mereduksi kinerja kompresor aksial. Hal ini disebabkan dampak aliran sekunder mendominasi terhadap kerugian hidrolis total pada kompresor aksial, oleh karena itu dengan reduksi aliran sekunder dapat memperbaiki kinerja kompresor aksial. Sejak hasil penelitian tentang aliran sekunder menjadi faktor dominan terhadap hidrolis total kompresor aksial, maka peneliti mengungkap kembali teori fundamental aliran sekunder di daerah sekitar bodi tunggal bidang tumpu.

Beberapa peneliti melakukan upaya mengurangi terjadi separasi aliran 3D, salah satunya dengan cara penambahan *fairing* di depan *leading edge*. Hal ini bertujuan mengurangi luasan daerah *adverse pressure* di depan *leading edge*. Upaya tersebut telah berhasil secara signifikan mengurangi terjadi *streght dan size horseshoe vortex* yang merupakan salah satu formasi aliran sekunder. Namun penambahan *fairing leading edge* tidak efektif digunakan pada *angle of attack* yang besar, sehingga diperlukan upaya lain untuk mereduksi terjadi aliran 3D.

Berdasarkan filosofi *Tobak dan Peak* [2],[3] yang menyatakan terjadinya aliran 3D disebabkan oleh ketidak-mampuan aliran viscous di dekat bidang tumpu menghadapi *adverse pressure* dan efek friksi. Salah satu upaya untuk mereduksi aliran sekunder dapat dilakukan dengan meningkatkan energi aliran viscous di dekat bidang tumpu. Upaya peningkatan energi menurut Schlichting [17] dapat dilakukan dengan cara memperkuat turbulensi aliran, khususnya di dekat bidang tumpu.

Pada profil kecepatan yang semakin turbulen, menurut Schlichting [17] selalu memiliki profil yang lebih *fuller* khususnya didekat dinding. Salah satu upaya peningkatan turbulensi aliran dilakukan dengan cara penambahan *passive control flow* yang disebut dengan *turbulent generator* (turbulator). Jenis turbulator menurut Serry et al [27], yang paling efektif berbentuk *forward facing step*

dimana aliran yang melintasi terjadi dua daerah resirkulasi. Penelitian ini dilakukan pembuktian seberapa besar efek penggunaan *forward facing step turbulator* membentuk aliran semakin turbulen, sehingga diprediksi mampu mereduksi terjadinya aliran sekunder di bodi tunggal bidang tumpu. Selain itu penelitian ini mengkaji tentang seberapa besar pengaruh dari dimensi FFST terhadap peningkatan turbulensi aliran. Hergt et al [57] belum mengungkap secara detail peran turbulensi aliran terhadap reduksi aliran sekunder.

Dimensi yang dikaji antara lain ketebalan *forward facing step* ( $d$ ) dan jarak turbulator dari aliran fluida masuk ( $L_u$ ). Kajian tersebut dilakukan dengan menggunakan metode numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) 2D melalui pengamatan profil kecepatan dan intensitas turbulensi setelah melintasi FFST di beberapa posisi. Analisa aliran sekunder dilakukan dengan metode simulasi numerik CFD 3D dengan pemaparan struktur aliran sekunder dan kerugian energi di *trailing corner*. Selain itu analisa dilanjutkan dengan evaluasi pengaruh *angle of attack* bodi terhadap efektivitas FFST mereduksi aliran sekunder melalui analisa simulasi numerik kemudian dipertegas dengan eksperimen *oil flow visualization* pada lorong angin. Untuk memperkuat teori tentang efektifitas penggunaan FFST terhadap fenomena aliran sekunder, maka dalam penelitian ini juga dilakukan dampak kelengkungan bodi (*camber*) terhadap efektivitas FFST.

### **1.3. Batasan Masalah**

Untuk menyederhanakan masalah tersebut maka pada penelitian ini diberikan batasan bahwa :

1. Jenis turbulator yang digunakan *Forward Facing Step*. Penggunaan aliran hanya dengan aliran  $Re_c = 10^5$ .
2. Efektivitas *forward facing step turbulator* (FFST) dikaji pada variasi *angle of attack* antara  $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$  dan  $16^\circ$  dan menggunakan airfoil simetri dengan profil NACA 0015 (tanpa camber), airfoil asimtris profil British, 9C7/32.5C50 (camber standard) dan 9C7/42.5C50 (camber kuat).

#### 1.4. Tujuan Penelitian

Pembaruan teori tentang topologi aliran sekunder pada bodi tunggal bidang tumpu dan Pembuktian bahwa aliran turbulen mampu mereduksi kerugian energi akibat aliran sekunder.

Selain itu tujuan khususnya :

1. Optimasi geometri FFST yang efektif dalam upaya peningkatan momentum dan intensitas turbulensi pada aliran primer khususnya daerah *viscous flow*. Parameter tersebut berupa perbandingan ketebalan *forward facing step* dengan jarak letak turbulator ( $\frac{d}{L_u}$ ). Selain itu peneltiaian ini mendapatkan hubungan ketebalan dan panjang lintasan aliran setelah melintasi *stepper* ( $\frac{d}{L}$ ).
2. Optimasi letak bodi ( $\frac{L}{C}$ ) terhadap turbulator, yang dilakukan dengan simulasi numerik 3D. Evaluasi dilakukan terhadap karakteristik aliran 3D berupa topologi aliran dan kerugian energi berupa pemaparan *total pressure loss coefficient* di *trailing corner*.
3. Menganalisa dan mensintesa struktur aliran sekunder tanpa FFST dan dengan FFST disekitar bodi tunggal pada berbagai variasi *angle of attack* dengan eksperimen dan simulasi numerik. Pengamatan pada analisis simulasi numerik dengan cara memaparkan streamline aliran di permukaan *bidang tumpu* kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen penelusuran jejak *skin friction* dengan metode *oil flow visualisation*(OFV). Mengamati terjadinya fenomena *forward saddle point, focus, nodel, curl flow* dan *backward saddle point* disekitar bodi. Pengamatan efek kerugian hidrolis secara kualitatif yang dipersentasi dengan *axial total pressure loss coefficient*.
4. Mendapatkan efektivitas FFST dalam rangka mereduksi aliran sekunder terhadap variasi *angle of attack* dan *camber* pada bodi tunggal.
5. Evolusi topologi aliran sekunder akibat penambahan *Forward Facing Step Turbulent Generator* untuk dijadikan teori baru tentang aliran sekunder.

Novelty dan orisinalitas dari penelitian ini memaparkan detail **evolusi topologi aliran sekunder** akibat peningkatan turbulensi aliran. Selain itu penelitian ini memaparkan teori tentang hubungan perlakuan aliran sekunder dengan fenomena reduksi kerugian energi di *trailing corner*. Teori baru tentang turbulensi menjadi peningkatan energi di dalam aliran *viscous*.

## 1.5 Sistematis Penulisan

Penulisan disertasi ini terdiri dari lima bab dengan masing-masing bab dibagi menjadi beberapa sub-bab dengan sistematika penulisan berikut ini :

- **BAB I PENDAHULUAN.**

Bagian bab ini menjelaskan latar belakang perlunya penelitian tentang peningkatan efisiensi kerja kompresor aksial. Fakta tentang rugi hidrolis didominasi oleh aliran sekunder. Fakta tentang upaya yang dilakukan beberapa penelitian untuk mereduksi aliran sekunder. perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian dan sistematis penulisan.

- **BAB II STUDI LITERATUR DAN TEORI**

Bagian ini menjelaskan teori tentang penggunaan turbulator pada aliran eksternal. Filosofi terjadi separasi aliran 2D dan aliran 3D. Topologi aliran berdasarkan *skin friction* aliran. Eksplorasi aliran sekunder di antara bodi dan dinding yang dikemukakan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Pengungkapan kerugian hidrolis akibat terjadi aliran sekunder. Selain itu upaya yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya untuk mereduksi aliran sekunder.

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN.**

Bagian ini menjelaskan mengenai langkah-langkah metode simulasi dan eksperimen yang dilakukan. Prosedur mendapatkan parameter yang optimal pada dimensi ketebalan parameter. Serta proses validasi simulasi numerik dengan eksperimen.

- BAB IV ANALISA DATA.

Bagian ini berisi tentang analisa pola *skin friction line* dan *isobar contour* beserta diskusi perbandingan hasil numerik dan eksperimen tentang perbedaan penggunaan turbulator dan tanpa turbulator untuk setiap sudut serang bodi tunggal pada daerah *bidang tumpu*.

- BAB V KESIMPULAN.

Berisi catatan pokok hasil eksperimen mengenai pengaruh perubahan sudut serang atau sudut pembebanan terhadap karakteristik aliran tiga-dimensi pada *wing-tip* dan daerah *bidang tumpu* tanpa turbulator dan dengan turbulator.

*Sengaja dikosongkan*

**Sengaja dikosongkan**

## BAB 2

### STUDI LITERATUR DAN TEORI

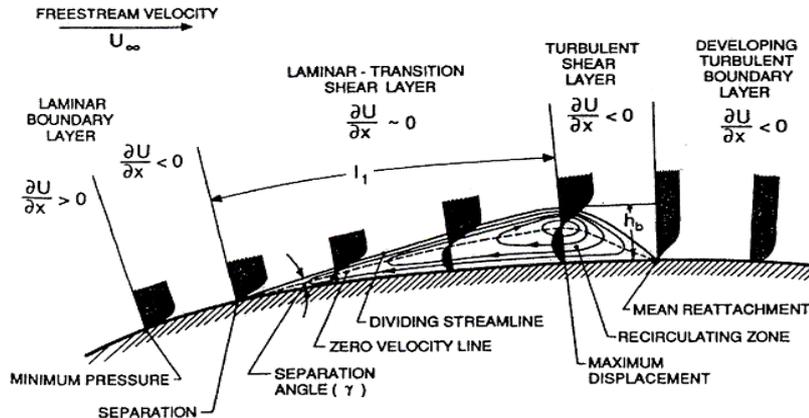
Studi literatur yang pelajari dalam membahas topik penelitian ini dibagi berbagai aspek, antara lain :

#### 2.1 Teori Aliran Sekunder

##### 2.1.1 Separasi Aliran

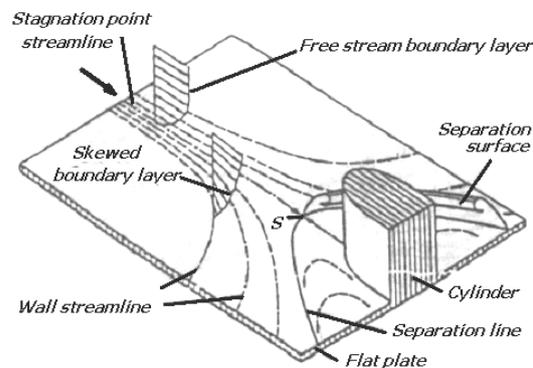
Separasi aliran terbagi dari dua jenis yaitu separasi aliran 2D dan separasi aliran 3D, keduanya memiliki penyebab yang berbeda. Separasi aliran 2D merupakan fenomena terjadi aliran yang meninggalkan bidang viscous akibat *adverse pressure* dan efek friksi. Sedangkan aliran separation 3D menurut Abdulla et al [6] merupakan adanya interaksi dua aliran viscous yang saling berdekatan sehingga aliran 3D selalu terjadi di daerah persimpangan atau *junction*. Aliran separasi 2D terjadi pada aliran laminar dimana aliran tidak mampu mengatasi efek komulatif dari *adverse pressure gradient* dan *wall stress* akibat momentum aliran yang kecil. Permulaan terjadinya separasi ditandai dengan tidak ada perubahan kecepatan( $u$ ) ke arah sumbu  $x$  didekat dinding  $\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{y=0} = 0$ . Selama berlangsungnya separasi maka muncul interaksi antara aliran *nonviscous* dengan lapisan batas aliran terseparasi, peristiwa ini biasanya disebut *entrainment*. Dampak tersebut memungkinkan aliran pulih kembali apabila jumlah komulatif energi momentum telah mampu mengatasi *adverse pressure gradient* sehingga aliran kembali bergerak kembali menuju permukaan gesekan yang disebut dengan *reattachment*. Peristiwa ini biasanya disebut dengan *bubble separation*. Pada proses resirkulasi ini terjadi perubahan karakteristik aliran dari aliran laminar menuju turbulen yang lebih singkat. Fenomena *bubble* separasi aliran dipaparkan pada gambar 2-1 yang merupakan hasil dari Muller et al [28].

Kajian penelitian ini tidak hanya membahas separasi aliran 2D, namun dititik beratkan pada fenomena terjadi separasi aliran 3D. Hal ini disebabkan bahwa separasi aliran 3D atau aliran sekunder mendominasi terjadinya *blockage* di saluran annulus, yang menyebabkan kerugian energi.



Gambar 2-1 Fenomena *Bubble* Separasi Aliran,[28] .

Abdulla et al [6], memperlihatkan separasi aliran 3D yang dipaparkan pada gambar 2-2. Lapisan batas aliran *viscous* yang berkembang di permukaan plat datar bertemu dengan lapisan batas aliran viscous dari bodi tunggal. Peristiwa tersebut menyebabkan terjadinya *boundary layer* yang terpelintir biasanya disebut sebagai *skewed boundary layer*. Aliran sekunder disebabkan oleh ketidakmampuan aliran utama khusus daerah aliran viscous melawan *adverse pressure* dari bodi. *Adverse pressure* di depan *leading edge* diakibatkan oleh terbentuknya *skewed boundary layer*. Aliran sekunder menurut Tobak dan Peake [2],[3] selalu diawali dengan terbentuk *saddle point*. Pada titik *saddle* terjadi peristiwa bertemunya dua *attachment line* dari *attachment line primer* dan *attachment line from leading edge*. Interaksi aliran di *saddle point* dihasilkan *separation 3D line* yang arahnya selalu *orthogonal* dengan aliran primer, seperti ungkapan Merati et al [5].

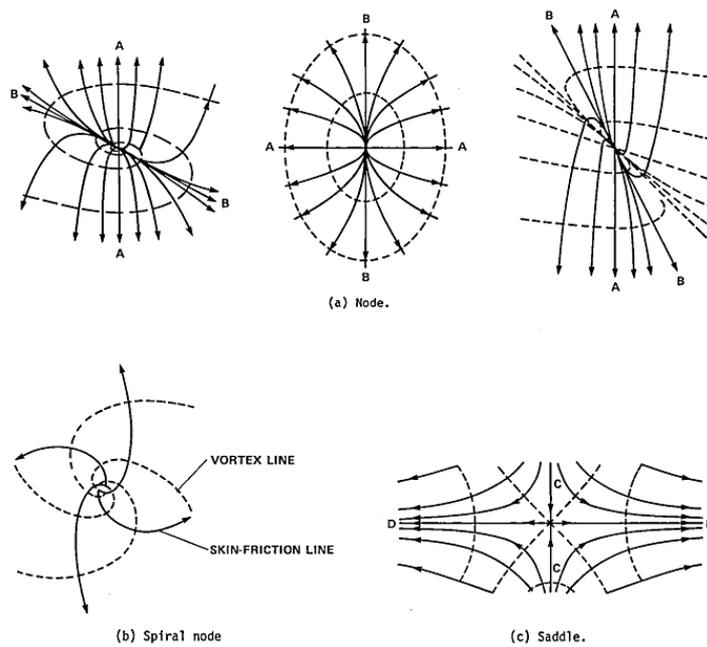


Gambar 2-2 Terbentuk Aliran Tiga Dimensi [2].

### 2.1.2 Topologi aliran 3D.

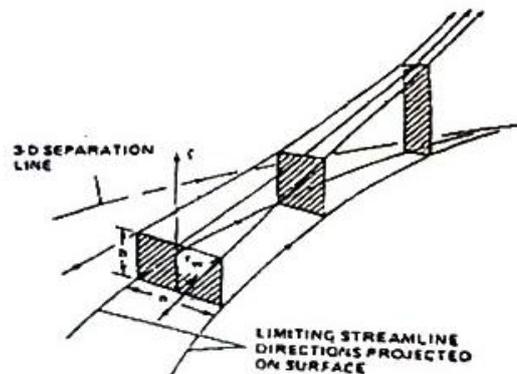
Aliran separasi 3D atau sekunder merupakan paparan sebuah domain pergerakan fluida yang diungkapkan melalui *wall streamline display* yang pertama kali diungkap oleh kalangan praktisi. Aliran sekunder pertama kali diketahui melalui observasi gambar yang didapatkan dengan teknik *oil flow visualization* pada permukaan hasil dari eksperimen *wind tunnel* oleh Maltby [29]. Kemudian aliran sekunder pertama kali dianalisa dalam bentuk jurnal oleh Tobak dan Peake [2] yang dilakukan berdasarkan garis-garis *skin friction* pada permukaan bidang tumpu. Hipotesa ini didasari oleh catatan penelitian Lighthill [30], bahwa garis *skin friction* dapat dijadikan pengamatan pergerakan vektor pada permukaan lintasan aliran yang disebut sebagai *wall streamline*. Prinsip dari Legendre menyatakan separasi aliran berasal dari pertemuan *streamline* dinding tertentu berasal dari sebuah *singular point* yaitu *saddle point*. Lighthill [30] yang lebih mengkhususkan penelitiannya pada aliran *viscous*, mengklafisikasi bahwa *saddle point* merupakan kondisi yang diperlukan untuk separasi aliran. Kemudian secara jelas Tobak dan Peake [2],[3] mengklasifikasikan aliran sekunder dengan analisa matematika berdasarkan sifat kinematis fluida, kemudian disempurnakan kembali oleh Surana et al [7][8][9]

Kondisi suatu titik antara *skin friction* berupa *wall shear stress* dengan *vorticity* yang bernilai nol menurut Tobak dan Peake [2] disebut sebagai *singular point*. Titik tersebut diklasifikasikan berdasarkan vektor menjadi *nodal* atau *node*, *spiral nodal* dan *saddle*. Pemaparan bentuk dari vektor dilihat pada gambar 2-3. *Node* diklasifikasi menjadi *separation line* dan *attachment line* berdasarkan arah vektor kecepatan. Dimana garis *node* yang memiliki arah meninggalkan titik singular disebut sebagai *separation line* sedangkan yang memiliki arah menuju titik singular disebut sebagai *attachment line*. Sedangkan untuk *Spiral Node* atau *foci* atau *focus* merupakan kondisi tidak ditemukan garis tangensial vektor kecepatan sehingga aliran terbentuk terjadi pusaran *vortex*. *Focus* dibedakan menjadi dua jenis seperti peristiwa *node*. Sedangkan untuk *saddle point* merupakan pertemuan dua *particular line* masuk di suatu titik yang menghasilkan dua *particular line* yang keluar.



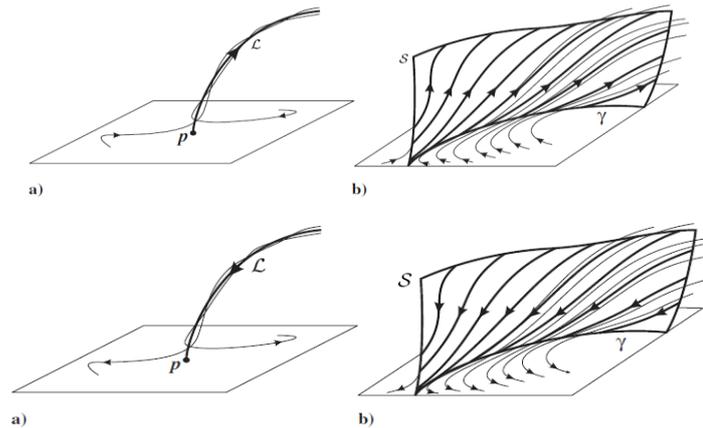
Gambar 2-3 Klasifikasi *Singular Point* [2] a)Node, b).Spiral Node (*Focus/Foci*), c).Saddle.

Deskripsi yang lain dikemukakan oleh Wang [31], bahwa *skin friction line* dari suatu *line of attachment* cenderung mengembang pada suatu permukaan. Hal ini disebabkan oleh pengaruh karakter aliran yang dipengaruhi viscous kecenderungan bergerak dan berotasi (menggulung). Akibat aliran yang menggulung tersebut ketika bertemu dengan aliran *inviscid* terproyeksi menjauhi lapisan batas dan kembali *attach*. Pada gambar 2-4 diperlihatkan *limiting streamline/streamtube* di dekat garis separasi aliran 3D.



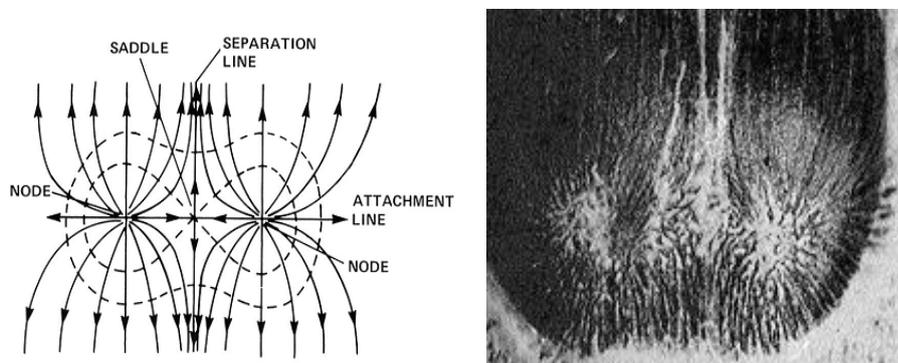
Gambar 2-4 *Limiting Streamline* [3]

Definisi Surana et al [7] menyatakan bahwa *separation line* merupakan partikel fluida mulai berkumpul tertutup menuju *boundary converge* pada sebuah *streamline*, kemudian aliran tersebut meninggalkan *boundary*. Sedangkan untuk *attachment line* berkebalikan dari *separation line*. Pada gambar 2-5 dipaparkan perbedaan dua jenis aliran berdasarkan kondisi batasnya.



Gambar 2-5 Kondisi *Separation line* dan *Attachment line*[7].

Lighthill [30] mengungkapkan bahwa ketika ada dua buah *node* berdekatan menyebabkan terjadi sebuah *saddle point* didalam kajian tersebut merupakan pendefinisian fundamental terhadap *singular point*. Dimana *saddle point* dinyatakan sebagai pertemuan dua *attachment line* sehingga menghasilkan dua *separation line*. Hal ini telah dibukti dalam eksperimen Seegmiller, dipaparkan pada gambar 2-6.

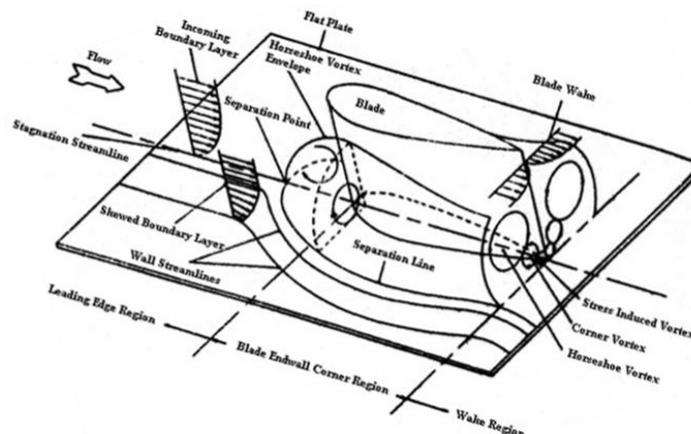


Gambar 2-6 Dua *Node* Berdekatan dengan Sebuah *Saddle Point* [30]

## 2.2 Aliran 3D pada sebuah Sayap (Wing).

Peneliti yang lain Abdulla et al [6] melakukan kajian secara eksperimen terhadap susunan airfoil tunggal NACA 65-15 dan plat datar. Fluida aliran utama yang digunakan udara dengan kecepatan 27.3m/s. Bentuk aliran sekunder yang terjadi seperti *horseshoe vortex* melewati interaksi airfoil dan plat datar, seperti yang terlihat pada gambar 2-7.

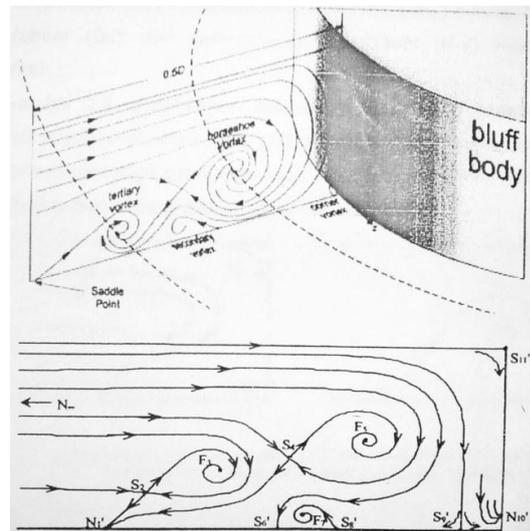
Penelitian ini dihasilkan visualisasi aliran di permukaan plat datar diperlihatkan *single horseshoe vortex* dengan nilai yang tinggi antara *leading edge* dan titik ketebalan maksimum (*maximum thickness*). Bentuk ukuran *vortex* tergantung dari bentuk profil *blade leading edge* dan tebal lapisan batas. Jarak antara permukaan sudu dengan *limiting streamline* ke arah transversal (sumbu Y) mempunyai nilai maksimum pada lokasi titik ketebalan maksimum.



Gambar 2-7 Topologi Separasi Aliran Berbentuk *Horseshoe* [6].

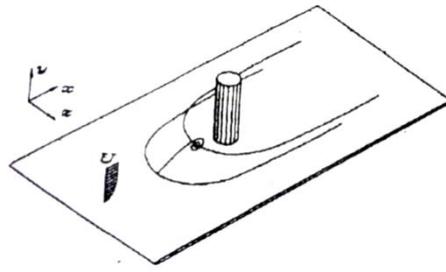
Beberapa peneliti telah melakukan pengamatan di daerah dekat *leading edge* dan plat datar, tetapi hal itu belum cukup untuk menginformasikan separasi aliran 3D yang terjadi di keseluruhan bagian airfoil. Oleh karena itu selain daerah tersebut perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut khususnya di daerah *trailing edge* dan plat datar. Sebab pada daerah *trailing edge* dan plat datar merupakan tempat daerah yang sering terjadi vortex yang kuat dan sangat kompleks, disinilah banyak aliran yang menggulung atau *corner wake*. Namun awal terjadi separasi aliran 3D selalu dimulai dari terbentuk *saddle point* atau *forward saddle point* yang menentukan efek lanjutan pada aliran di sekitar *trailing edge*.

Karakteristik aliran separasi aliran 3D yang melewati sebuah silinder dan bidang tumpu telah dilakukan oleh Balio et al [32]. Pada daerah didepan *leading edge* atau *upstream* di penelitian ini ditemukan dua *primary vortex* (*focus*  $F_3$  dan  $F_4$ ), yang dipaparkan pada gambar 2-8. Kedua focus itu dipisahkan oleh *saddle point* ( $S_4$ ) dan ada sebuah vortex ( $F_4$ ) yang terpisah di atas permukaan datar. Titik singular pada permukaan pelat ( $N_1$ ) atau *point of attachment* merupakan titik asal separasi yang membentuk struktur *primary vortex*, sedangkan *internal saddle* yang ke dua memisahkan aliran fluida yang masuk struktur vortex menuju ke bawah (*solid surface*). Sebuah *secondary circulation* terbentuk pada *bottom-cylinder corner* dan *half-saddle* ( $S_9$ ) membagi *backflow* dari aliran yang menuju ke *half-node* ( $N_{10}$ ).



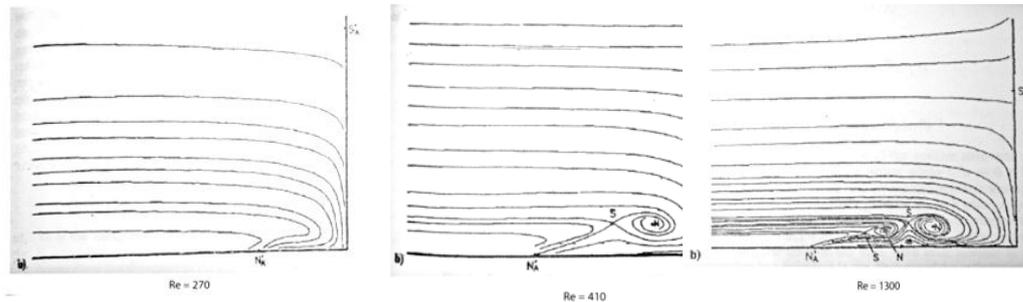
Gambar 2-8 Topologi Aliran di Upstream [32].

Coon dan Tobak [33] melakukan penelitian pada peristiwa terjadinya vortex pada bagian depan *leading edge* atau *upstream*. Model yang digunakan dalam penelitian adalah silinder bodi tunggal dan plat datar seperti yang lihat pada gambar 2-9. Perkembangan vortex yang terjadi depan *leading edge* diakibatkan oleh terbelang atau terhalangnya aliran utama. Aliran utama tersebut memiliki energi kinetik yang tinggi ini terhalang menyebabkan kenaikan tekanan yang besar. Akibat kenaikan tekanan tersebut terkandung aliran momentum rendah, sehingga mudah terseparasi kesamping bodi. Penyumbatan aliran di antara bodi dan bidang tumpu semakin hebat sehingga vortex di *leading edge* semakin kuat.



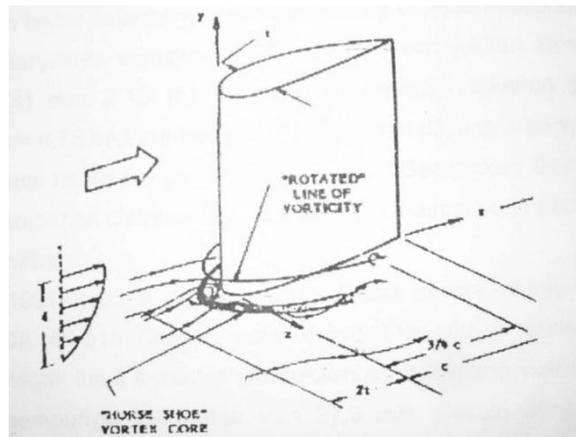
Gambar 2-9 Topologi Aliran di *Upstream 3D* [33].

Aliran dengan karakter Reynolds number,  $Re_D = 270$ , pada topologi aliran tidak terdapat *foci* yang terjadi. *half-node of attachment* berada diatas plat datar dan *half-saddle point of attachment* berada di daerah silinder *leading edge*. Aliran dengan karakter Reynolds number,  $Re_D = 410$ , ilustrasinya terlihat terdapat satu *vortex* dan keberadaan *saddle point* pada aliran di antara *focus* dan *node*. Dimana separation sekunder berasal dari sebuah *half-saddle point of separation*. Pada aliran dengan karakter Reynolds number,  $Re_D = 1300$ , terlihat pada gambar 2-10 dimana terdapat dua *primary vortex*. Sedangkan *half-node of attachment* dipresentasikan dan satu *secondary vortex* pada topologi aliran.



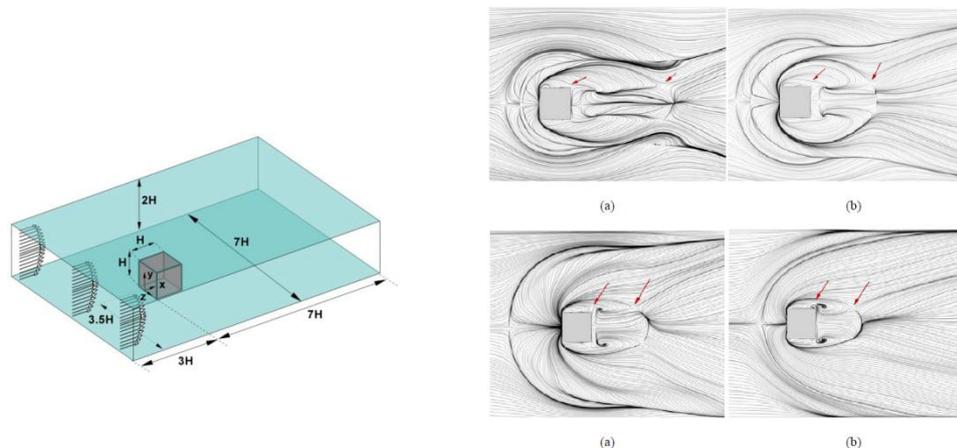
Gambar 2-10 Topologi Aliran Dengan Variasi Reynolds [33].

Merati [5] melakukan eksperimen dengan digunakan susunan airfoil NACA 0020 dan plat datar, susunannya dipaparkan pada gambar 2-11. Hasil penelitian tersebut diperlihatkan bentuk aliran sekunder di daerah interaksi airfoil simetri dengan bidang tumpu Bentuk *streamwise root vortex* bergerak ke arah *downstream* tepat di atas plat datar. Terjadinya pusat *vortex* berada di dekat permukaan plat datar dan didepan *leading edge*.



Gambar 2-11 Topologi Aliran Melalui *Appendage* [5].

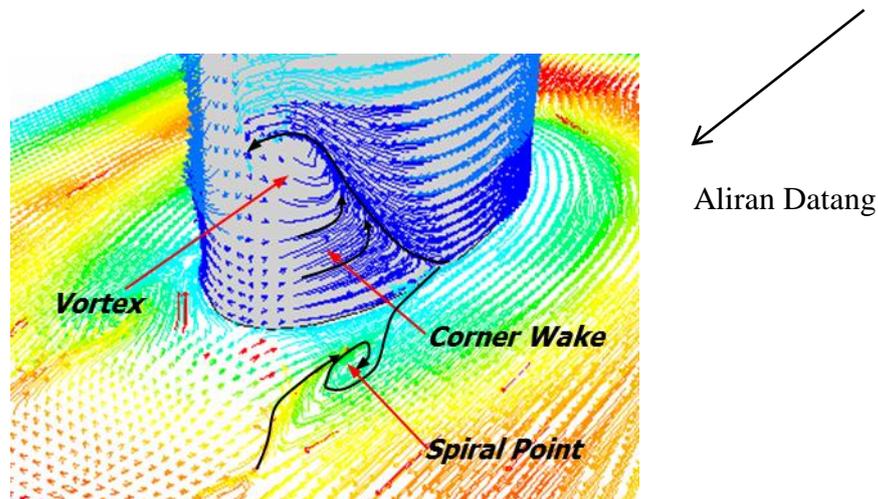
Pada gambar 2-12, formasi *horseshoe vortex* yang terjadi di *junction* antara bodi kubus dan bidang tumpu dipaparkan oleh Sedighi dan Farhadi [34]. Aliran 3D yang berupa formasi *horseshoe vortex* memperlihatkan semakin besar nilai  $Re$  menunjukkan aliran sekunder yang semakin lemah dan rumit (komplek). Namun untuk garis separasi yang terbentuk semakin membesar dan simpel seiring dengan meningkatkan Reynolds number.



Gambar 2-12 *Horseshoe Vortex* Pada *Bluff Rectangular*[34] a).  $Re = 1000$ , b).  $Re = 3200$ , c).  $Re = 10.000$ , d)  $Re = 40.000$ .

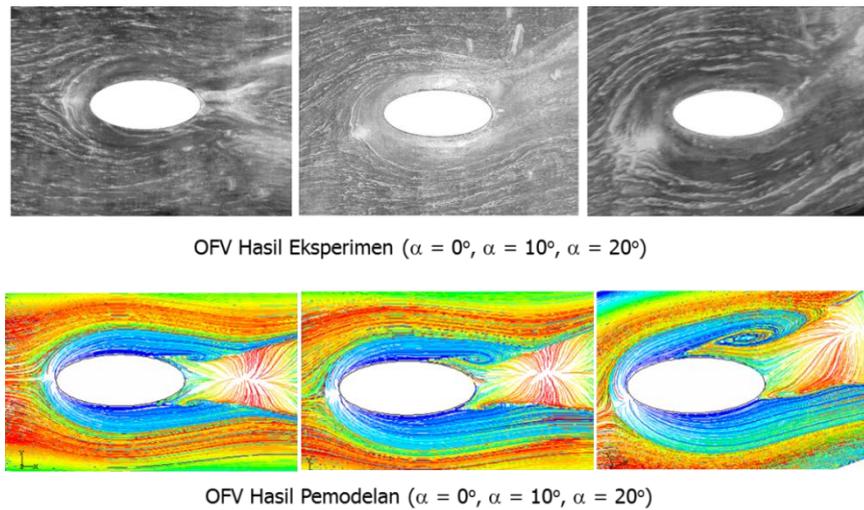
Beberapa peneliti seperti Sasongko et al [35] melakukan pengkajian secara eksperimen dan numerik terhadap aliran yang menuju *trailing edge*. Aliran tersebut berasal dari aliran utama yang menelusuri bodi kemudian berputar mengelilingi daerah *trailing edge*. Aliran ini selanjutnya bertumbukan dengan *attachment line* menelusuri permukaan bodi yang berasal dari *upstream*. Tumbukan kedua *attachement line* tersebut mengakibatkan terjadi *bubble*

*separation* pada permukaan elips 75% dari *chord* terhadap *leading edge*. Separasi di sudut ini membuat *blockage* dan memisahkan aliran utama menjadi dua cabang separasi 3D. Cabang pertama bergabung dengan salah satu cabang garis separasi 3D yang berasal dari *downstream* dan bersama-sama bermuara pada *spiral point*. Sedangkan yang lain membentuk *blockage* terhadap aliran utama dan mengakibatkan *corner wake* pada permukaan bodi dekat *trailing edge*. Akibat penyumbatan ini aliran dipaksa untuk menjauhi permukaan pelat datar. Setelah mencapai puncak *corner wake* aliran turun kembali, berputar mengelilingi permukaan belakang bodi dan membentuk vortex. *Corner wake* dan *vortex* pada permukaan elips bagian belakang bodi dapat dilihat pada gambar 2-13.



Gambar 2-13 *Corner Wake* Pada *Trailing Edge* [35]

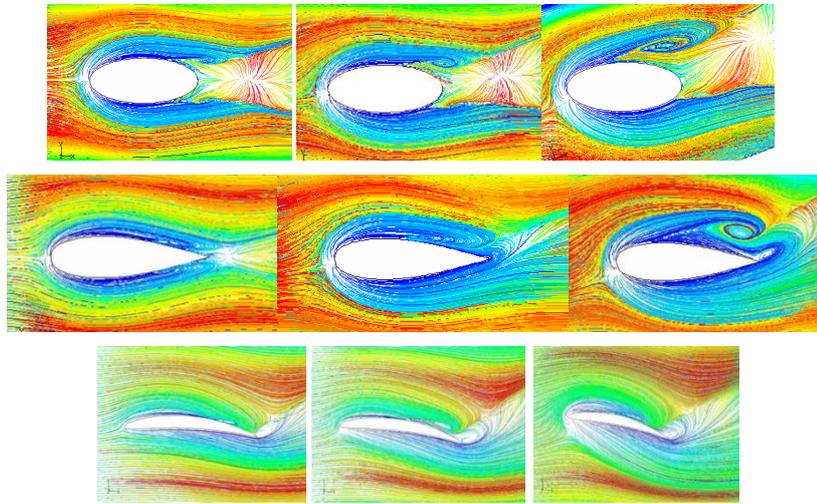
Selain itu Sasongko et al [35] melakukan penelitian terhadap pengaruh  $\alpha$  atau  $\alpha$  pada aliran sekunder di dekat bidang tumpu dan sebuah sayap yang berprofil elips. Pada gambar 2-14 dipaparkan hasil eksperimen dan numerik akibat pengaruh  $\alpha$  terhadap aliran sekunder. Hasil eksperimen dan numerik memperlihatkan karakteristik aliran yang sama. Kenaikan  $\alpha$  menghasilkan *saddle point* terbentuk lebih awal dengan jarak terhadap *leading edge* semakin jauh bergerak menuju *pressure side*, *stream tube* membuka semakin melebar, separasi pada *upper side* semakin maju mendekati *leading edge*. Selain itu *Nodal point of attachment* semakin jauh dari *trailing edge* dengan posisi sejajar aliran datang dan Intensitas spiral point semakin kuat.



Gambar 2-14 Pengaruh  $\alpha$  terhadap aliran sekunder pada sebuah sayap dengan profil elips [35].

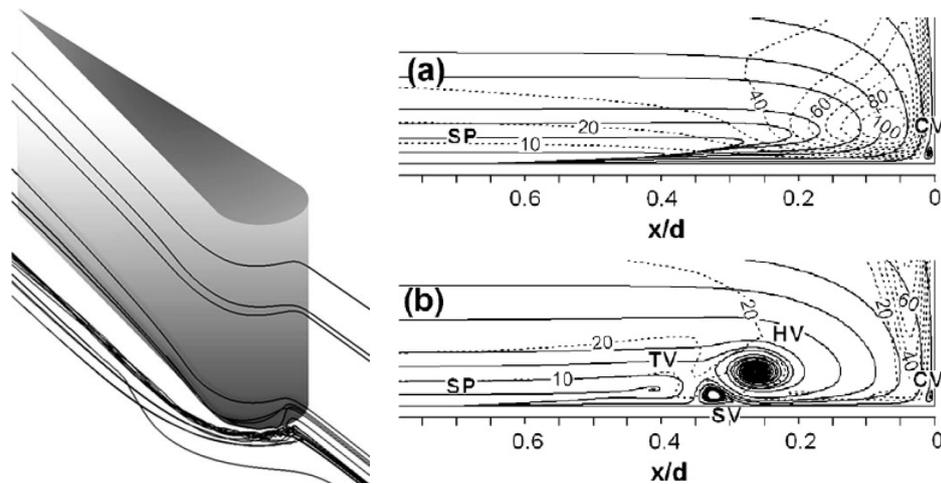
Sasongko et al [35] menyatakan bahwa variasi bentuk profil sayap dan kenaikan  $\alpha$  dapat mempengaruhi karakteristik aliran sekunder, hal ini dipaparkan pada gambar 2-15. Hasil semua uji dijumpai *forward saddle point* (FSP) dengan posisi di depan *leading edge*. *Leading edge* dengan geometri tumpul, jarak FSP terhadap *leading edge* semakin jauh dibandingkan dengan geometri yang lancip. Kenaikan  $\alpha$  memperluas bidang normal *airfoil* dengan aliran datang, hal ini meningkatkan *intensitas attachment* yang berlawanan dengan aliran utama, sehingga jarak FSP terhadap *leading edge* semakin jauh. Perubahan geometri mendadak pada bagian belakang profil (-elips) menghasilkan *nodal point of attachment* dengan intensitas lebih kuat, apabila  $\alpha$  diperbesar maka posisi *nodal point* bergeser menuju *upper side elips* dengan posisi terhadap *trailing edge* semakin jauh. Profil ber *camber* menghasilkan perbedaan tekanan antara *lower* dan *upper side* lebih besar, hal ini meningkatkan intensitas *curl flow*, sehingga intensitas separasi di daerah *upper side* dekat *trailing edge* semakin meningkat. Fenomena inilah yang membuat separasi 3D pada daerah interaksi terjadi lebih dahulu dibandingkan dengan aliran separasi 2D di *midspan*. Kenaikan  $\alpha$  juga meningkatkan perbedaan tekanan antara *lower* dengan *upper side* yang semuanya itu meningkatkan separasi aliran yang akhirnya mengakibatkan penyumbatan.

Hal inilah yang menyebabkan turunnya tekanan serta turunnya efisiensi mesin-mesin fluida.



Gambar 2-15 Pengaruh  $\alpha$  terhadap aliran sekunder [35]

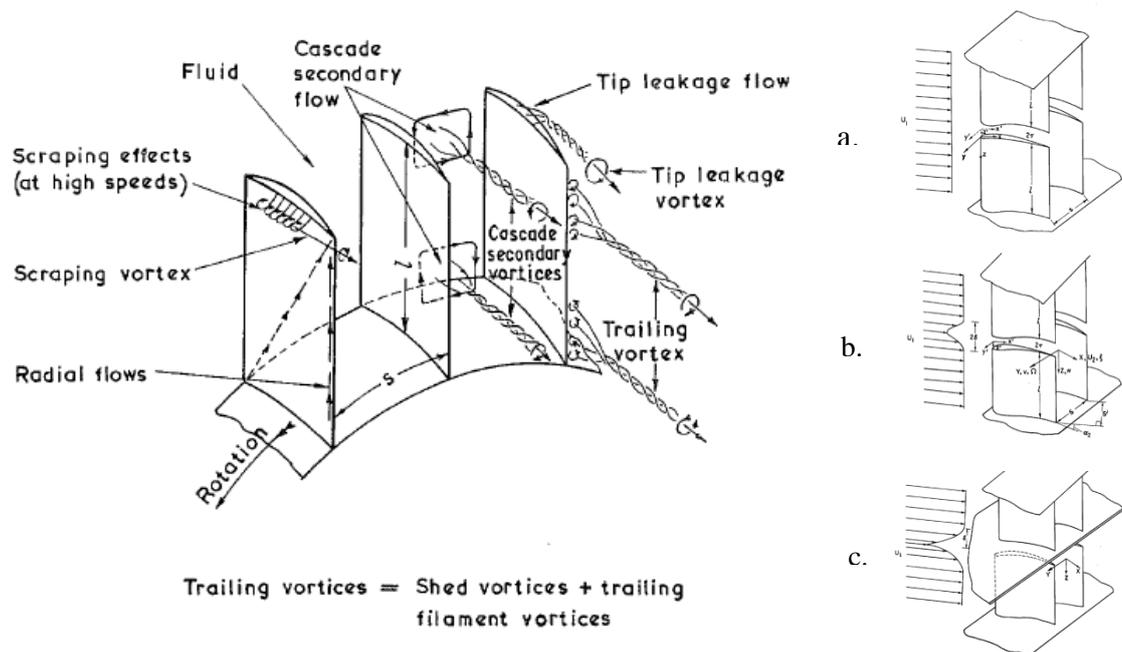
Levchenya et al [36] melakukan simulasi numerik dengan membandingkan model viscous antara Wilcox Model dan Meyer Shear Stress Transport (MSST) untuk menjelaskan tentang aliran 3D pada sebuah sayap. Pada daerah depan *leading edge* terjadi *singular point* berupa *saddle point* yang merupakan titik awal terjadi aliran 3D. Pada dua model viscous tersebut dipaparkan pada gambar 2-16, dimana model Wilcox tidak mampu memaparkan terjadi *foci* sedangkan untuk model MSST mampu memperlihatkan fenomena aliran tersebut. Sedangkan konfigurasi *horseshoe vortex* tampak terlihat dengan jelas menggunakan metode numerik.



Gambar 2-16 *Saddle Point* Aliran 3D Pada Bodi Sayap [36] a).Model Wilcox, b).Model MSST.

### 2.3 Aliran 3D Pada *Turbomachinery*.

Laksminaraya dan Horclock [1] memaparkan bentuk topologi aliran 3D pada *turbomachinery* yang sangat berbeda fenomenanya dibandingkan dengan bodi tunggal. Pada *compressor* ditunjukkan pada gambar 2-17 dimana aliran 3D dibagi menjadi dua jenis yaitu *tip leakage vortex* dan *trailing cascade secondary vortices*. Pada daerah *tip* fluida yang berada pada *discharge side* memiliki tekanan yang lebih tinggi dibandingkan *suction side*, sehingga fluida aliran selalu berupaya mengalir menuju *suction side*. Akibatnya aliran melintasi *beside body* kemudian bertemu dengan aliran *viscous* berasal dari aliran primer, pertemuan dua aliran tersebut berinteraksi sehingga munculnya aliran 3D yang disebut *tip vortex*. Sedangkan daerah *root* aliran yang mengalir dari *pressure side* menuju *suction side* disebut aliran melintang (*cross flow*). Kemudian aliran tersebut bertemu dengan aliran *curl flow*, yaitu aliran yang terjadi akibat beda tekanan di daerah *trailing edge*. Dampak pertemuan kedua aliran tersebut menyebabkan terjadi aliran 3D yang disebut sebagai *trailing vortex* atau *cross passage flow* yang sangat besar terjadi di daerah *root*. Sedangkan pada daerah *midspan* dampak terjadi *cross flow* tidak terlalu besar karena aliran dahulu terinjeksi oleh aliran *free stream* sehingga aliran tersebut lebih kuat.



Gambar 2-17 Topologi aliran pada kompresor aksial. (a,b,c model pengujian).

Laksminaraya dan Horclock [1].

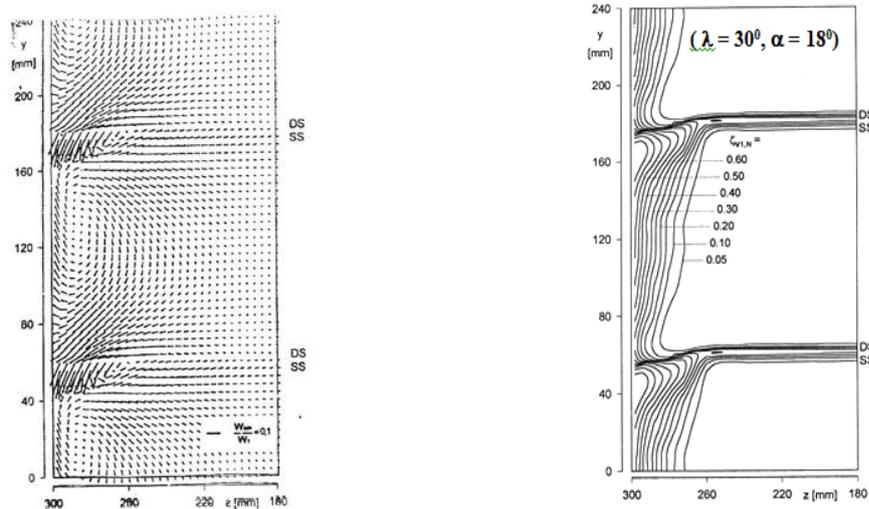
Eksperimen yang dilakukan oleh Laksminaraya dan Horclock, dimana eksperimen (a) menggunakan aliran dengan kecepatan aliran yang *uniform* sedangkan untuk eksperimen (b) menggunakan aliran yang *non-uniform* sehingga dapat diilustrasikan pada gambar tersebut. Kemudian pada eksperimen (c) bagian *tip* diberikan sebuah bidang tumpu sehingga bagian tersebut berubah menjadi sebuah analisa di daerah *root*. Pada tabel 2-1. dipaparkan hasil pengukuran terjadi kerugian energi akibat adanya aliran 3D. Pada penelitian ini menyatakan efek dari *leakage* yaitu  $\lambda = \frac{gap}{chord}$ , terhadap kerugian laju massa aliran. Pada eksperimen menyatakan dampak *leakage* menyebabkan terjadi aliran 3D yang berupa *tip vortex* penyumbatan aliran sebesar 31%. Sedangkan dampak terhadap profil kecepatan yang tidak *uniform* menyebabkan penyumbatan sebesar 16%. Selain efek kumulatif yang ditimbulkan oleh *leakage* dan *non-uniform* aliran sebesar 41.6%. Dampak terbesar penyumbatan terbesar disebabkan oleh terjadi efek dinding yang disebut sebagai *endwall vortex* menyebabkan penyumbatan aliran sebesar 54%. Namun ketika diberikan sebuah *leakage* dapat mereduksi terjadi *endwall vortex* cukup besar sehingga penyumbatan aliran turun menjadi 12.5%.

Tabel 2-1 Hasil Eksperimen 3D Flow terhadap *mass averaged loss coefficient*

Experiment	$\lambda$	Inlet Flow	$\zeta$	$\left(\frac{\bar{\zeta}_{3d} - \bar{\zeta}_{2d}}{\bar{\zeta}_{2d}}\right) \times 100$
A	0	Uniform	0.024	0
A	0.04	Uniform	0.032	31
B	0	Non-uniform	0.028	16
B	0.04	Non-uniform	0.034	41.6

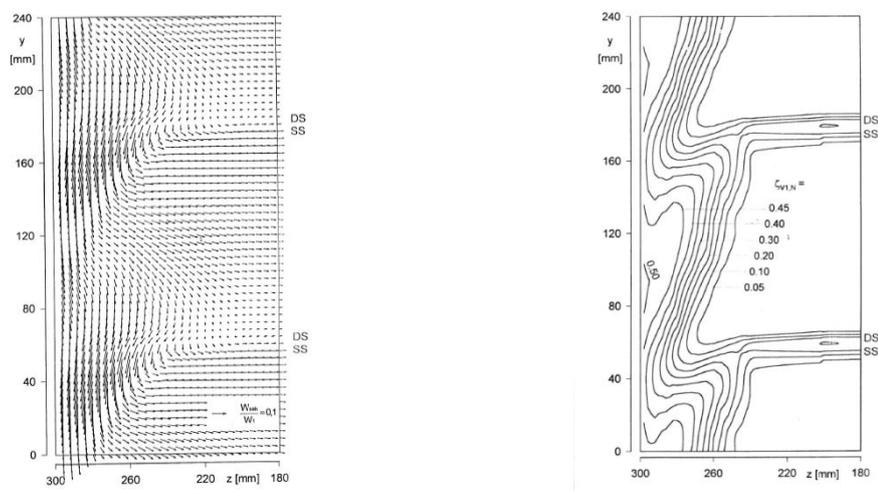
Experiment	$\lambda$	Inlet Flow	$\zeta$	$\left(\frac{\bar{\zeta}_{3d} - \bar{\zeta}_{2d}}{\bar{\zeta}_{2d}}\right) \times 100$
A	0	Uniform	0.024	0
C	0	Steep inlet velocity profile	0.037	54
C	0.04	Steep inlet velocity profile	0.027	12.5

Sasongko [13] memaparkan bahwa penyebab terjadi penyumbatan aliran didekat antara *endwall* dan bodi pada susunan kaskade kompresor aksial disebabkan oleh *blade stall* atau *corner stall* seperti yang diungkapkan oleh peneliti sebelumnya. Pada gambar 2-18 dipaparkan kecepatan tangensial yang melintasi *trailing edge* dan *total pressure loss coefficient*. Dampak penyumbatan akibat adanya *blade stall* hanya terjadi pada daerah didekat *endwall*. Sedangkan pada daerah mendekati *midspan* tidak terdampak terjadi penyumbatan aliran.



Gambar 2-18 Fenomena *Blade Stall* atau *Corner Stall*. Pada *Stagger*  $30^\circ$ , *Angle of Attack*  $(\alpha)$   $18^\circ$ . [13].

Sasongko [13] mengungkapkan bahwa dengan memperkuat *stagger* pada susunan kaskade menyebabkan *cross flow* semakin kuat dan menguasai daerah *downstream* sehingga aliran tersumbat. Penyumbatan aliran tersebut tidak hanya terjadi pada daerah *endwall*, namun juga terjadi di sepanjang *midspan*. Peristiwa ini disebut dengan teori *wall stall* yang dikemukakan oleh Sasongko[13] yang sangat berbeda dibandingkan dengan *blade stall* atau *corner stall*. Pada gambar 2-19 dipaparkan distribusi vektor kecepatan dan kerugian energi di sepanjang *downstream*.



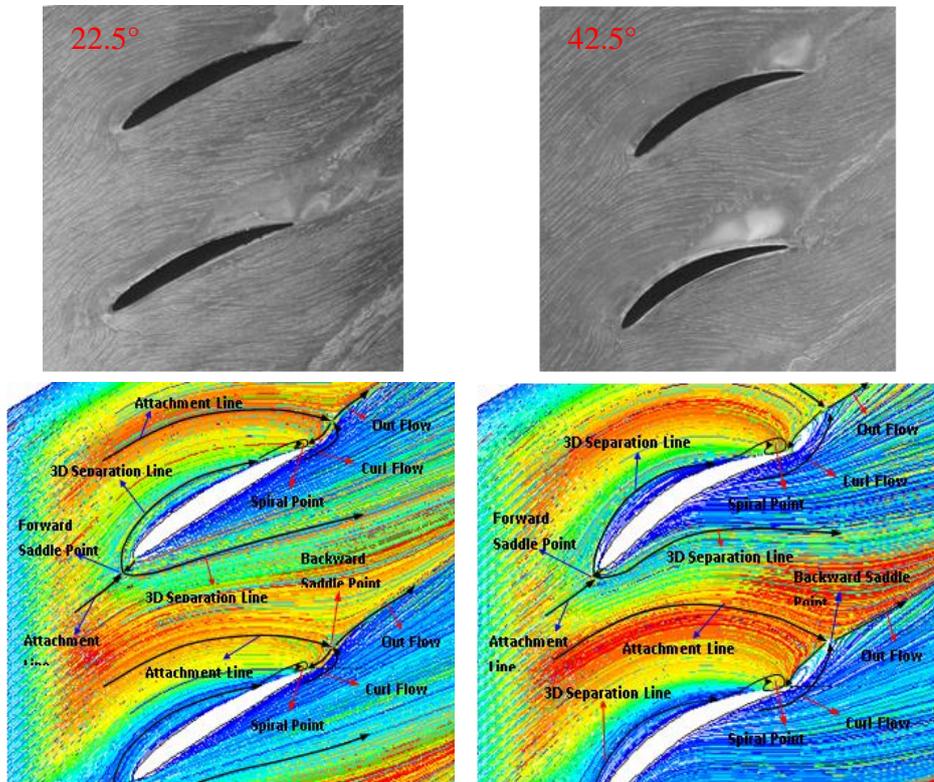
Gambar 2-19 Fenomena *Wall Stall*. Pada *Stagger*  $50^\circ$ , *Angle of Attack*( $\alpha$ )  $12^\circ$ . [13]

Pada gambar 2-19 tersebut bila masing-masing diperhatikan maka, sebelum aliran memasuki lorong sudu (sedikit didepan *leading edge*), lapisan batas aliran pada pelat datar (*incoming boundary layer*) terseparasi secara 3D. Separasi ini disebabkan aliran dekat *endwall* (memiliki momentum yang rendah) terhalang oleh formasi *horseshoe vortex* di depan *leading edge*. Dengan demikian energi yang dimiliki tidak cukup mampu untuk menembus hingga permukaan bodi, sehingga aliran terseparasi secara 3D sebelum menyentuh bodi. Separasi ini ditandai dengan terbentuknya *Forward Saddle Point* dengan 2 cabang garis separasi 3 dimensi (*3D separation lines*). Percabangan *forward saddle point* salah satu cabang *3D separation lines* bergerak menyusuri *suction side* menuju ke arah *downstream*. Sedangkan cabang yang lain bergerak ke *pressure side* selanjutnya menuju *downstream* dengan arah sejajar arah aksial.

Pada sudut pembebanan yang sama ( $\alpha = 8^\circ$ ), terlihat kaskade dengan *camber*  $22,5^\circ$  seolah-olah menerima pembebanan yang lebih besar. Hal ini disebabkan dengan *camber* yang rendah maka, pemutaran geometri bodi untuk memperbesar  $\alpha$  membuat bidang geometri yang tegak lurus arah fluida datang tampak bergeser ke arah *pressure side*. Sehingga bidang geometri *leading edge* yang tegak lurus aliran fluida datang menjadi lebih luas dibandingkan dengan kaskade dengan *camber*  $42,5^\circ$ . Akibat kondisi ini maka *horseshoe vortex* di depan *leading edge* memiliki intensitas yang lebih kuat. Selanjutnya vortex tersebut membungkus serta menyelimuti sudu sambil bergerak ke arah *downstream*. Dengan semakin meningkatnya kekuatan *horseshoe vortex* maka separasi terjadi lebih awal, sehingga jarak *forward saddle point* terhadap *leading edge* semakin lebih jauh. Demikian juga ketika aliran di atas *endwall* dengan momentum yang lebih besar menuju ke daerah rendah momentum (*endwall*) maka aliran tersebut didefleksikan menjauhi permukaan bodi. hal inilah yang membuat separasi yang terjadi mempunyai bentuk *shear stress line* dengan *stream tube* yang lebih membuka lebar.

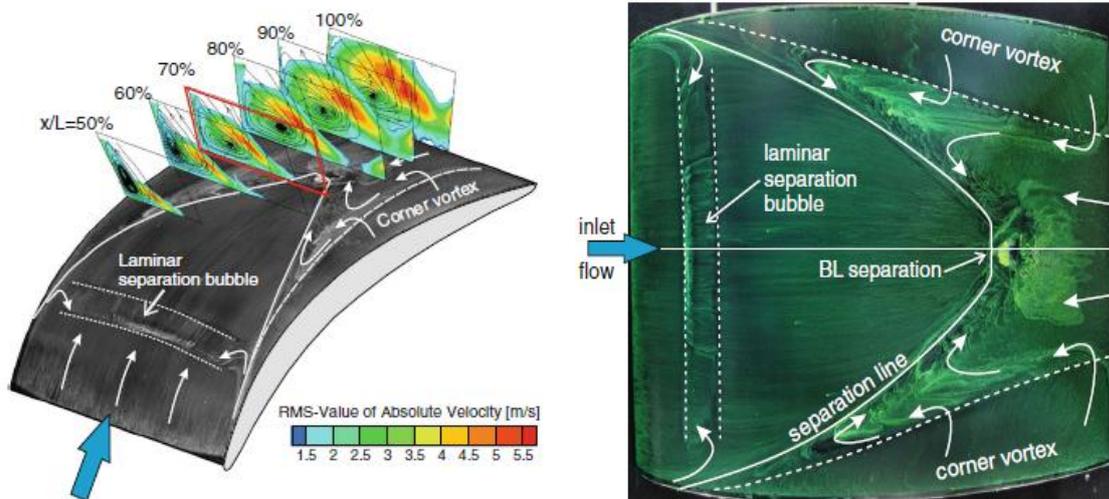
Pada lorong sudu, masing-masing model uji mempunyai karakteristik medan aliran yang sangat berbeda. Pada gambar 2-20 terlihat struktur *shear stress line* pada awalnya mempunyai bukaan *stream tube* yang lebih lebar, namun *3D separation line* dari percabangan *forward saddle point* selanjutnya bergerak lurus menuju *downstream*. Struktur medan aliran pada kaskade *camber*  $42,5^\circ$ , pada awalnya (dekat dengan *leading edge*), bukaan *stream tube* terlihat relatif kurang lebar atau aliran sangat dekat dengan bodi airfoil. Namun pada jarak  $\pm 0,2$  *chord*, tampak goresan *shear stress line* semakin membuka dan aliran secara tajam menuju *suction side* sudu bersebelahan serta membuat *wake* pada *downstream* semakin lebar. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pengaruh bentuk geometri sudu sangat signifikan terhadap struktur medan aliran pada lorong sudu. Geometri bodi dengan *camber* yang lebih besar (lengkung) menghasilkan perbedaan tekanan yang lebih besar antara *pressure side* dengan *suction side*. Aliran pada *pressure side* memiliki energi tekan yang lebih besar dibanding sekitarnya, sehingga aliran bergerak menuju daerah tekanan rendah pada *suction side* sudu bersebelahan dan membentuk *cross passage flow* dengan intensitas yang lebih

kuat. Kekuatan intensitas *cross passage flow* dapat diketahui dari curva *shear stress line* yang terbentuk semakin lengkung.



Gambar 2-20 Perbandingan Topologi Aliran 3D antara Bodi Kelengkungan 22.5° dan 42.5°, Pada *Stagger* 50°, *Angle of Attack* ( $\alpha$ ) 12°. [35].

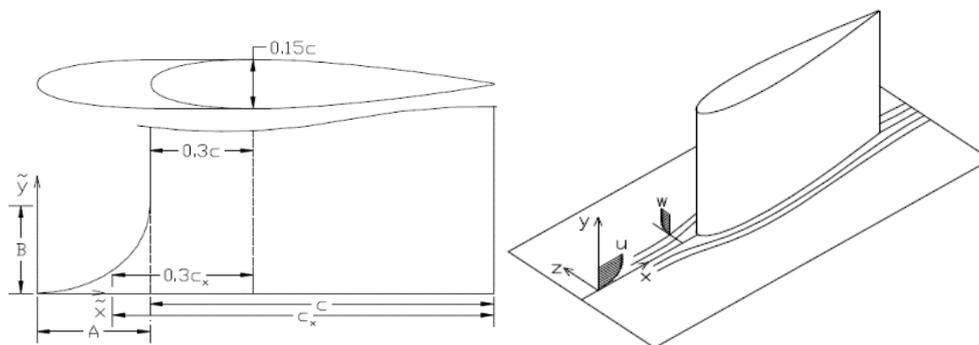
Dampak *corner stall* diperjelas dengan hasil numerik yang dikombinasi dengan hasil eksperimen dikemukakan oleh Hecklau et al [37]. Pada gambar 2-21 pada *suction side* terlihat ukuran *corner vortex* menguasai saluran 50%. Hal ini sesuai dengan pendapat penelitian sebelumnya diantaranya Lakminarayana, Horclok, Dixon dan Cohen menyatakan bahwa 50% kerugian hidrolis disebabkan oleh separasi aliran 3D, sedangkan 30% disebabkan oleh friksi dinding annulus dan 20% disebabkan oleh bentuk profil geometri bodi. Oleh karena itu diperlukan upaya untuk mereduksi terjadi aliran 3D khusus didaerah *endwall* dan bodi.



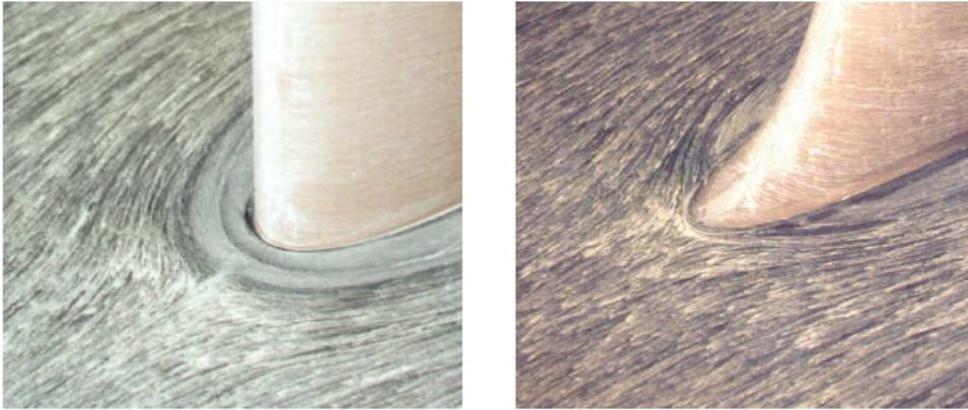
Gambar 2-21 Corner Stall Pada Suction Side. [37].

## 2.4 Reduksi terhadap aliran 3D.

Steenart et al [16] telah melakukan upaya untuk mereduksi terjadi aliran 3D, dengan cara pemberian *fairing* depan *leading edge*. *Fairing* bertujuan untuk memperkecil dampak terjadi *adverse pressure* di depan bodi sebuah sayap. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan penggunaan *fairing* dapat mereduksi berkembang *boundary layer* sehingga separasi aliran dapat tertunda. Kemudian dampak lainnya adalah mengecilkan daerah yang bertekanan tinggi, titik stagnasi lebih mendekat dengan bodi, dan reduksi terjadi *drag*. Gambar eksperimen karakteristik aliran dipaparkan pada gambar 2-22 dan gambar 2-23 OFV tanpa dan dengan *fairing leading edge*.

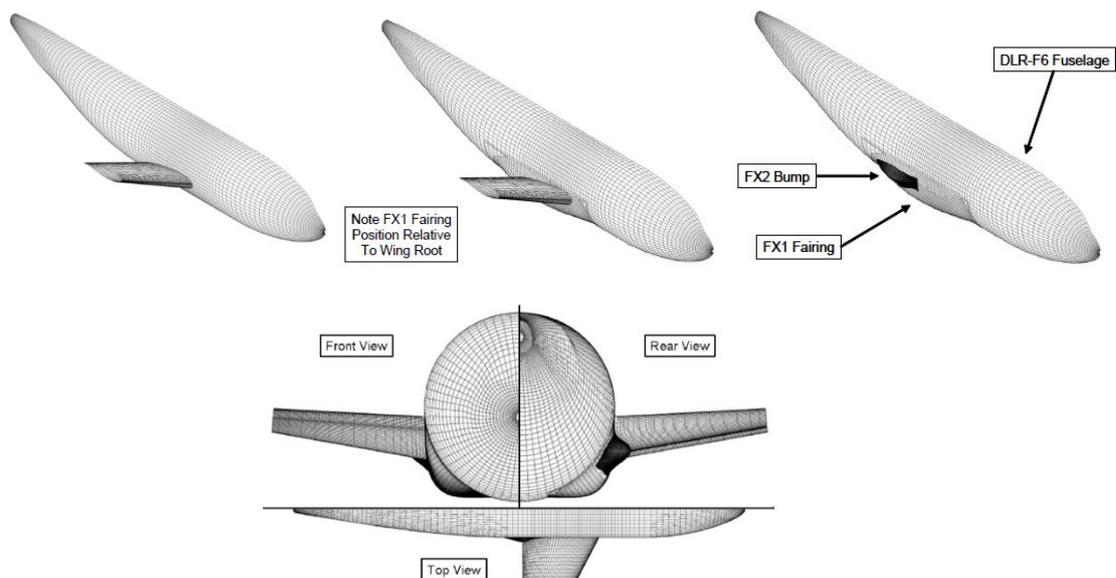


Gambar 2-22 Dimensi *fairing* [16].



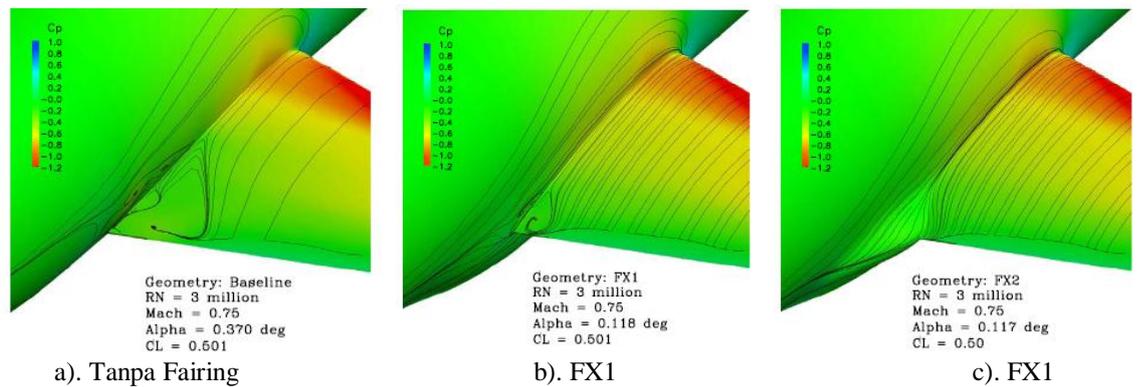
Gambar 2-23 Perbedaan *Oil flow visualization* tanpa dan dengan *fairing leading edge*. [16]

Selain itu Vassberg et al [38] melakukan hal yang sama, yaitu digunakan *fairing* pada daerah *leading edge* dan *trailing edge* pada sebuah sayap pesawat terbang. Pada gambar 2-24 dipaparkan bahwa penggunaan *fairing* di depan *leading edge* digunakan jenis *fairing* FX1, sedangkan untuk *fairing* yang diletakkan pada bagian *trailing edge* digunakan *bump* FX2. Bentuk *fairing* sangat rumit namun memiliki bentuk yang aerodinamis. Untuk gambar tampilan atas dan depan dipaparkan pada gambar yang sama. Kemudian model tersebut disimulasikan menggunakan komputer .



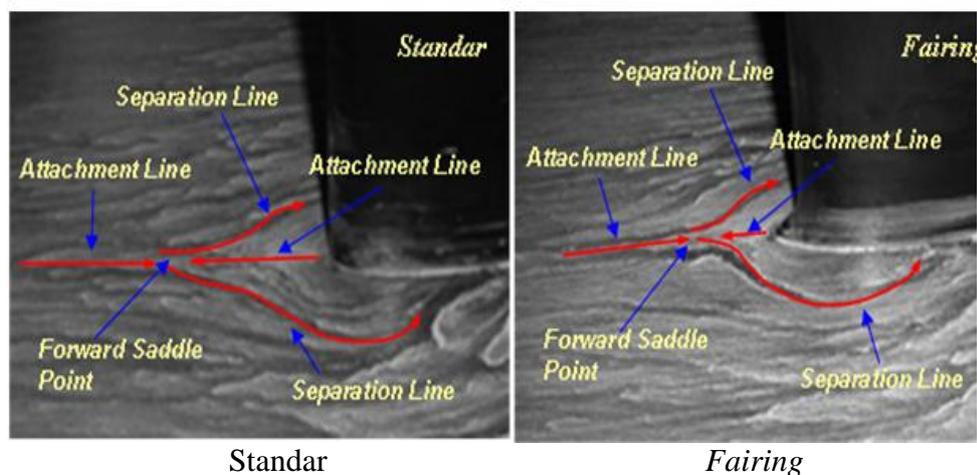
Gambar 2-24 Penggunaan *Fairing* pada *leading edge* (FX1), dan pada *bump trailing edge*(FX2). [38]

Hasil simulasi numerik dipaparkan pada gambar 2-25, dimana penggunaan *fairing* FX1 dapat berperan besar mereduksi terjadi *corner wake* di belakang *trailing edge*. Namun penggunaan *fairing* FX1 tidak dapat menghilangkan terjadi *corner wake*. Ketika digunakan dua jenis yaitu *fairing* FX1 dan *bump* FX2 yang dipaparkan pada hasil simulasi tidak tampak terjadi *corner wake* di daerah tersebut. Sehingga konfigurasi *fairing* ini sangat baik mereduksi terjadi penyumbatan akibat terbentuk *corner wake*.



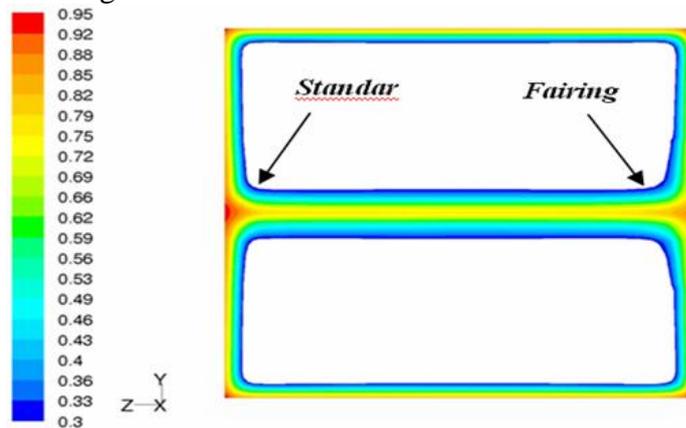
Gambar 2-25 Aliran 3D pada *Trailing Edge* di sayap. [38]

Penyataan tentang penggunaan *fairing* dapat mempersempit garis separasi 3D dan mendekatkan *saddle point* atau *forward saddle point* didukung oleh hasil eksperimen Mirmanto dan Sasongko [4]. Pada gambar 2-26 dipaparkan dengan jelas hasil visualisasi jejak *skin friction* pada bidang tumpu.



Gambar 2-26 Visualisasi jejal aliran pada bodi tanpa dan dengan *fairing*. [4]

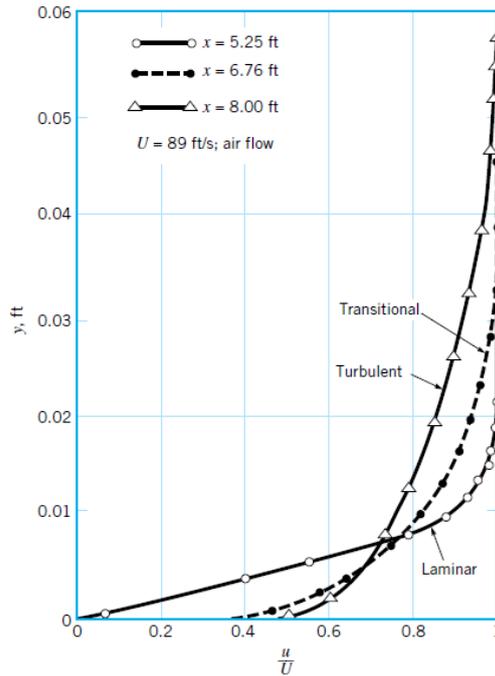
Selain itu dampak aliran separasi 3D tidak hanya berhenti pada bagi *upstream* saja, namun berdampak besar pada daerah *downstream*. Pada gambar 2-27 dijelaskan bahwa kerugian energi yang dinyatakan sebagai *total pressure loss coefficient* menunjukkan bahwa dengan penggunaan *fairing* dapat mereduksi terjadi kerugian energi.



Gambar 2-27 *Total pressure losses coefficient*( $\xi$ ).[4]

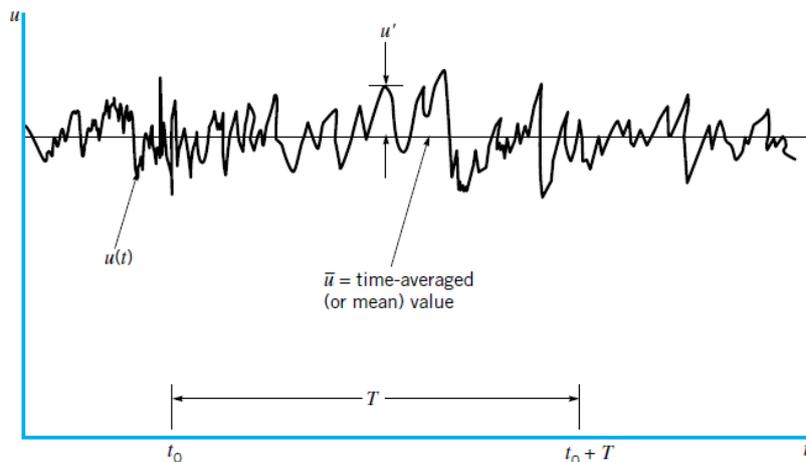
## 2.5 Turbulen Generator (Turbulator).

Schlichting [17] menyatakan pada *boundary layer* aliran yang lebih turbulen (*high turbulent intensity*) selalu dihasilkan momentum yang lebih *fuller* sehingga lebih kuat momentumnya di daerah dekat permukaan bidang gesekan. Munson et al [39] mendukung pernyataan dari Schlichting bahwa aliran semakin turbulen semakin *fuller* yang dipaparkan berupa profil kecepatan pada gambar 2-28. Profil kecepatan pada aliran turbulen memiliki *disturbance thickness* yang semakin tebal, namun momentum aliran didekat dinding sangat besar dibandingkan dengan aliran laminar.



Gambar 2-28. Perbandingan profil kecepatan aliran laminar dan turbulen [39].

Munson et al [36] berdasarkan bilangan *Reynolds* menyatakan bahwa aliran turbulen memiliki komponen fluktuasi kecepatan seperti gambar 2-29, semakin besar fluktuasi komponen kecepatan selalu diidentitaskan dengan aliran yang semakin turbulen. Oleh karena itu aliran yang semakin turbulen walaupun kecepatan *freestream* yang sama memiliki momentum kuat di dekat dinding, sehingga aliran yang lebih turbulen lebih mampu menghadapi hambatan friksi dan *adverse pressure*.



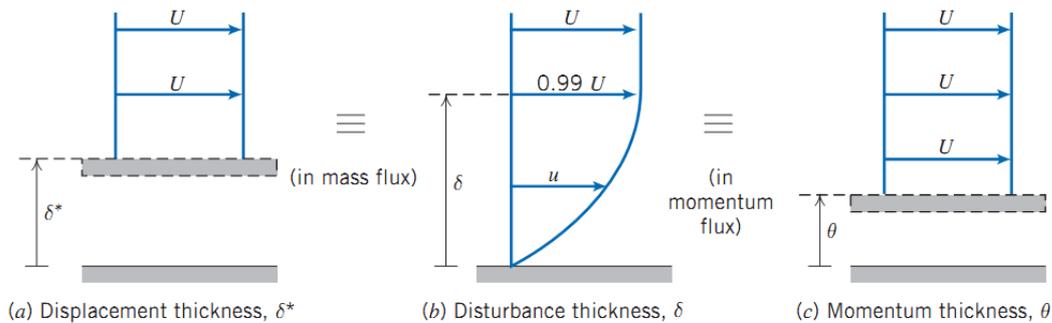
Gambar 2-29 Fluktuasi kecepatan. [39].

Oleh karena itu reduksi terjadinya aliran sekunder dapat dilakukan dengan meningkatkan turbulensi aliran, sehingga aliran dekat dinding lebih mampu menghadapi *adverse pressure*. Upaya peningkatan turbulensi aliran dilakukan melalui penambahan *turbulent generator* (turbulator) pada bidang tumpu. Indentitas intensitas turbulensi diperlihatkan pada persamaan 2-1, dimana merupakan perbandingan fluktuasi kecepatan *root mean square*(RMS) atau akar rerata kuadrat kemudian dibandingkan dengan kecepatan rata-rata.

$$T_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \quad 2-1$$

Analisa *boundary layer* eksternal yang dikemukakan oleh Fox dan McDonald [40] dimana ketebalan boundary layer dinyatakan sebagai *disturbance thickness* seperti pada gambar 2-30. Luas permukaan defisit momentum yang dipengaruhi oleh efek friksi ditampilkan dalam bentuk plat dengan ketinggian *displacement thickness*, dengan persamaan 2-2.

$$\delta^* = \int_0^1 \left(1 - \frac{u}{U}\right) d\frac{y}{\delta} \quad 2-2$$



Gambar 2-30 Definisi *boundary layer* [40]

Jarak ketebalan kerugian momentum yang diakibatkan oleh friksi didefinisikan sebagai *momentum thickness* dipaparkan pada persamaan 2-3. Parameter dijadikan perbandingan dengan *displacement thickness* dengan *momentum thickness* disebut dengan *shape factor* pada persamaan 2-4. Nilai *shape factor*( $H$ ) semakin kecil apabila semakin turbulen, dimana nilai diantara 1,3 - 2,5 merupakan aliran turbulen dan untuk aliran laminar bernilai 2,6 - 3,5.

$$\theta = \delta^* \frac{u}{U} = \int_0^1 \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) d\frac{y}{\delta} \quad 2-3$$

$$H = \frac{\delta^*}{\theta}$$

2-4

Pada tabel 2-2 dipaparkan beberapa peneliti yang membahas tentang penggunaan pengganggu aliran yang dapat memicu turbulensi yang disebut sebagai *turbulent generator* (Turbulator). Bentuk turbulator diklasifikasikan menjadi beberapa spesifikasi yaitu *riblet*, *groove*, *obstacle* dan *blunt/bluff*.

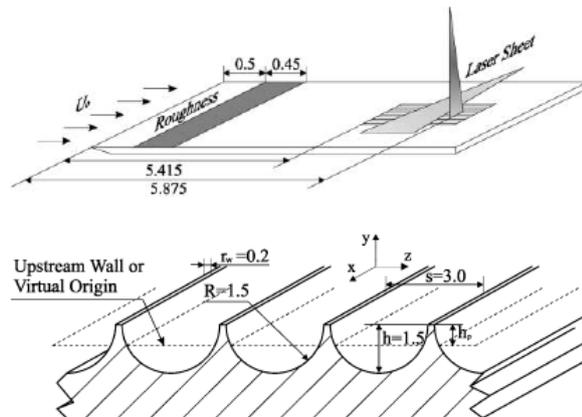
Tabel 2-2 Peneliti yang membahas turbulator.

Riblets	Groove	Obstacle	Blunt/Bluff
Lee bersaudara, Vismanath, Bartenwerfer, M., dll	Elavarasan, R.A. Antonia, Sutardi, C.Y Ching, B.L Parson, dll	S. Becker, H.Lienhart, Fokamoto, S., Wawan. A.W, .Dust., dll	Djilali.N, Yoghoubi, M, Mahmoodi, Suksangpanomrung, Moinat, dll

Klasifikasi bentuk turbulator dibagi sebagai berikut ini :

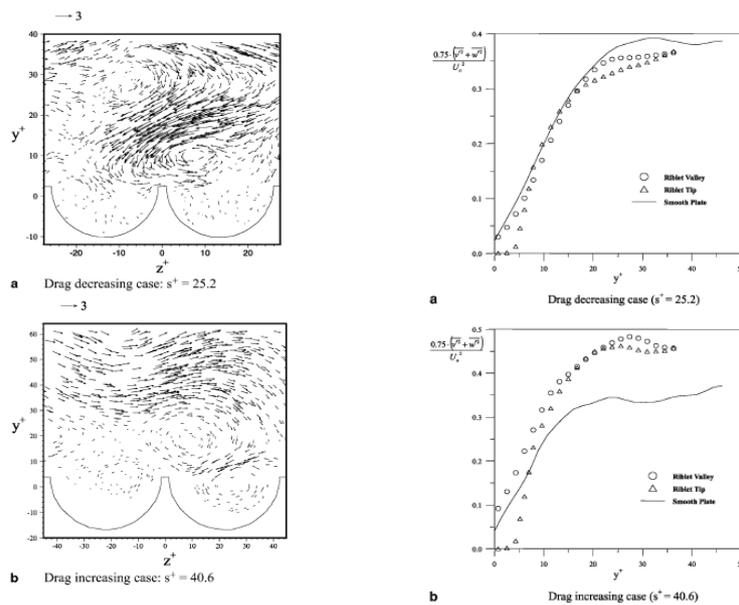
### 2.5.1 Riblet.

Lee bersaudara [41] melakukan penelitian tentang sebuah plat datar yang permukaan diberikan profil setengah lingkaran yang berjajar paralel. Konfigurasi tersebut disebut sebagai *riblets* atau pemberian kekasaran permukaan lintasan aliran. Pada gambar 2-31 dipaparkan sistem pengujian eksperimen dan profil *riblets* yang dilakukan oleh Lee bersaudara.



Gambar 2-31 Eksperimen dan Profil *Riblets*. [41]

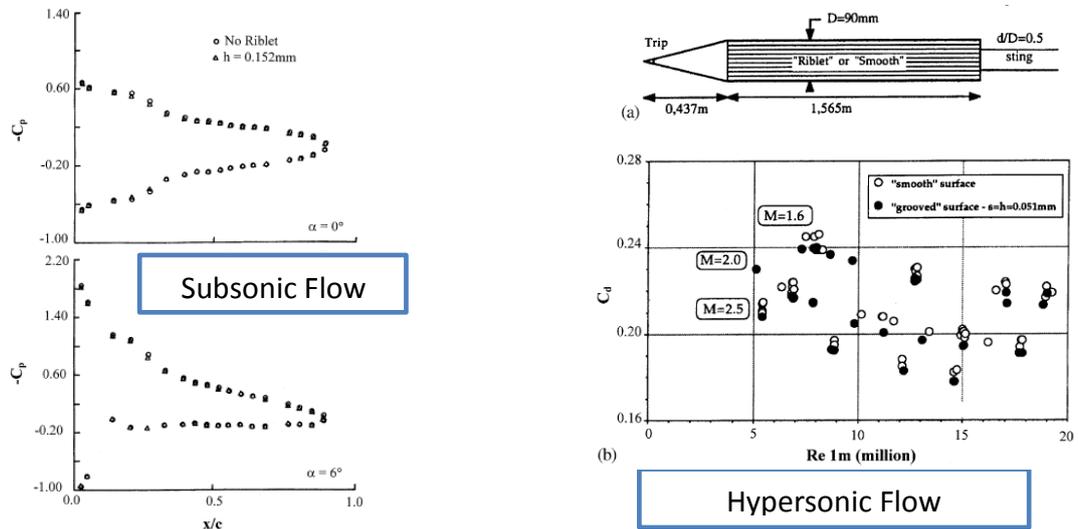
Hasil eksperimen menyatakan bahwa perubahan *drag* yang terjadi pada sebuah permukaan sangat tergantung dari kecepatan aliran dan dimensi lebar dan tebal sebuah *riblets*. Apabila nilai dari intersitas turbulensi kinetiknya semakin tinggi menyebabkan terjadi *drag* semakin besar sedang sebaliknya terjadi *drag* semakin kecil. Penggunaan *riblets* dapat memperbesar dan memperkecil *drag*, hal itu tergantung dari konfigurasi ketebalan dan lebar sebuah *riblets*. Sehingga penggunaan *riblets* ini sangat rumit digunakan sebab karakteristik aliran sangat rentang terhadap dimensi. Selain itu ketika aliran *free stream* divariasikan antara 3m/s dan 5m/s, menyebabkan perubahan manfaat *riblets*. Semula penggunaan *riblets* dapat mereduksi terjadinya *drag*, namun ketika aliran dipercepat, maka menambahkan terjadi *drag*. Hal ini menyebabkan penggunaan *riblets* ini sangat sulit digunakan untuk mereduksi terjadi separasi aliran di dekat dinding. Pada gambar 2-32 dipaparkan profil kecepatan dan turbulen kinetik energinya.



Gambar 2-32 Vektor kecepatan dan *Turbulent Kinetic*. [41]

Kemudian Viswanath [21] melakukan hal yang sama, dimana profil *riblets* yang digunakan berbentuk segitiga. Pengujian dilakukan pada *subsonic flow* dan *hypersonic flow*. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan *riblets* pada aliran *subsonic flow* tidak memiliki peningkatkan *pressure coefficient* yang berarti. Sedangkan pada aliran *hypersonic* dampak penggunaan *riblets* sangat signifikan.

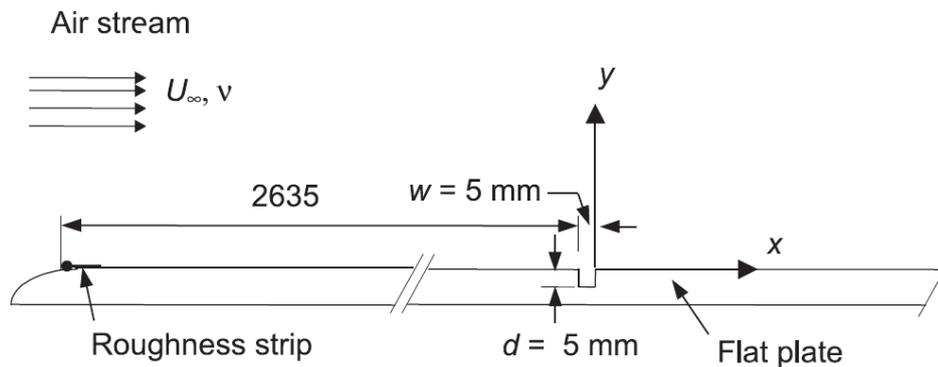
Oleh karena itu penggunaan *riblets* kurang tepat digunakan pada aliran *incompressible subsonic flow*. Pada gambar 2-33 dipaparkan karakteristik aliran yang melintasi permukaan benda yang diberikan kekasaran permukaan (*riblets*).



Gambar 2-33 Koefisien tekanan pada bodi dengan dan tanpa *riblet*. [21]

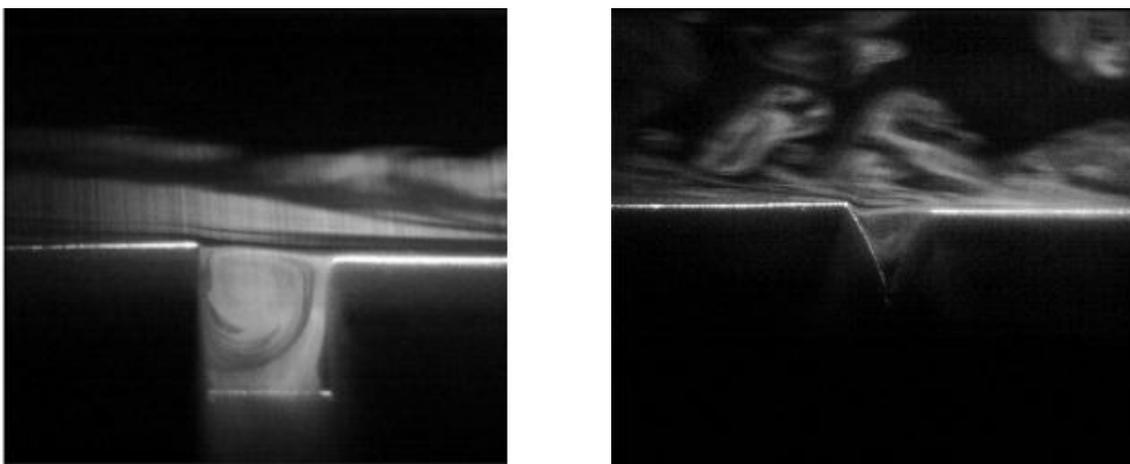
## 2.5.2 Groove.

*Groove* dalam bahasa Indonesia disebut sebagai alur. Penelitian tentang *groove* persegi pada permukaan dikembangkan oleh Sutardi dan Ching [18]. Penelitian ini difokuskan pada terhadap investigasi dua nilai *momentum thickness* menggunakan *hot wire anemometry*, dipaparkan pada gambar 2-34. Hasilnya menyatakan pada *Reynolds number* rendah ( $Re_\theta = 1000$ ) efek penggunaan *groove* tidak signifikan terhadap *wall shear stress*. Sedangkan pada *Reynolds number* tinggi ( $Re_\theta = 3000$ ) dapat meningkatkan *wall shear stress* pada daerah *downstream*. Untuk profil kecepatan rata-rata tidak mengalami perubahan signifikan pada kedua *Reynolds number* tersebut. Pada sarannya mengatakan bahwa untuk peningkatan profil kecepatan mungkin terjadi, jika digunakan *groove* persegi yang berdimensi rasio  $w/d < 0.1$ . Terjadi sedikit penurunan *intensity turbulent streamwise* didaerah *inner*.



Gambar 2-34 Domain penelitian *groove* persegi.[18].

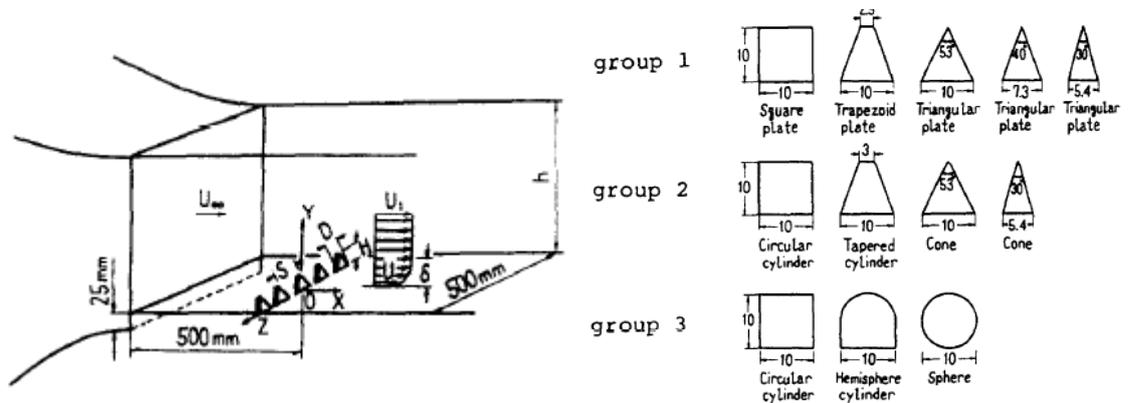
Kemudian Sutardi [17] melanjutkan penelitian dengan memvariasikan bentuk *groove* menggunakan *Square* (SQ), *semi-circular*(SC) dan *triangular*(TR). Hasilnya menyetakan bentuk *groove* yang paling efektif adalah SQ dibandingkan dengan yang lainnya. Semua bentuk *groove* tidak berdampak pada profil kecepatan aliran, oleh karena itu *groove turbulator* tidak tepat digunakan untuk meningkatkan energi aliran. Terjadi peningkatan intensitas turbulensi searah aliran yang signifikan di *inner region*. Pada gambar 2-35 dipaparkan visualisasi aliran berupa rekaman jejak asap di dekat permukaan datar. Hasilnya menunjukkan, pada TR aliran terlihat kotor dengan *vortex* didekat permukaan sedangkan pada SQ sangat bersih. Hal ini menunjukkan hasil yang sama terhadap hasil pengukuran.



Gambar 2-35 Visualisasi *smoke* pada *groove*. [18]

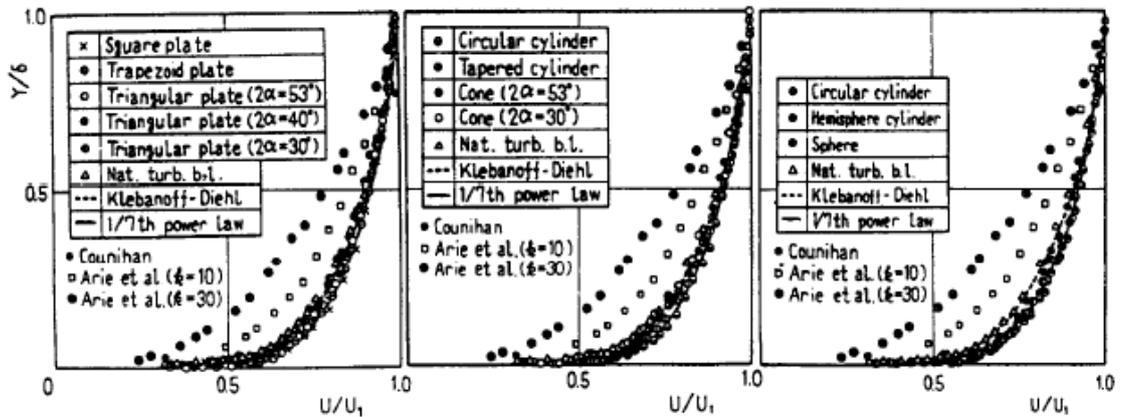
### 2.5.3 Obstacle.

*Obstacle* merupakan benda sebagai hambatan aliran. Okamoto [42] menggunakan *obstacle* berbagai bentuk dan domain eksperimen dipaparkan pada gambar 2-36. Penelitian ini menfokuskan pada efek penggunaan *obstacle* pada sebuah saluran. Kecepatan aliran *free stream* yang digunakan adalah 18m/s dengan  $Re = 1.24 \times 10^4$  dan intensitas turbulensi 0.6%.



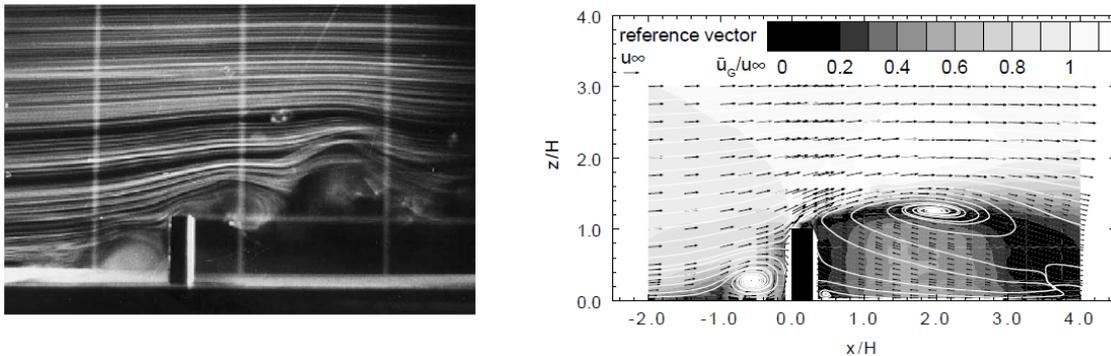
Gambar 2-36 Domain eksperimen dan profil *obstacle* [42]

Hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil yang diperoleh oleh eksperimen Klebanoff dan Diehl dan profil kecepatan persamaan *power law*. Pada gambar 2-37 ditunjukkan hasil perbandingan profil kecepatan plat datar dengan penggunaan *obstacle*. Profil kecepatan di dekat dinding mengalami penurunan yang sangat besar.



Gambar 2-37 Perbandingan profil kecepatan plat datar dan dengan *obstacle*. [42]

Becker et al [43] dilakukan pengamatan aliran melintasi *obstacle rectangular body*. Pada gambar 2-38 ditunjukkan hasil visualisasi asap dan numerik yang terjadi akibat penggunaan *obstacle rectangular*. Hasil eksperimen menunjukkan aliran setelah melewati *obstacle* menyebabkan terjadi aliran 3D yang sangat rumit dan kompleks. Sehingga aliran tersebut mengalami defisit energi yang cukup besar di dekat *endwall* seperti yang dikemukakan oleh Okamoto. Pada *obstacle rectangular body* terjadi *massive separation* daerah *downstream*. Sehingga dalam penggunaan *obstacle rectangular* tidak tepat digunakan untuk mereduksi terjadi separasi aliran 3D.

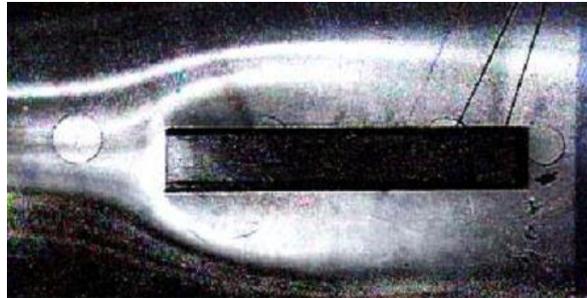


Gambar 2-38 Hasil visualisasi asap dan numerik pada *groove*. [43]

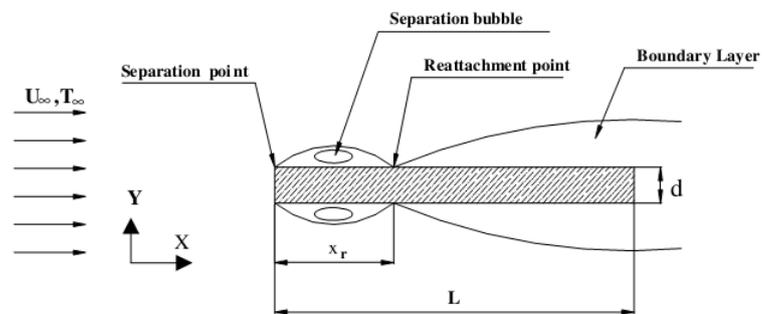
#### 2.5.4 Blunt/bluff.

Turbulator yang efektif merupakan perangkat yang dapat mempercepat terjadi transisi aliran, namun untuk keperluan aplikasi diharapkan didapatkan aliran yang memiliki energi momentum dan intensitas yang tinggi. Beberapa peneliti telah melakukan eksperimen terhadap karakteristik aliran disekitar *bluff rectangular*. Hasilnya didapatkan terjadi *bubble separation*, titik reattachment aliran atau berkembangnya kembali kondisi batas sangat ditentukan oleh dimensi *bluff rectangular* itu sendiri. Hal ini didukung hasil simulasi yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya Yaghoubi dan Mahmoodi [23]. Oleh karena itu diperlukan pengkajian secara khusus efek ketebalan *bluff rectangular* terhadap karakteristik aliran yang terjadi disekitarnya. Efek yang ditimbulkan oleh separasi aliran berdampak yang besar terhadap *unsteadiness*, struktur turbulent yang kompleks dan perbedaan *pressure gradient*. Inam dan Mashud [44] melakukan

eksperimen tentang aliran yang melintasi *bluff rectangular body* seperti pada gambar 2-39. Hasilnya menunjukkan yang sama dengan penelitian sebelumnya.



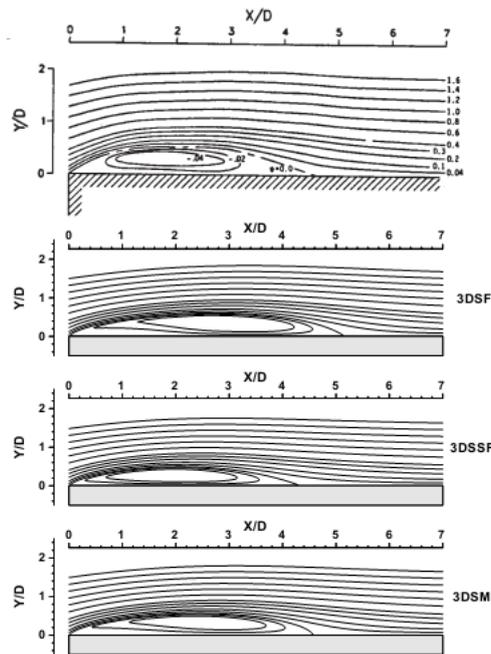
(a)



(b)

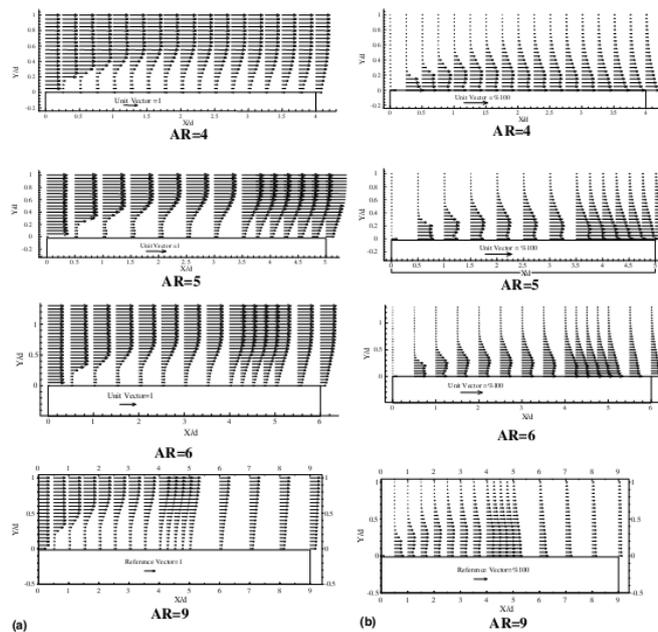
Gambar 2-39 Karakteristik Aliran Melintasi *Bluff Rectangular Body*  
a)Eksperimen [44] dan b).Numerik [23].

Djilali et al [26] melakukan perbandingan hasil numerik dengan hasil eksperimen, hasilnya dipaparkan sama dengan hasil penelitian sebelumnya. Dimana aliran yang mendatar didekat *endwall* mengalami hambatan berupa *bluff rectangular* yang ujungnya sangat tajam dengan berbentuk siku 90 derajat yang disebut *bluff rectangular*, akibatnya aliran tersebut bergerak keatas dan *streamline* terbuka. Ketika aliran tersebut bertemu dengan aliran yang berada diatasnya, maka aliran tersebut terdorong ke arah samping seperti semula dan *streamline* tertutup kembali atau disebut *reattachment flow*. Terbuka *streamline* aliran yang terbuka terlalu tinggi menyebabkan *streamline* aliran *free stream* diatasnya *streamtube* menyempit, hal ini memicu terjadi akselerasi aliran. Perbandingan antara eksperimen dan numeric yang dilakukan oleh Sungsangpanomrung [24] dipaparkan pada gambar 2-40.



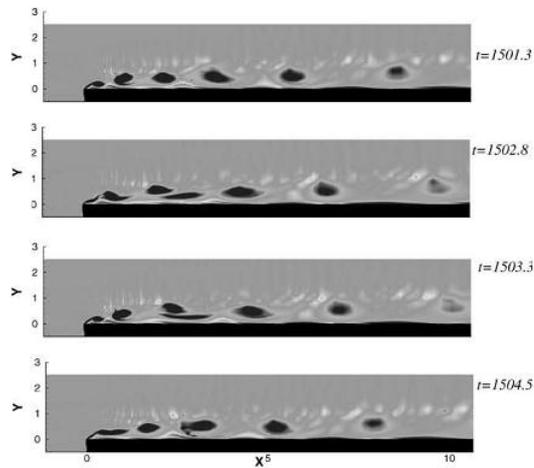
Gambar 2-40 Perbandingan Eksperimen dan Numerik Aliran Melintasi *Bluff Rectangular Body*. [24]

Yaghoubi dan Mahmoodi [23] melakukan penelitian tentang pengaruh ketebalan *bluff rectangular body* terhadap terjadi *reattachment* aliran, hasilnya ditunjukkan pada gambar 2-41. AR merupakan aspek rasio dengan perbandingan panjang(L) dan ketebalan(d) *bluff rectangular*. Semakin besar AR maka menghasilkan jarak *reattachment* yang lebih jauh dari jarak titik separasi aliran. Namun untuk aspek rasio yang terlalu besar menyebabkan aliran menjadi *massive separation*, hal ini terjadi aliran separasi aliran tidak mampu kembali atau tidak terjadi *reattachment*. Apabila terjadi *massive separation* aliran hancur menyebabkan penurunan momentum, seperti yang terjadi pada AR 9 pada penelitian Yaghoubi [23]



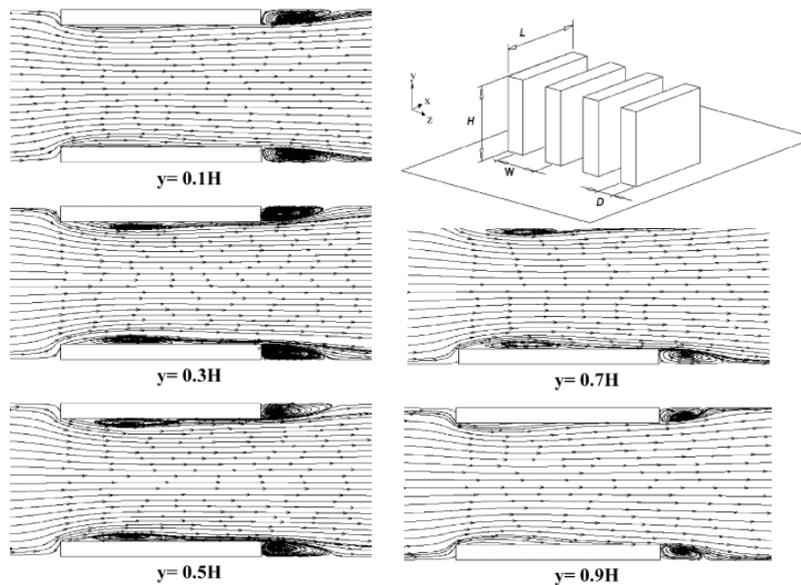
Gambar 2-41 Karakteristik Aliran Melewati *Bluff Rectangular Body* [23] a). Profil Kecepatan, b). Intensitas Turbulensi.

*Bubble separation* yang terjadi pada topologi aliran terjadi pada kondisi steady state, pada *real condition bubble separation* fenomenanya sangat indetentik terjadi Karman *vortex street* yang terjadi pada aliran yang melintasi bodi silinder. Aliran yang terseparasi selalu menggulung (*rolling up*), pada suatu saat lepas kemudian kembali membentuk vortex kembali setelah energi mampu mengatasi friksi vortex tersebut terlepas kembali, hal ini diungkap hasil simulasi numerik CFD dengan menggunakan metode unsteady. Ilustrasi pada fenomena tersebut dipaparkan oleh Inam dan Mashud [44] pada gambar 2-42. Namun hal tersebut tidak bisa diaplikasi pada penelitian ini sebab peralatan eksperimen yang berada di laboratorium fluida ITS Surabaya, tidak memiliki suatu perangkat pengukuran yang dapat menangkap visualization secara langsung. Sehingga analisa yang digunakan pada eksperimen penelitian ini menggunakan teknik OFV (*oil fluid visualization*) merupakan hasil kajian kondisi *steady state*, yang divalidasi menggunakan numerik CFD dengan menggunakan kondisi *steady state*. Penelitian *Bluff Rectangular Body* di dekat dinding sangat sedikit sehingga dibutuhkan sebuah penelitian *bluff rectangular* menempel dengan dinding.



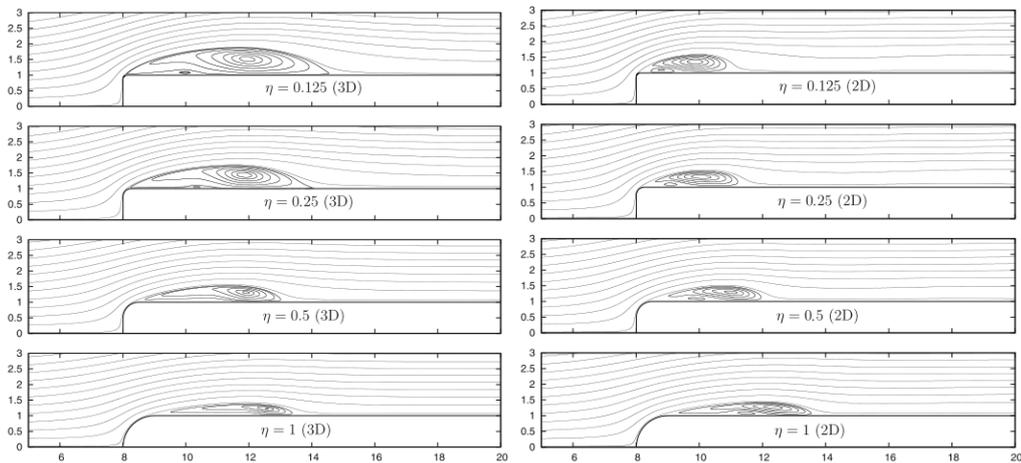
Gambar 2-42 Visualization CFD Bubble Separation Unsteady [44].

Velayati dan Yaghoubi [46] melanjutkan penelitian tentang karakteristik aliran yang melintasi *bluff rectangular body* paralel. Hasil penelitiannya menunjukkan indikasi penurunan intensitas terjadi *bubble separation* khususnya didekat dinding (*endwall*) dan daerah *tip*. Peristiwa ini disebabkan adanya interaksi separasi aliran 3D dengan *bubble separation*, sehingga panjang *reattachment line* semakin pendek dan intensitas turbulensi semakin kecil. Fenomena ini di ilustrasikan pada gambar 2-43.



Gambar 2-43 Karakteristik aliran pada *Bluff Rectangular Body 3D*. [46].

Selain itu pengaruh dari bentuk keruncingan BRT yang dilakukan oleh Lamballais et al [47] dengan menggunakan *direct numeric method* untuk mengeksplorasi bentuk kurva aliran yang melintasinya. Pada gambar 2-44 dipaparkan bahwa  $\eta = r/d$  merupakan perbandingan *radius fillet* dengan ketebalan BRT. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tumpul BRT menghasilkan intensitas *bubble separation* yang lebih kecil dan jarak terjadi lebih tertunda. Sedangkan perbedaan antara simulasi numerik 3D dan 2D memperlihatkan perbedaan ketajam BRT yang kecil tidak memperlihatkan perbedaan yang signifikan yaitu  $\eta = 0.125$  dan  $\eta = 0.25$  khusus 2D sedangkan terlihat seperti prediksi sebelumnya.

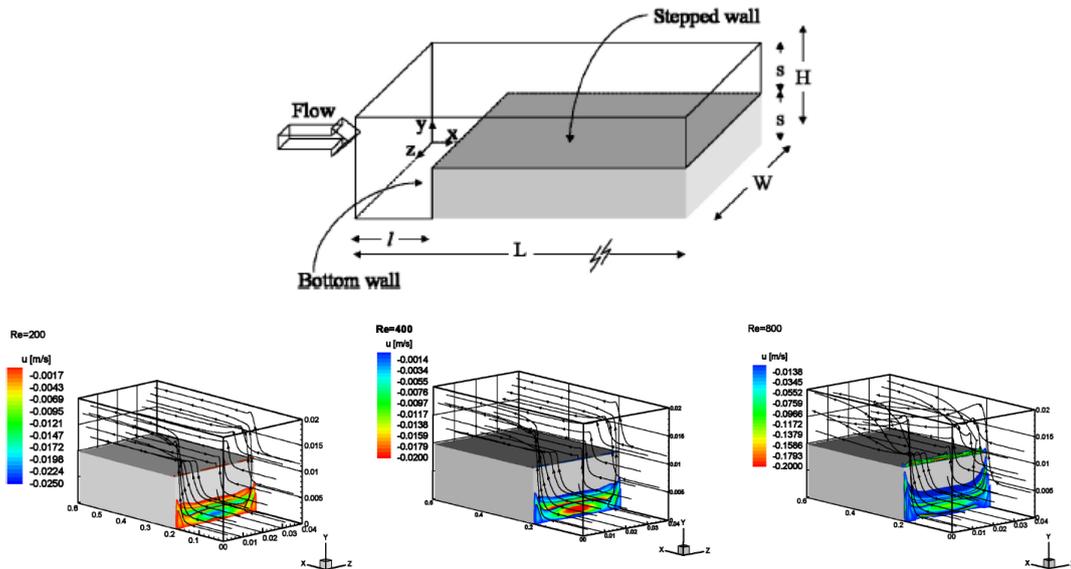


Gambar 2-44 Bentuk *streamline* aliran akibat ketajam FFST 2D dan 3D [47].

### 2.5.5 Turbulator Forward Facing Step.

Penamaan tentang turbulator yang disebut *bluff rectangular turbulator*(BRT) mendekati sama tentang istilah *obstacle rectangular*, sehingga diperlukan pencarian referensi yang lebih mendekati sama. Sebab BRT biasanya berupa bodi yang jauh dari bidang tumpu dinding(*endwall*). Saldana et al [48] melakukan penelitian yang sama tentang BRT yang dekat dengan dinding. Penamaan yang diberikan pada BRT dekat dinding disebut sebagai *forward facing step* (FFS) turbulator. Agar tidak mengalami arti yang ambigu maka penelitian ini

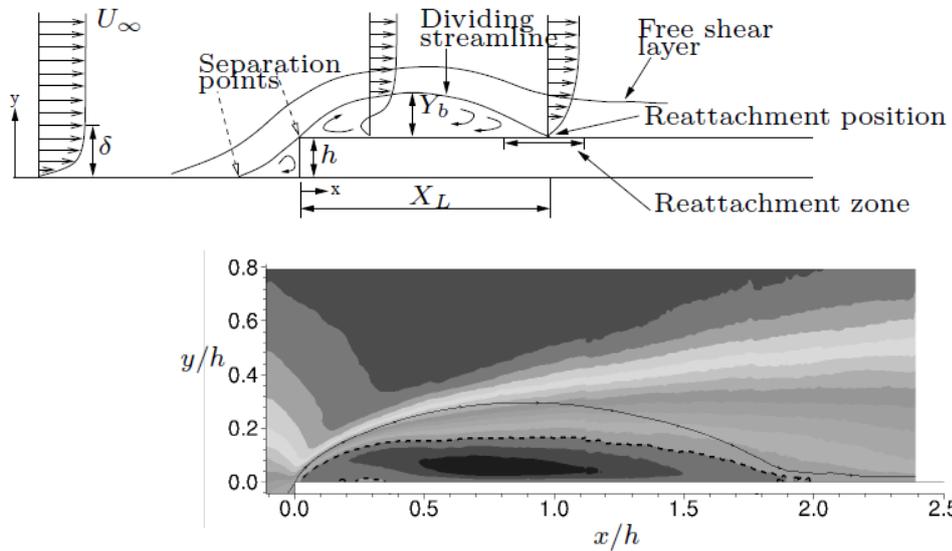
menggunakan istilah *forward facing step tabulator* (FFST). Fenomena aliran pada FFST sedikit berbeda yang terjadi pada BRT, perbedaannya pada FFST terjadinya *reattachment* aliran pada dua daerah sedang pada BRT hanya terjadi satu daerah saja. Pada gambar 2-45 dipaparkan *streamline* aliran yang melintasi FFST.



Gambar 2-45 *Streamline* aliran melintasi FFST. Saldana et al [48]

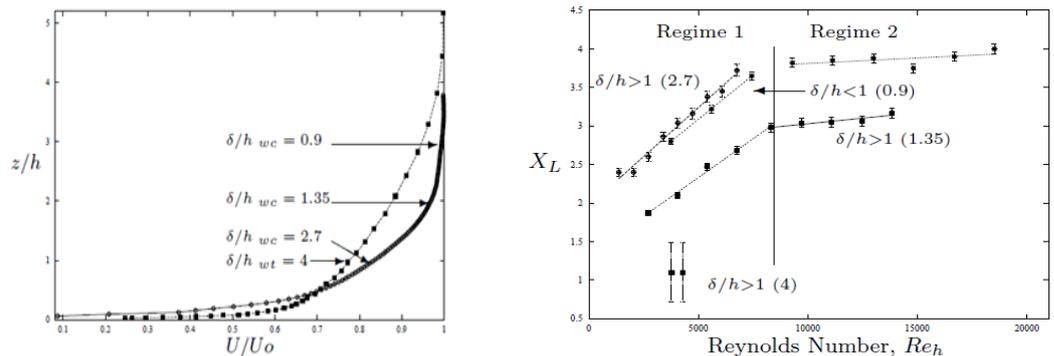
*Reattachment* aliran yang menuju daerah *junction* antara dinding dan *stepper* merupakan perbedaan dibandingkan dengan karakteristik aliran di BRT. Sedangkan untuk *reattachment flow* pada daerah setelah *stepper* memiliki karakteristik yang sama pada aliran BRT. Ukuran *reattachment flow* tersebut yang dikenal dengan *bubble separation flow* sangat tergantung dari bilangan Reynolds aliran, semakin besar bilangan Reynoldsnya semakin besar pula terjadi aliran 3D.

Selain itu Serry et al [27] melakukan hal yang sama, pada penelitiannya menyebutkan sebagai *forward facing step*. Pada gambar 2-46 dipaparkan topologi aliran yang melintasi FFST. Penelitian ini membandingkan terjadi *bubble separasi* dengan bilangan *Reynolds* yang berbeda dan fluida yang berbeda antara air dan udara. Pengamatan dilakukan pada *Water channel* (WC) dan *Wind tunnel* (WT).



Gambar 2-46 Topologi aliran berdasarkan simulasi numerik. Serry et al [27]

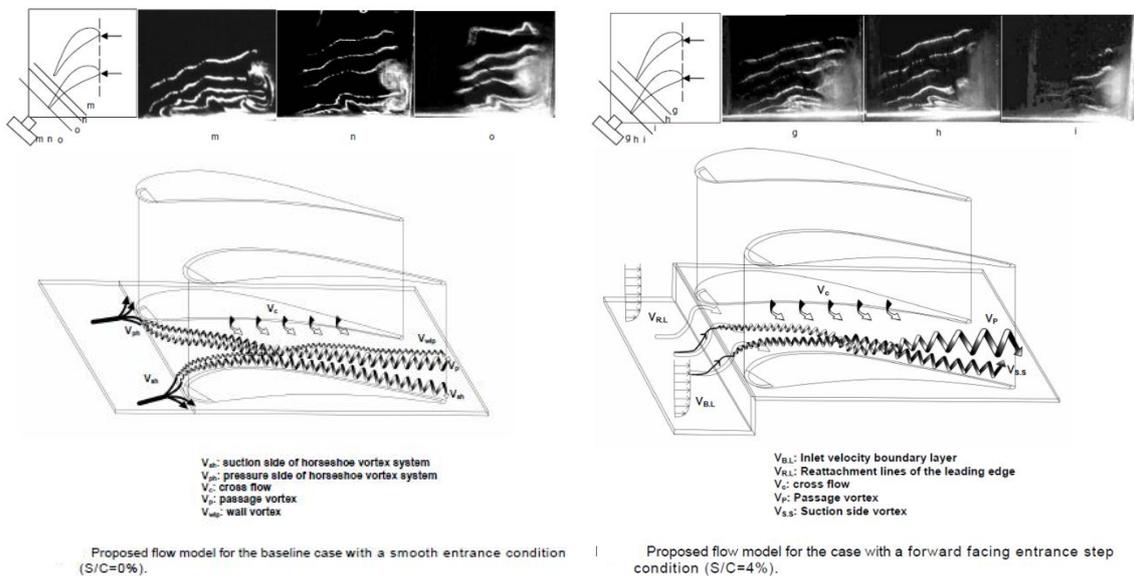
Hasil penelitian ini, menyatakan bahwa dampak penggunaan FFST terhadap profil kecepatan aliran di *upstream* dipaparkan pada gambar 2-47. Pada penelitian menyatakan terbentuk *bubble separation* dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok 1 dinyatakan sebagai peningkatan *bubble separation size* yang sangat kuat berada dibawah bilangan *Reynolds* 8000, sedangkan diatasnya dinyatakan sebagai dua kelompok yang peningkatan ukuran *bubble separation* lebih lemah.



Upstream boundary layer profiles for the two experimental facilities, o-water channel(wc), ■-wind tunnel(wt)

Gambar 2-47 Profil kecepatan di daerah *upstream* dan pengelompokan peningkatan *bubble separation size* [27].

Reduksi aliran 3D melalui FFST pernah dilakukan oleh Wu dan Zhong [49] yang diletak tepat pada *leading edge* pada susunan kaskade turbin. Efeknya terjadi *wall vortex* yang terjadi pada plat datar dapat tampak pada daerah *suction side*. Selain itu berdasarkan hasil foto laser yang diletak pada daerah *downstream* terlihat bahwa gumpalan *vortex* tampak sangat jelas pada permukaan plat datar, sedangkan pada FFST kumpulan tersebut terpecah menjadi beberapa bagian. Pada gambar 2-48 dipaparkan topologi dan foto laser hasil eksperimen susunan kaskade turbin.



Gambar 2-48 Topologi terjadi aliran 3D. Wu dan Zhong [49]

## 2.6 Parameter Fluida yang digunakan proses simulasi.

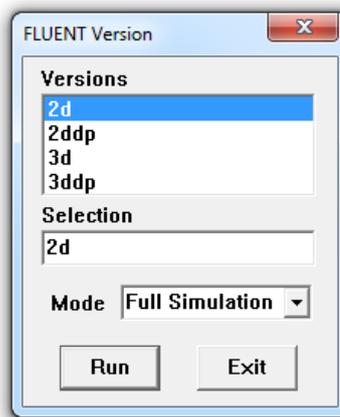
Simulasi ini dilakukan penggunaan parameter sebagai berikut :

### 2.6.1 Solver

Pada proses simulasi penggunaan fluent selalu memberikan informasi tentang jendela pembuka seperti gambar 2-49. Saat pembukaan fluent terhadap pilihan untuk menggunakan solver 2D/3D dengan ketelitian tunggal atau ketelitian ganda (*single precision/double precision(dp)*). Secara umum *solver single precision* cukup akurat untuk digunakan pada berbagai kasus, tetapi untuk beberapa kasus tertentu lebih baik menggunakan *solver double precision* seperti:

- Jika geometri pada kasus tersebut mempunyai ukuran sangat panjang (misalnya pipa tipis yang sangat panjang), perhitungan dengan menggunakan *solver single precision* mungkin tidak cukup, sehingga harus menggunakan *double precision*.
- Jika geometri pada kasus melibatkan beberapa obyek yang dihubungkan melalui pipa dengan diameter kecil (misalnya *intake manifold* pada kendaraan bermotor), sebaiknya menggunakan *double precision*.
- Kasus perpindahan panas yang melibatkan perbedaan konduktivitas termal yang tinggi, penggunaan *single precision* dapat mengganggu konvergensi dan akurasi hasil simulasi.

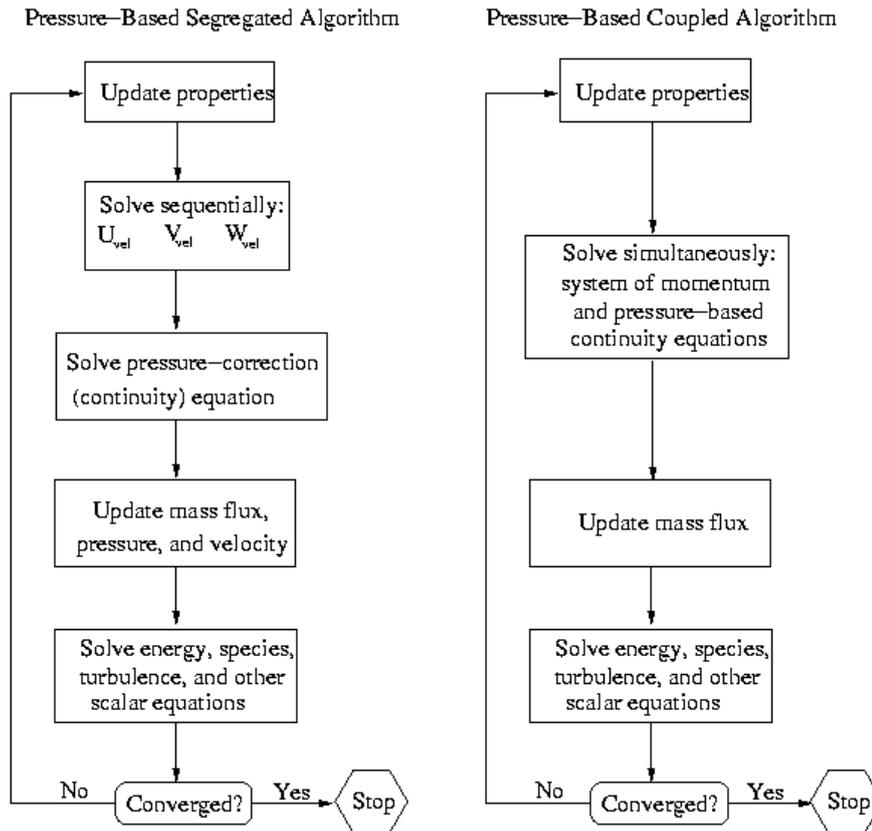
Oleh karena itu penelitian ini menggunakan *solver double precision*.



Gambar 2-49 Jendela pembuka fluent. [50]

Tahap selanjutnya pemilihan *pressure based* atau *density based*. Sejarahnya *pressure based solver* digunakan untuk pengembangan laju rendah pada *incompressible flow*, sedangkan *density based solver* digunakan pada laju yang tinggi pada aliran *compressible flow*. *Pressure based solver* menggunakan algoritma umum biasanya disebut sebagai metode proyeksi. Pada proses tersebut batasan persamaan kekekalan massa dari medan kecepatan dengan menyelesaikan persamaan tekanan atau sebagai koreksi nilai tekanan. Persamaan tekanan berasal dari kontinuitas dan persamaan momentum demikian rupa medan aliran, dikoreksi oleh tekanan dan memenuhi kontinuitas. Karena persamaan yang mengatur adalah nonlinier dan digabungkan (*couple*) satu dengan yang lain,

proses solusi melibatkan iterasi dimana seluruh masukan *governing equations* diselesaikan berulang kali sampai penyelesaian konverge. Model ini dibagi lagi menjadi dua yaitu *segregated* dan *coupled algorithm*, seperti pada gambar 2-50.



Gambar 2-50 Skema *Pressure Base Solution*. [50]

*Pressure based segregated* model menggunakan inisial awal dari momentum ( $U, V, W$ ) kemudian digunakan untuk menyelesaikan persamaan tekanan dan dikoreksi terhadap koninuitasnya. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk memperbarui nilai dari fluk massa, tekanan dan kecepatan dalam proses simulasi. Kemudian hasil tiga komponen tersebut digunakan sebagai penyelesaian energi, turbulen dan lainnya, semua hasil ini disirkulasikan pada data *properties*.

Sedangkan *pressure based coupled* penyelesaian kekekalan momentum dan tekanan kemudian dikoreksi oleh kontinuitas. Hasil tersebut digunakan untuk perbaruan nilai fluk massa, kemudian dilanjutkan dengan perbaruan nilai energi,

spesies, model turbulen dll. Semua hasil tersebut disirkulasikan pada data *properties*. Pada penelitian ini digunakan model *Pressure Based Segregated*, sebab aliran yang digunakan berada pada kondisi *incompressible flow* nilai *Ma* kurang dari 0.3. Selain itu perhitungan simulasi dimulai dari inisial aliran masuk yang dikondisikan dengan kondisi batas *Velocity Inlet*. Informasi awal proses iterasi dimulai dari kecepatan inlet sehingga model *pressure based segregated* lebih tepat.

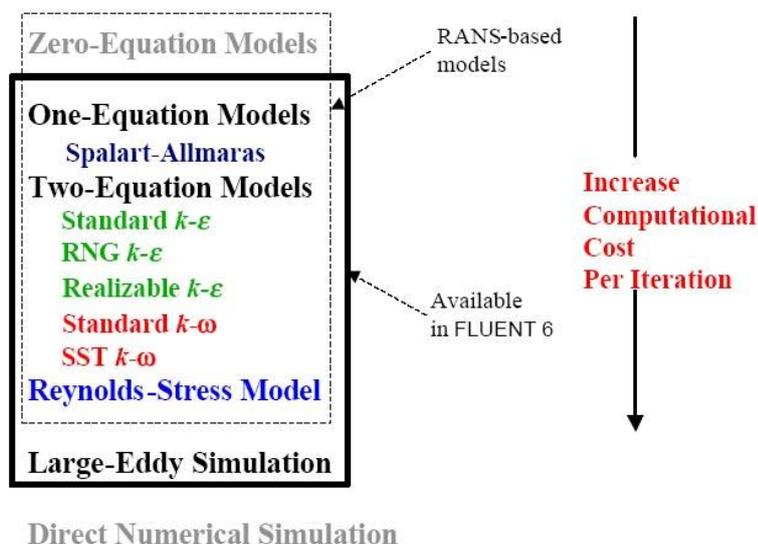
### 2.6.2 Turbulent model

Aliran turbulen dikenali dengan adanya medan kecepatan yang berfluktuasi. Fluktuasi kecepatan tersebut membawa berbagai besaran seperti momentum, energi, konsentrasi partikel, sehingga besaran tersebut juga ikut berfluktuasi. Fluktuasi tersebut dapat terjadi pada skala kecil dan mempunyai frekuensi yang tinggi, sehingga terlalu rumit dan berat untuk dihitung secara langsung pada perhitungan enjiniring praktis meskipun telah menggunakan komputer yang canggih. Oleh karena itu persamaan yang berhubungan dapat dirata-ratakan (*time-averaged, ensemble-averaged*) atau dimanipulasi untuk menghilangkan fluktuasi skala kecil. Dengan demikian persamaan-persamaan tersebut dapat lebih mudah untuk dipecahkan. Bagaimanapun juga, pada persamaan yang telah dimodifikasi tersebut terdapat tambahan variabel yang tidak diketahui, dan dibutuhkan model turbulensi untuk menentukan variabel-variabel tersebut.

Secara garis besar, model turbulen dapat didekati dengan menggunakan 2 pendekatan, yaitu :

- Berdasarkan Reynolds Averaged-Navier Stokes (RANS)
- Berdasarkan Large Eddy Simulation (LES)

Kedua pendekatan tersebut sama-sama memerlukan model dengan besaran yang dirata-ratakan (*time-average, ensemble-average*). Hal ini dipaparkan pada gambar 2-51



Gambar 2-51 Model Turbulensi pada FLUENT,[50]

Sampai saat ini, belum ada sebuah model turbulensi yang dapat digunakan untuk memecahkan semua kasus aliran turbulen dengan baik. Pemilihan model turbulensi tergantung dari beberapa pertimbangan, antara lain fisik aliran, tingkat akurasi yang diinginkan, sumber daya komputasi yang tersedia, waktu yang tersedia untuk simulasi.

Model turbulensi Reynolds-Stress Model (RSM) digunakan pada kasus 2D saja, sebab untuk kasus 3D membutuhkan *computer resources* yang besar. Hal ini tidak memungkinkan digunakan untuk penelitian ini. Keunggulan dari model RSM memiliki analisa terhadap fluktuasi kecepatan secara 3D, sedangkan pada model RANS fluktuasi kecepatan tersebut dijadikan satu menjadi *Turbulent Kinetic Energy*. Untuk penelitian yang membutuhkan eksplorasi yang sangat detail tentang TKE disarankan menggunakan RSM, namun secara keseluruhan hasil simulasi RSM memiliki prediksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan eksperimen. Oleh karena itu penelitian ini menggunakan dua model viscous yang berbeda yaitu pada analisa 2D menggunakan RSM dengan untuk 3D menggunakan Standard K-Epsilon. Pada model 3D penggunaan Mesh yang semua merupakan jenis Map, disesuaikan dengan penelitian Djilali dan Grassshore [22,23] pada kondisi *steady state*.

### 2.6.2.1 Model K-Epsilon

Model K-Epsilon dibagi menjadi 3 bagian yaitu Standard K-Epsilon, RNG K-Epsilon dan Realizable K-Epsilon. Ketiga model tersebut memiliki bentuk yang sama, dengan persamaan transport untuk nilai  $k$  dan  $\epsilon$ . Perbedaan mayornya pada model tersebut terjadi pada metode perhitungan *turbulent viscosity*, bilangan turbulent Prandtl membentuk turbulent difusi yaitu  $k$  dan  $\epsilon$  dan generalisasi dan destruksi pada persamaan  $\epsilon$ . Persaman transport dijadikan metode perhitungan turbulent viscosity dan model konstn diprestensikan terpisah dari masing-masing model. Fitur tersebut dijadikan bentuk dasar pada semua model termasuk pembentuk turbulent, generalisasi terjadi daya apung, perhitungan efek kompersibilitas dan model perpindahan panas.

**Standard K-Epsilon (SKE)** merupakan persamaan sangat ringkas dan lengkap pada dua persamaan turbulen tersebut dimana solusi persamaan dua separate transport melalui turbulensi kecepatan dan skala panjang dapat ditentukan secara independen. Jenis model ini termasuk model yang sering dipakai untuk perhitungan aliran dalam dunia praktisi sejak diusulkan oleh Launder dan Spalding. Faktor ketahanan, ekonomi dan kewajaran akurasinya untuk diaplikasikan pada aliran turbulen sangat luas. Persamaan ini sangat populer pada simulasi aliran dan perpindahan panas di industri. Selain itu persamaan ini merupakan model semi empirik dan deviasi dari persamaan tergantung dari pertimbangan fenomenologis dan eksperimen. Kekuatan dan kelemahan dari model ini menjadi diketahui, kemudian perbaikannya telah dibuat pada model meningkatkan kinerja. Dua varian didalam fluent yaitu RNG K-Epsilon Realization.

Persamaan ini yang telah digunakan dipaparkan pada persamaan 2-5 dan 2-6

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \dots \dots \dots (2-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \dots \dots \dots (2-6)$$

Dimana,  $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  dan  $G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$  merupakan generalisasi turbulent kinetic energy dan gradient rata-rata kecepatan dan gaya apung (*buoyancy*).  $Y_M = 2\rho\epsilon \sqrt{\frac{k}{\gamma RT}}$  mempresentasikan kontribusi fluktuasi dilatation pada turbulen kompresible dan laju disipasi keseluruhan.  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.92$  dan  $C_{3\epsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$  merupakan konstanta. Sedangkan  $\sigma_k = 1.0$  dan  $\sigma_\epsilon = 1.3$  merupakan turbulent Prandtl number, selain itu ada penambahan sumber UDF pada parameter  $S_k$  dan  $S_\epsilon$ .

#### 2.6.2.2 RNG K Epsilon

**RNG K Epsilon** merupakan model menggunakan rigorous statistic technique (disebut sebagai teori group renormalisasi). Model ini seperti serupa dengan model SKE, tetapi mencangkup perbaikan :

- Model RNG memiliki parameter tambahan dalam persamaan epsilon. Hal ini secara signifikan meningkatkan akurasi simulasi untuk aliran terhalang secara tiba-tiba.
- Pengaruh swirl pada turbulent termasuk dalam model RNG, peningkatan akurasi pada aliran swirl (berputar).
- Teori RNG menyediakan analisa formulasi pada turbulent Prandtl number , dengan SKE menggunakan UDF parameter.
- Sementara SKE digunakan pada model Reynolds tinggi, pada teori RNG memberikan formulasi differensial analistis untuk efek viscous. Hal ini digunakan untuk menghitung dampak dari Reynolds number yang rendah, sehingga efektifitas fitur ini dapat digunakan untuk daerah dekat dinding.

Fitur-fitur ini membuat RNG K-Epsilon lebih akurat dan dapat diandalkan untuk variasi aliran yang luas dibandingkan dengan SKE. Persamaan RNG-K-Epsilon dipaparkan pada persamaan 2-7 dan 2-8.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \dots \dots \dots (2-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \dots \dots \dots (2-8)$$

Dimana RNG K-Epsilon menggunakan persamaan differensial untuk kekentalan turbulen seperti persamaan 2-9 untuk  $\hat{\nu} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$  dan  $C_v \approx 100$ . Persamaan ini terintegrasi akurasi diskripsi tentang efektivitas variasi turbulen transport dengan efek dari Reynolds number (atau *eddies scale*), dapat menangani aliran dengan nilai Reynolds rendah dan aliran dekat dengan dinding (permukaan gesekan).

$$\partial \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_v}} \dots \dots \dots (2-9)$$

Pada aliran dengan batas nilai Reynolds yang tinggi, digunakan persamaan 2-10 dimana nilai dari  $C_\mu = 0.0845$  pada teori RNG. Sangat menarik untuk dicatat bahwa nilai ini sangat dekat dengan nilai empiris ditentukan dari 0,09 digunakan dalam SKE.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots \dots \dots (2-10)$$

Turbulensi, secara umum, dipengaruhi oleh rotasi atau pusaran dalam aliran rata-rata. Model RNG di FLUENT menyediakan pilihan untuk memperhitungkan efek swirl atau rotasi dengan memodifikasi viskositas turbulen yang tepat. Modifikasi mengambil bentuk fungsional berikut, diperlihatkan pada persamaan 2-11

$$\mu_t = \mu_{t0} f \left( \alpha_s, \Omega, \frac{k}{\epsilon} \right) \dots \dots \dots (2-11)$$

di mana  $\mu_{t0}$  adalah nilai viskositas turbulen dihitung tanpa modifikasi swirl baik menggunakan Persamaan 2-12 atau Persamaan 2-13.  $\Omega$  adalah nomor swirl karakteristik dievaluasi dalam FLUENT, dan  $\alpha_s$  adalah konstanta swirl yang mengasumsikan nilai yang berbeda tergantung pada apakah aliran tersebut swirl didominasi atau hanya sedikit berputar-putar. Modifikasi swirl ini selalu berlaku untuk axisymmetric, aliran swirl dan arus tiga-dimensi saat model RNG. Untuk arus putar lemah (default di FLUENT), diatur dengan nilai 0,07. Untuk arus putar kuat nilai yang digunakan harus lebih tinggi. Nilai dari Prandtl efektif terbalik,  $\alpha_k$  dan  $\alpha_\epsilon$ , yang dihitung dengan menggunakan rumus berikut berasal

analitis dengan teori RNG. Dimana  $\alpha_0 = 1.0$  sedangkan pada nilai bilangan Reynolds tinggi dibatasi dengan  $\left(\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \ll 1\right)$  maka nilai  $\alpha_k = \alpha_\epsilon \approx 1.393$

$$\left|\frac{\alpha-1.3929}{\alpha_0-1.3929}\right|^{0.6321} \left|\frac{\alpha-2.3929}{\alpha_0-2.3929}\right|^{0.6679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \dots\dots\dots(2-12)$$

Perbedaan dengan model SKE diperlihatkan pada persamaan 3.9

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \dots(2-13)$$

Dimana nilai dari  $C_{1\epsilon} = 1.42$  dan  $C_{2\epsilon} = 1.68$ .

$$C_{2\epsilon}^* \equiv C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

Model Realizable K- Epsilon merupakan pengembangan model yang relative baru dan berbeda dengan model SKE dalam dua hal yaitu :

- Pada model *realizable* K- Epsilon terdapat formulasi baru pada viskositas turbulen.
- Sebuah persamaan untuk laju disipasi epsilon telah diturunkan dari persamaan untuk perhitungan fluktuasi vortisitas rata-rata.

Istilah “*realizable*” mempunyai arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan Reynolds, konsistensi dengan bentuk memprediksikan laju penyebaran fluida dari pancaran jet/nozel. Model ini juga memberikan performa yang baik untuk aliran yang melibatkan pusaran, lapisan batas yang mempunyai gradient tekanan yang besar, separasi dan resirkulasi. Salah satu keterbatasan model *realizable* K-Epsilon adalah memproduksi viskositas turbulen non fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (*multi reference frame, sliding mesh*). Oleh karena itu penggunaan model ini pada kasus tersebut harus lebih berhati-hati.

Persamaan yang digunakan pada model Realizable K-Epsilon dipaparkan pada persamaan 2-14 dan 2-15, dimana nilai

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right], \eta = S \frac{k}{\epsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij}S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \dots \dots \dots (2-14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (2-15)$$

Parameter lain yang digunakan pada model ini antara lain:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.9, \sigma_k = 1.0 \text{ dan } \sigma_\epsilon = 1.2$$

### 2.6.2.3 Model K-Omega

Model Standard K Omega yang terdapat pada FLUENT merupakan model berdasarkan model Wilcox K-Omega. Model ini merupakan modifikasi dari perhitungan efek gesekan pada bilangan Reynolds yang rendah, kompresible dan penyebaran aliran gesekan (*shear flow*). Model ini dapat diaplikasikan pada aliran dalam saluran maupun aliran bebas gesekan (*free shear flow*). Pada model digunakan persamaan pada 2-16 dan 2-17, dimana k merupakan turbulent kinetic energy dan  $\omega$  merupakan laju disipasi spesifik.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \dots \dots \dots (2-16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \dots \dots \dots (2-17)$$

Parameter G, Y dan S seperti pada model SKE. Sedangkan untuk efek difusi  $\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\tau_k}$  dan  $\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\tau_\omega}$ . Selain itu viskositas turbulen  $\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$  merupakan hasil perkalian koefisien *damped* ( $\alpha^*$ ). Pada bilangan Reynolds kecil digunakan persamaan (3.14), namun untuk bilangan Reynolds tinggi nilai ( $\alpha^* = 1$ ).

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left( \frac{\alpha_0^* + R_{et}/R_k}{1 + R_{et}/R_k} \right)$$

Dimana  $R_{et} = \frac{\rho k}{\mu \omega}$ ,  $R_k = 6$ ,  $\alpha_0^* = 0.072/3$

**Model K-Omega SST** adalah model turbulensi yang digunakan dalam simulasi. Model **k- $\omega$  SST** ( Shear Stress Transport) dikembangkan oleh Menter untuk memadukan formulasi model **k- $\omega$**  standar yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model **k- $\epsilon$**  yang mempunyai kelebihan pada aliran *free-stream*. Untuk mencapai hal tersebut, model **k- $\epsilon$**  diubah dalam formulasi **k- $\omega$** . Model **k- $\omega$  SST** mirip dengan model standard **k- $\omega$** , tetapi dengan beberapa perbaikan, yaitu :

- Model **k- $\omega$**  standar dan model **k- $\epsilon$**  yang telah diubah dikalikan dengan suatu fungsi pencampuran dimana kedua model digunakan bersama-sama, sehingga lebih akurat untuk daerah di dekat dinding maupun aliran yang jauh dari dinding dan *free stream flow*.
- Definisi viskositas turbulen dimodifikasi untuk menghitung transport dari tegangan geser turbulen.
- Konstanta model berbeda dengan model **k- $\omega$**  standar.
- Melibatkan sebuah besaran dari penurunan *damped cross-diffusion* pada persamaan omega.

Persamaan yang digunakan Model K-Omega SST pada persamaan 2-18 dan 2-19. Persamaan ini memiliki perbedaan dengan Standard K-Omega pada nilai generalisasi TKE ( $\tilde{G}_k$ ) = min( $G_k, 10\rho\beta^*k\omega$ ) sedangkan nilai  $D_\omega$  (*cross diffusion term*).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \dots \dots \dots (2-18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \dots \dots \dots (2-19)$$

- Model Reynolds Stress Model (RSM).

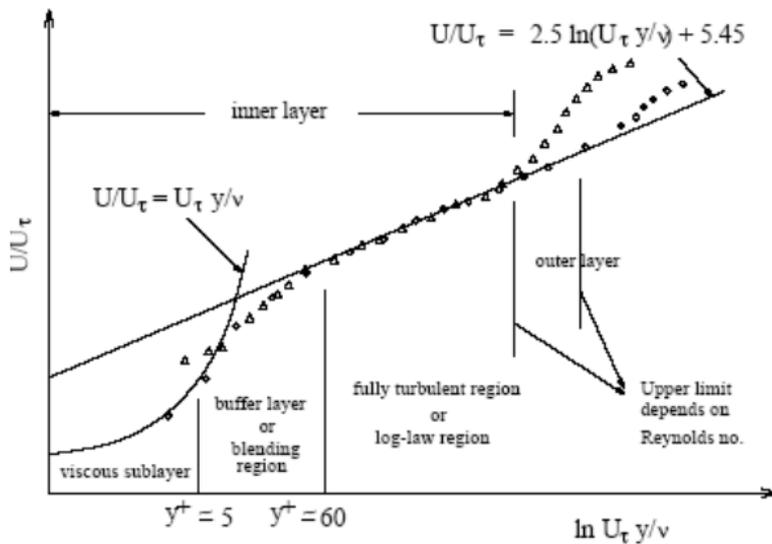
Model Reynolds Stress Model (RSM) merupakan model turbulensi yang paling teliti pada FLUENT. Model RSM mendekati persamaan Navier Stoke (Reynolds average) dengan menyelesaikan persamaan transport untuk tegangan reynolds bersama –sama dengan persamaan laju disipasi. Hal ini berarti dibutuhkan 4 persamaan transport tambahan pada aliran 2D dan 7 persamaan transport pada kasus aliran 3D, sehingga proses komputasi yang terjadi lebih panjang dan berat. Proses perhitungan model ini pada efek kurva streamline, pusaran (swirl), putaran dan perubahan tiba-tiba pada aliran lebih teliti daripada model dengan satu dan dua persamaan. RMS dapat memberikan prediksi yang lebih akurat untuk aliran yang kompleks. Bagaimanapun juga kebenaran dari prediksi RSM masih dibatasi asumsi yang diterapkan pada model. RSM tidak selalu memberikan hasil yang lebih dibandingkan dengan model yang lebih sederhana (1 atau 2 persamaan) pada semua jenis aliran dengan proses komputasi yang lebih berat. Tetapi RSM harus digunakan ketika aliran terdapat anisotropi dari tegangan Reynolds, seperti aliran dalam siklon, aliran yang berpusar dalam pembakaran, aliran melewati lintasan yang berputar, tegangan pada aliran yang disebabkan aliran sekunder dalam saluran. Persamaan RSM dipaparkan pada persamaan 2-20.

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \overline{\rho u'_i u'_j}}_{\text{local time derivative}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \rho u_k \overline{u'_i u'_j}}_{C_{ij} \text{ convection}} = \\
 & \underbrace{-\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right]}_{D_{T,ij} = \text{Turbulent Diffusion}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{D_{L,ij} = \text{Molekular Diffusion}} - \underbrace{\rho \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right)}_{P_{ij} = \text{Stress Production}} - \\
 & \underbrace{\rho \beta (\overline{g_i u_j \theta} + \overline{g_j u_i \theta})}_{G_{ij} = \text{Bouyancy Production}} + \underbrace{p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}_{\phi_{ij} = \text{Pressure strain}} - \underbrace{2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}_{\epsilon_{ij} = \text{Disipation}} \dots \dots \dots (2-20)
 \end{aligned}$$

Pada penelitian ini untuk mengeksplorasi terjadi *bubble separation* setelah melintasi FFST digunakan model viscous RSM, sedangkan untuk eksplorasi struktur aliran sekunder masih menggunakan Standard K Epsilon walaupun model RNG K-Epsilon lebih baik. Hal ini disebabkan bentuk mesh yang digunakan penelitian menggunakan model MAP, berdasarkan penelitian Djilali dan Gratsshore [26]

### 2.6.3 Wall Function

Permodelan yang akurat di dekat dinding merupakan hal yang penting untuk kebanyakan dari aplikasi teknik, karena perkiraan penurunan tekanan (*pressure drop*), separasi aliran, lapisan batas tergantung pada kebenaran prediksi gaya geser lokal pada dinding. Beberapa percobaan membuktikan bahwa daerah dekat dinding dapat dibagi menjadi 3 lapis. Lapisan pertama disebut dengan *viscous sublayer*, dimana aliran hampir seluruhnya laminar dan viskositas(molekul) memegang peranan penting pada perubahan momentum dan perpindahan panas atau massa. Lapisan paling luar disebut sebagai lapisan turbulen penuh (*fully-turbulent layer*), dimana turbulen memegang peranan penting. Sedangkan lapisan aliran di antara daerah tersebut sebagai *buffer layer* atau *blending region* dimana pengaruh viskositas molekul dan turbulensi sama-sama memegang peranan penting. Pada gambar 2-52 dipaparkan lapisan batas *boundary layer* pada koordinat semi-log.



Gambar 2-52 Lapisan batas boundary layer [50]

Model turbulen K-Epsilon dan RSM pada dasarnya cukup akurat untuk aliran turbulen pada daerah jauh dari dinding, tetapi tidak dapat memprediksi perilaku aliran di dekat dinding dengan akurat. Oleh karena itu model tersebut diperlukan suatu perlakuan tambahan agar model tersebut lebih akurat untuk

memprediksi aliran di dekat dinding, terutama pada aliran yang sangat berpengaruh oleh dinding (*wall-bonded flow*).

Pada FLUENT terdapat 3 macam *Near Wall Treatment*, yaitu :

- *Standard Wall Function*
- *Non-Equalibrium Wall Function.*
- *Enhanced wall treatment.*

*Wall Function* diperkenalkan oleh Launder dan Spalding [50] dimana pengguna *wall function* didalam sangat dipengaruhi oleh *wall shear stress*, sehingga jarak antara dinding dan *node* pertama (*cells*) sangat menentukan dalam proses pembuatan *mesh*. Untuk aliran laminar  $y_p$  dinyatakan dalam persamaan 2-21

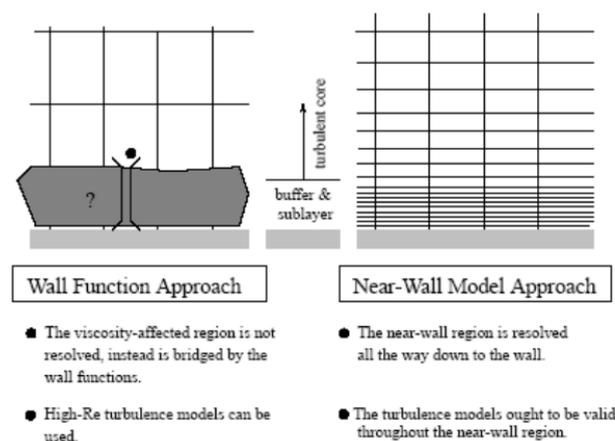
$$y_p \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}} \leq 1 \dots \dots \dots (2-21)$$

Aliran turbulen parameter dalam pembuatan mesh didasari bilangan tidak berdimensi yang dinyatakan dalam  $y^+$  dan  $y^*$ . Dimana untuk  $u^+ = y^+$ , dinyatakan dalam pendekatan regresi terhadap daerah *viscous sublayer* atau *laminar sublayer*, batas daerah tersebut  $y^+ < 5$ , sedangkan untuk daerah *buffer layer* atau *transition region* berada pada  $5 < y^+ < 60$ , untuk daerah *fully turbulent* berada  $y^+ > 60$ . Semua tersebut berada di *inner layer* yang dikenal dengan *viscous flow* sedangkan untuk *outer layer* berada daerah *inviscid* yang tergantung dari nilai *Reynolds number*.

Simulasi CFD dapat melibatkan efek dari *viscous sublayer* tanpa melakukan mesh yang sangat banyak didekat *wall*, metode tersebut disebut dengan metode *wall function* yang berada pada *model viscous turbulen k-epsilon* dan *RMS*, sedangkan untuk *K omega* tidak tersedia. Penggunaan *wall function* dapat menghemat mesh yang sangat banyak khususnya didekat dinding sebab daerah *viscous sublayer* sangat tipis. Oleh karena itu diperlukan pengkajian penggunaan *wall treatment* dan *wall function* terhadap karakteristik aliran melintasi FFST yang dilakukan secara analisa numerik.

Secara tradisional, ada dua pendekatan untuk pemodelan daerah dekat dinding. Dalam satu pendekatan, pengaruh viskositas pada *inner region (viscous sublayer dan buffer layer)* tidak terselesaikan. Sebaliknya, formulasi semi-

empiris disebut *wall function* digunakan untuk menjembatani wilayah viskositas antar dinding dengan *fully turbulent region*. Penggunaan *wall function* membutuhkan modifikasi model turbulensi untuk memperhitungkan keberadaan dinding. Dalam pendekatan lainnya model turbulensi yang dimodifikasi terhadap keberadaannya viskositas dipengaruhi oleh mesh di sekitar dinding. Untuk tujuan diskusi, ini disebut pendekatan "near-wall modeling". Kedua pendekatan digambarkan secara skematis dalam Gambar 2-53



Gambar 2-53 Perbandingan *wall function* dan *near wall model*. [56]

Penggunaan penelitian ini pada analisa 2D digunakan model *Enhanced Wall Treatment* dengan syarat  $y^+$  yang dihasil mendekati nilai dengan 1. Hal ini sangat penting untuk evaluasi nilai *Boundary layer analysis*. Sedangkan pada kasus 3D metode ini sulit digunakan sebab  $y^+$  yang dihasilkan 10, sehingga masing menggunakan *wall function*. Kasus 3D pada penelitian dihasilkan *mesh* dengan jumlah 3 Juta. Berdasarkan pengalaman yang terjadi proses ini membutuhkan minimal memory RAM sebesar 4 GHz dalam proses iterasi. Oleh karena itu penerapan tanpa penggunaan *wall function* sangat sulit dilakukan akibat keterbatasan alat komputasi.

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian ini diawali dengan penelusuran studi literatur mengenai fenomena separasi aliran aliran 2D maupun separasi aliran 3D. Kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan referensi tentang *boundary layer theory* yang mendasari filosofi terbentuk separasi aliran. Selain itu teori pendefinisian indentitas bentuk *skin friction* pada permukaan bidang tumpu sangat diperlukan untuk menunjang analisa penelitian ini. dan Horlock dan Lakshminarayana [1] menyatakan dampak terjadinya aliran separasi aliran 3D khususnya pada kompresor aksial berpotensi menyumbang kerugian hidrolis yang besar. Sehingga separasi aliran 3D menyebabkan terjadinya *blade stall* pada blade kompresor, dimana aliran separasi aliran 3D dan 2D merupakan sering disebut sebagai aliran sekunder.

Fokus penelitian ini dilakukan dengan cara menganalisa karakteristik struktur aliran 3D atau aliran sekunder di antara bidang tumpu (*endwall*) dan bodi kontur. Reduksi aliran 3D dilakukan melalui peningkatan turbulen dan momentum pada aliran primer (utama), upaya tersebut dilakukan dengan penambahan *Forward Facing Step Turbulent Generator* (FFST) pada bidang tumpu sebelum memasuki daerah interaksi. Penelitian ini membandingkan struktur aliran 3D yang terbentuk antara tanpa dan dengan penambahan FFST pada bidang tumpu. Analisa eksperimen dilakukan dengan teknik *oil visualization flow* pada lorong angin, kemudian hasil tersebut dipertegas dengan hasil simulasi numerik .

Selain itu diperlukan analisa *boundary layer* aliran setelah melintasi FFST, hal ini dilakukan dengan simulasi numerik 2D. Pengamatan difokuskan pada profil *boundary layer* setelah melintasi FFST dekat dengan bidang tumpu. Fenomena tersebut dianalisa dengan analisa profil kecepatan dan intensitas turbulensi di beberapa posisi setelah melintasi FFST. Kemudian dilanjutkan dengan kajian dampak variasi ketebalan ( $d$ ) dan posisi ( $L_e$ ) FFST, hal ini bertujuan untuk mendapatkan konfigurasi dimensi FFST yang paling optimal. Parameter evaluasi *boundary layer* yang digunakan berbentuk *shape factor*, seperti kajian yang digunakan oleh Fox dan McDonald's [40].

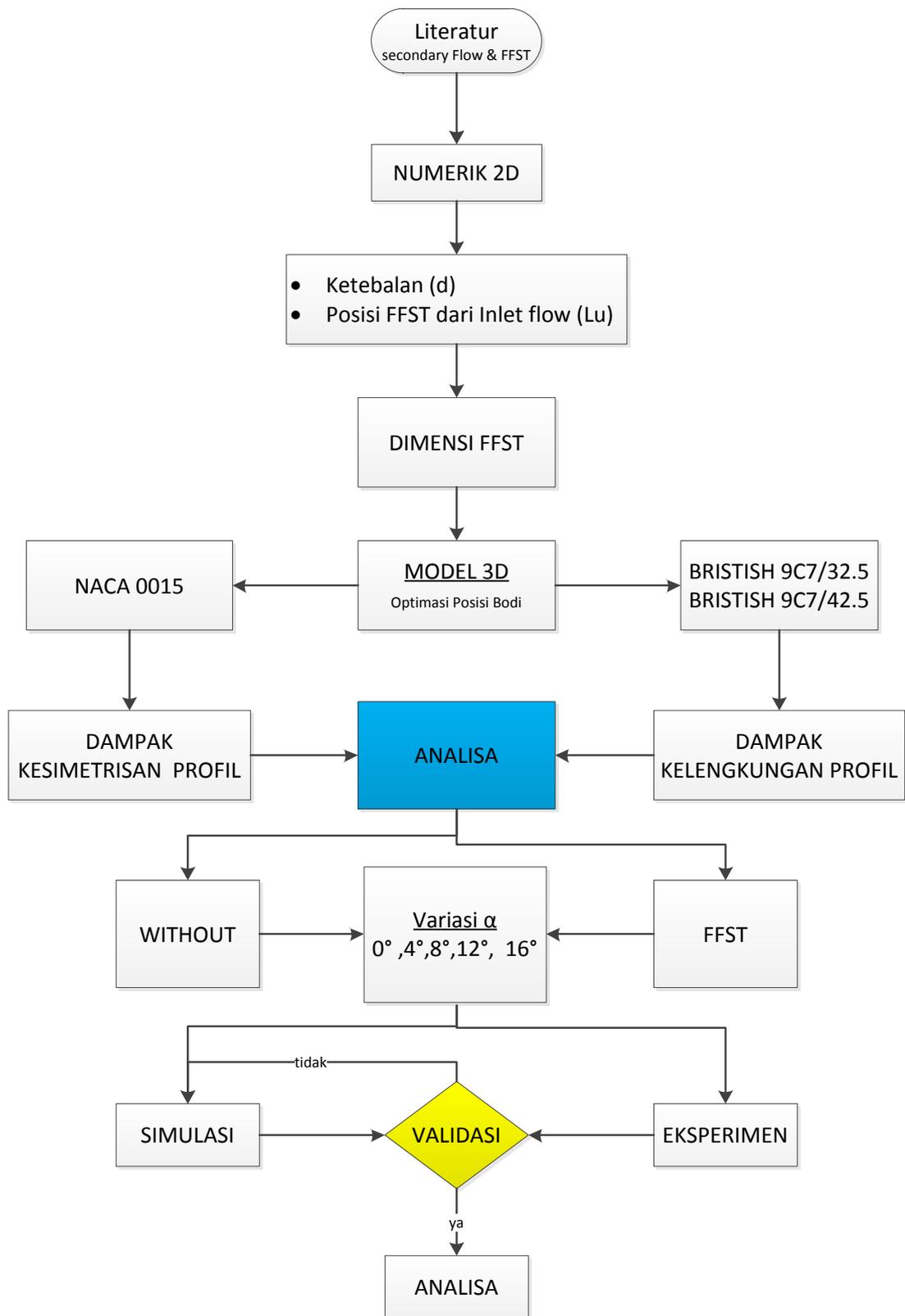
Analisa ini dilanjutkan dengan simulasi numerik 3D yang melibatkan bodi tunggal dan bidang tumpu tanpa dan dengan penambahan FFST. Sebelum itu diperlukan analisa terhadap optimasi posisi bodi terhadap FFST. Hasil posisi tersebut digunakan untuk membandingkan struktur aliran 3D dengan tanpa dan dengan penambahan FFST. Selain itu hasil tersebut dikomparasi dengan hasil eksperimen pada terowongan angin.

Dampak keasimetrisan bodi terhadap penambahan FFST digunakan bodi dengan variasi bentuk seperti bodi simetris (NACA 0015) dengan asimetris (BRITISH 9C7/32.5C50). Selain itu analisa pengaruh kelengkungan profil bodi (camber) dilakukan dengan membandingkan bodi profil dasar yang sama BRITISH 9C7 peningkatan kelengkungan  $42.5^\circ$  pada posisi 50% panjang *chord*. Selanjutnya analisa dilakukan terhadap efek variasi beban dengan *angle of attack* ( $\alpha$ ) dengan variasi antara  $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$  dan  $16^\circ$ . Semua kajian ini dilakukan dengan cara numerik kemudian dikomparasikan dengan hasil eksperimen. Bagan alur penelitian semua telah dipaparkan pada gambar 3-1.

### **3.1 Analisa *Boundary Layer* (Dimensi FFST).**

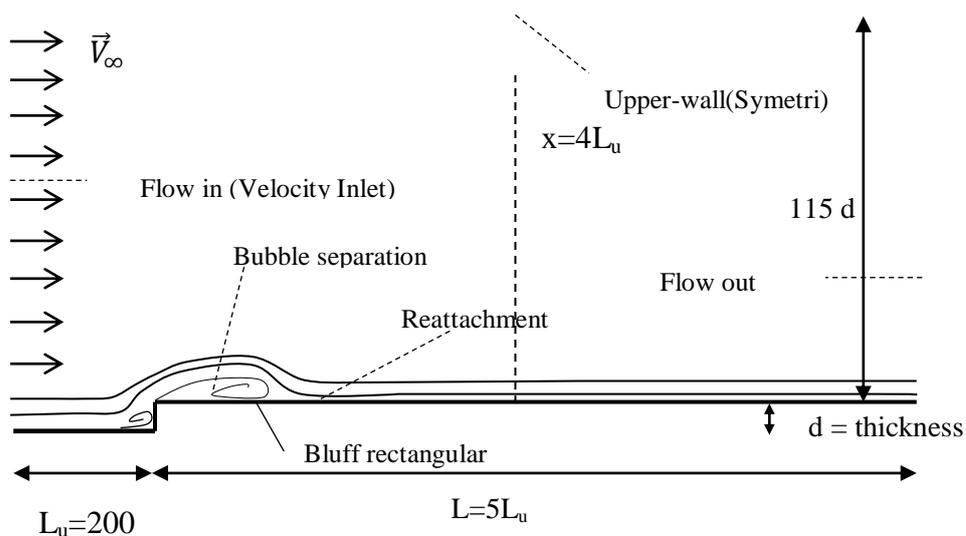
Pengamatan *boundary layer* dilakukan dengan menggunakan metode simulasi numerik saja kemudian dilakukan pembuktian terhadap karakteristik aliran melintasi FFST. Metode ini bertujuan mendapatkan dimensi dan posisi FFST yang paling optimal digunakan membentuk *boundary layer* yang semakin *fuller*. Dimana *boundary layer* tersebut memiliki komponen energi yang paling besar.

Analisa kemudian dilanjutkan dengan perhitungan nilai *disturbance thickness*, *displacement thickness* dan *momentum thickness*. Langkah tersebut telah disesuaikan dengan teori *boundary layer*. Hasil tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai *shape factor*, “Jika *shape factor* bernilai antara 1.3 sampai dengan 2.5 dinyatakan sebagai aliran turbulen sedangkan 2.6 sampai dengan 3.5 dinyatakan sebagai aliran laminar” menurut Fox dan Mcdonalds [40].



Gambar 3-1 Bagan alur penelitian

Analisa *boundary layer* dilanjutkan terhadap profil intensitas turbulensi yang terjadi pada posisi pengamatan profil kecepatan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui komposisi intensitas turbulensi aliran pada setiap posisi ketebalan *boundary layer*. Intensitas turbulensi merupakan melibat fluktuasi kecepatan  $u'$ ,  $v'$  dan  $w'$ , dimana  $Tu$  (intensitas turbulensi) =  $\sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}$ . Seiring dengan perkembangan teori tentang *boundary layer*, dimana peran intensitas turbulensi terhadap fenomena terjadinya separasi aliran sangat besar. Oleh karena itu beberapa peneliti melakukan kembali analisa fundamental tentang pengaruh profil intensitas turbulensi aliran terhadap terjadinya aliran sekunder. Pada gambar 3.2 diperlihatkan domain analisa *boundary layer* setelah melintasi FFST. Dimensi posisi FFST terhadap inlet ( $L_u$ ) ditentukan sama sebesar 200mm kemudian variasi dilakukan pada ketebalan FFST. Metode ini bertujuan mendapatkan hubungan parameter antara dimensi ketebalan FFST dan posisi FFST terhadap saluran masuk. Posisi pengamatan *boundary layer* dilakukan pada  $x=4L_u$  dalam bentuk profil kecepatan dan intensitas turbulensi. Posisi pengamatan harus berada pada kondisi aliran telah reattachment sempurna dimana tidak terjadi *backflow* atau *reverse flow*. Pada optimasi ketebalan FFST( $d$ ) ini dilakukan dengan cara variasi parameter non dimensional ( $d/L_u$ ) 0.025, 0.0375, 0.05, 0.075 dan 0.1.



Gambar 3-2 Domain analisa simulasi 2D.

### 3.2 Metode Eksperimen.

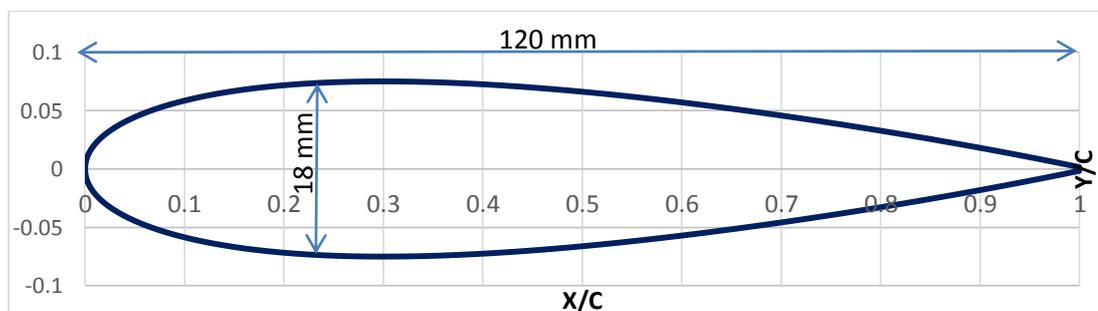
Metode ini dilakukan dengan cara pengujian pada terowong angin *subsonic flow* menggunakan bodi tunggal dengan bidang tumpu. Hasil eksperimen ini bertujuan untuk mendapatkan informasi lengkap tentang perbedaan karakteristik aliran sekunder dekat bidang tumpu antara tanpa dan dengan penambahan FFST. Selain itu eksperimen dilanjutkan dengan memvariasikan *angle of attack* dan bentuk kontur bodi tunggal. Kontur bodi tunggal divariasikan terhadap kelengkungan bodi dengan sedang dan kuat. Data yang dihasilkan dari metode eksperimen ini ditampilkan dalam bentuk distribusi *shear stress lines* pada bidang tumpu. Distribusi *shear stress lines* dipaparkan dengan jejak aliran minyak *oil flow visualization* (OFV). Data tersebut diperoleh melalui teknik visualisasi pada terowongan angin yang ada di Laboratorium Jurusan Teknik Mesin, FTI – ITS dan U.K. Petra.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada proses ini adalah :

1. Dimensi model uji dan instalasinya.
2. Peralatan ukur yang digunakan.
3. Kecepatan udara di dalam saluran uji.
4. Kondisi aliran dalam saluran uji.

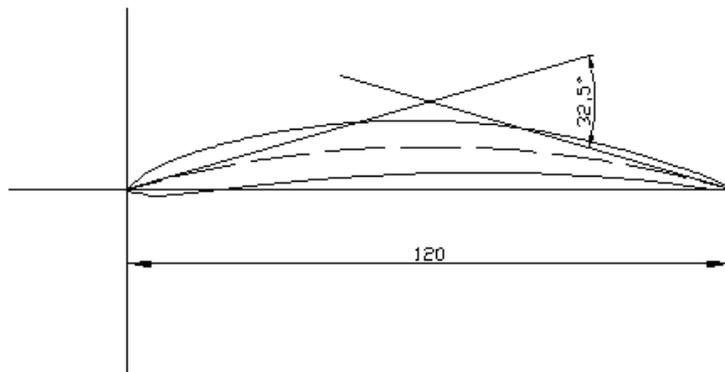
#### 3.2.1 Model Uji

Penelitian menggunakan model sayap dengan airfoil simetris NACA 0015, dimana memiliki airfoil tersebut memiliki ketebalan maksimum 15% dari panjang chord. Airfoil yang digunakan memiliki panjang chord 120mm dengan bentuk dasar profil NACA. Pada gambar 3-3 dipaparkan bentuk airfoil simetris NACA 0015.



Gambar 3-3 Profil Airfoil Simetris NACA0015

Sedangkan airfoil asimetris menggunakan bentuk dasar British C7 dengan tebal maksimum 9% dari panjang chord 120mm. Semua airfoil dengan variasi camber menggunakan C yang memiliki arti *Circular arc camber line* pada posisi 50% dari panjang chord. Penamaan airfoil British menjadi 9 C7 / XXC50, XX merupakan sudut camber. Sudut camber merupakan sudut yang terbentuk garis yang menyinggung garis camber dari *leading edge* dan *trailing edge*, seperti yang dipaparkan pada gambar 3-4.

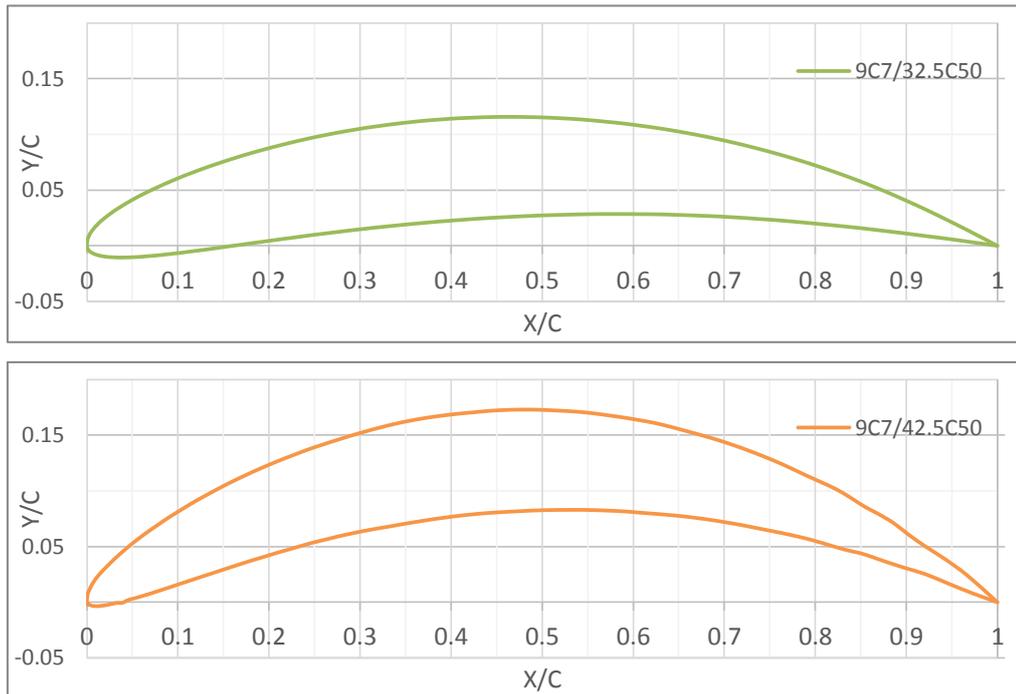


Gambar 3-4 Sudut camber pada airfoil asimetris

Variasi kelengkungan pada bodi diaplikasikan pada konfigurasi *blade* kompresor aksial. Dimana kontur bodi *blade* pada posisi *hub* memiliki *angle of attack* lemah dan *camber* kuat, sedangkan pada daerah casing memiliki *angle of attack* kuat dan *camber* lemah. Parameter ini dipaparkan pada tabel 3-1. Selain perbedaan variasi *camber* atau kelengkungan dipaparkan pada gambar 3-5.

Tabel 3-1 Variasi camber pada airfoil asimetris

Posisi/Camber	Midspan/Sedang	Hub/ Kuat
Sudut Camber	32.5	42.5
Jenis Airfoil	9C7/32.5C50	9C7/42.5C50



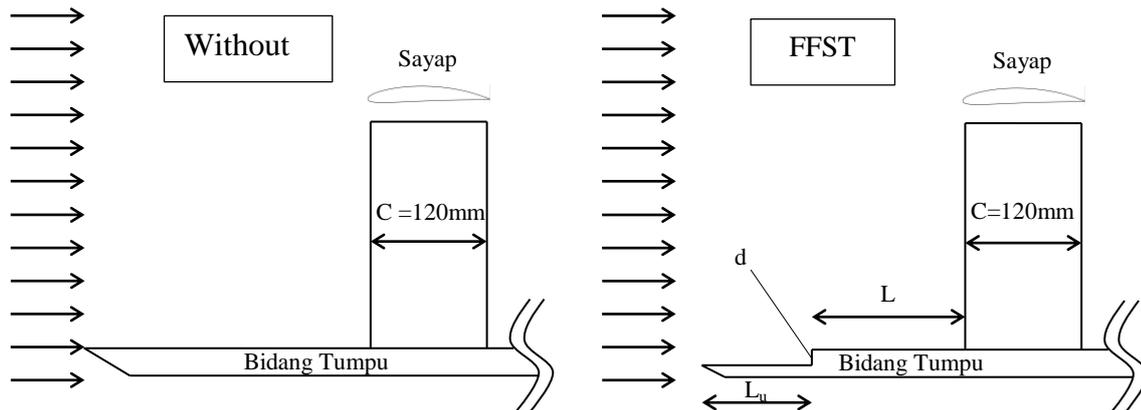
Gambar 3-5 Sudut *camber* pada airfoil asimetris 32.5 dan 42.5.

Proses pembuatan sayap dengan berbagai bentuk airfoil NACA 0015 digunakan pipa PVC kemudian dibentuk sesuai bentuk airfoil. Kemudian pada sayap dengan airfoil Brisith 9C7/32.5C50 digunakan proses mesin scrap dengan menggunakan bahan kayu, proses pembuatan dibutuhkan waktu 3 bulan. Model tersebut diperlihatkan pada gambar 3-6.



Gambar 3-6 Foto sayap dengan airfoil NACA0015 dan Brisith 9C7

Selain itu eksperimen ini membandingkan struktur aliran sekunder disekitar bidang tumpu, sehingga dilakukan dua eksperimen dengan dan tanpa FFST pada bidang tumpu. Bidang tumpu tanpa FFST menggunakan plat datar dengan jarak penjumlahan  $L$  dan  $L_u$ , sedangkan untuk bidang tumpu dengan FFST diletak pada jarak  $L_u$  dari aliran masuk dan pada jarak bidang dari sayap, semua ini dipaparkan pada gambar 3-7.



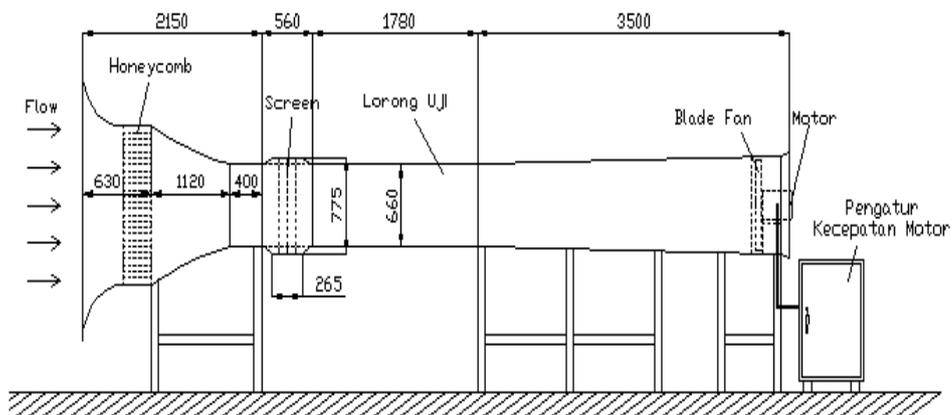
Gambar 3-7 Peletakan dan dimensi FFST pada bidang tumpu.

### Peralatan Eksperimen

Peralatan-peralatan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah :

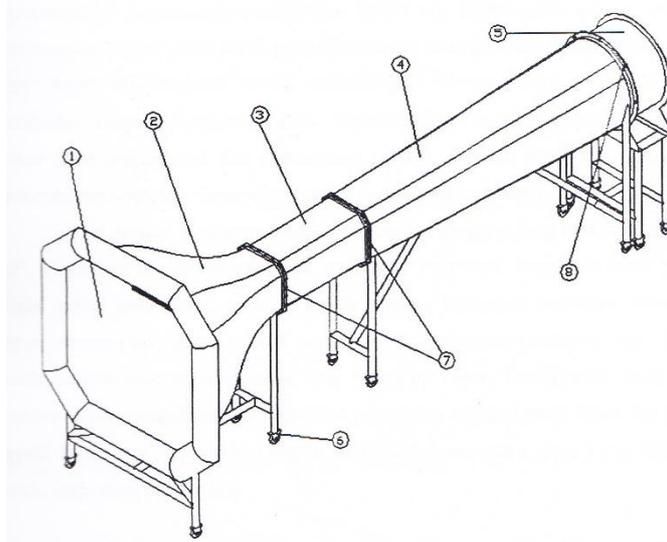
#### 1. Terowongan Angin

Terowongan Angin dilaboratorium Petra merupakan tempat pengujian benda uji dengan *test section* berbentuk balok dengan panjang 1780 mm, tinggi 660 mm, dan lebar 660 mm. Pada gambar 3-8 diperlihatkan skema terowongan angin yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3-8 Dimensi terowongan angin di Laboratorium Fluida ITS.

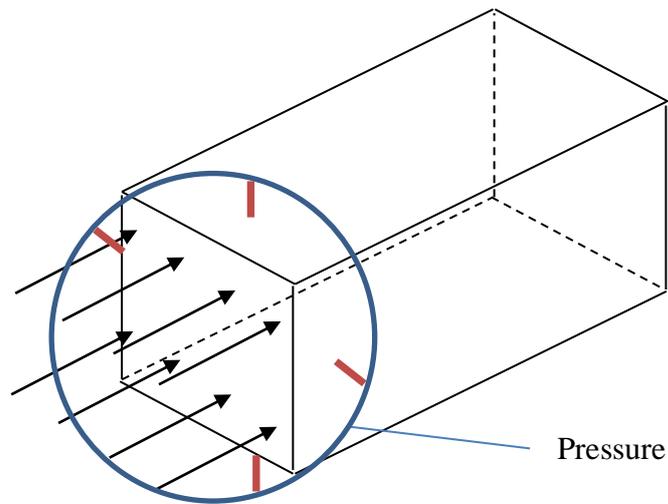
Spesifik terowongan angin dari penelitian ini digunakan terowongan angin di laboratorium sistem termal dan fluid U.K Petra, seperti diperlihatkan pada gambar 3-9. Terowongan angin ini memiliki ukuran *test section* seluas 500x500mm. Namun hasil uji terowongan tersebut memiliki daerah *inviscid* seluas 300x300mm. Pengerak terowongan angin digunakan motor dengan daya 5kWatt dan putaran 1500 RPM. Selain itu perangkat lain pada terowongan angin merupakan perangkat inverter arus AC dengan menggunakan merk Toshiba dengan daya 5.5kWatt.



Gambar 3-9 Terowongan angin di Laboratorium Sistem Termal dan Fluid UK.Petra

## 2. *Static Pressure*

*Static pressure* digunakan pada lorong angin merupakan perangkat pengukuran terhadap kecepatan *free stream* di dalam *test section* terowongan angin. Tekanan statis diletakkan pada setiap permukaan *test section* kemudian dihubungkan dengan manometer. Hubungan antara *static pressure* bertujuan untuk mendapatkan nilai rata-rata tekanan statis pada posisi aksial yang sama. Skema tersebut seperti gambar 3-10.

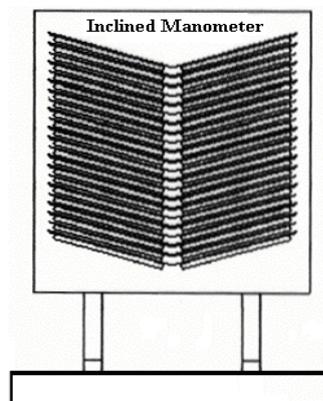


Gambar 3-10 Posisi penempatan *pressure static*.

### 3. Manometer

Manometer berfungsi menyatakan besar tekanan yang terukur oleh *pitot static tube*. Manometer yang digunakan dengan fluida kerja *red oil* ( $SG_{\text{red oil}} = 0.804$ ).

Pembacaan data yang terukur dari *static pressure* anjang kontur dikonversikan dalam bentuk ketinggian kolom fluida pada *inclined manometer*, alat tersebut dipaparkan pada gambar 3-11. Alat ini terdiri dari pipa kaca kapiler dengan diameter dalam 1 mm yang di dalamnya terdapat cairan fluida kerosene. Posisi pipa kapiler dimiringkan sebesar  $15^\circ$  terhadap horizontal, bertujuan untuk mempermudah pembacaan dan diperoleh kecermatan yang lebih tinggi.



Gambar 3-11 *Inclined Manometer*

#### 4. *Thermometer*

Termometer digunakan untuk mengukur temperatur fluida kerja.

#### 5. *Digital Camera*

*Digital Camera* digunakan untuk memotret *visualisasi* aliran pada permukaan dinding uji.

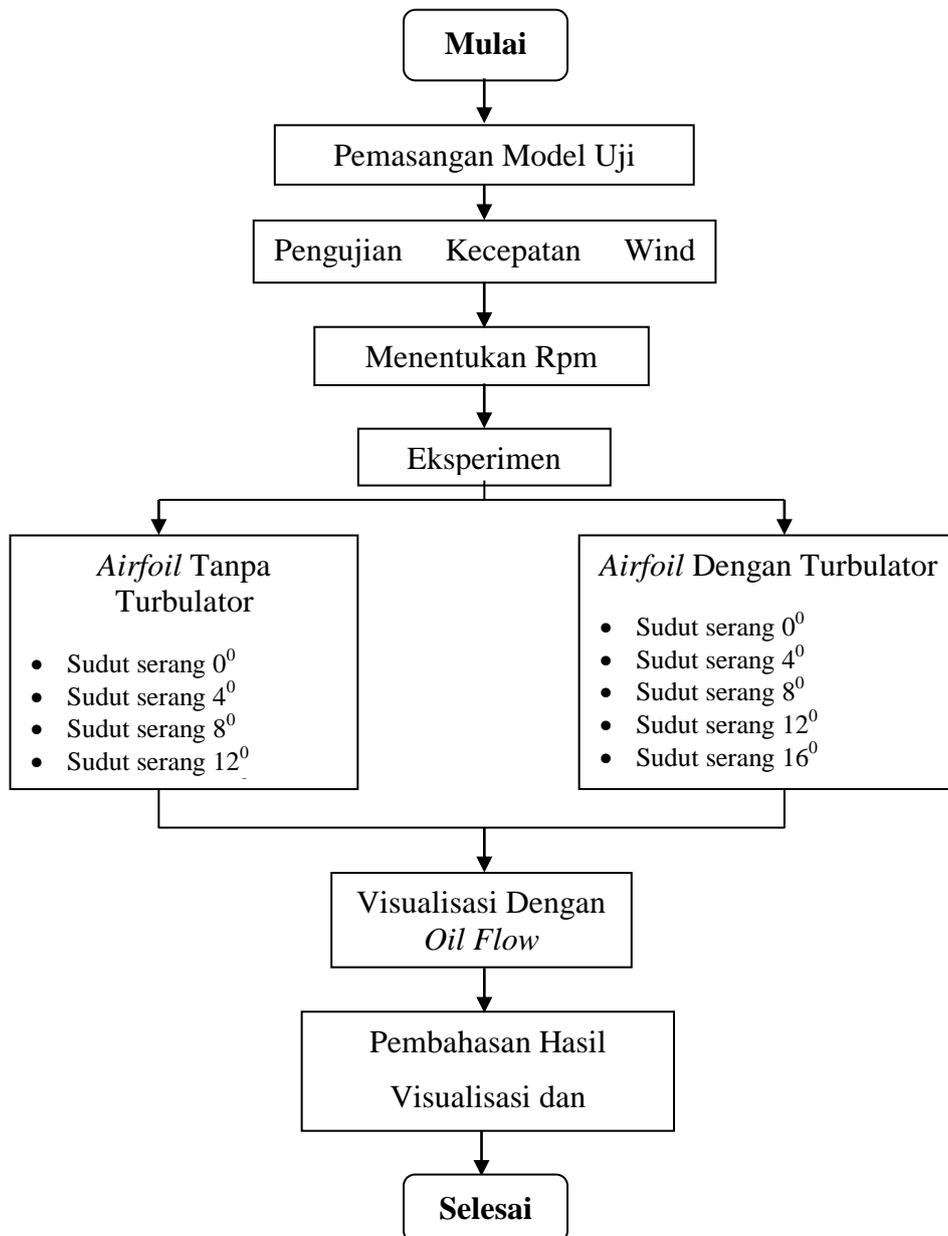
#### 3.2.2 *Visualisasi Shear Stress Lines*

Pada prinsipnya struktur *pathline* dari aliran dekat dinding adalah identik dengan struktur *shear stress lines* yang terletak pada permukaan dinding. Dengan demikian sesuai dengan pemikiran Tobak dan Peak (1982), fenomena separasi aliran tiga dimensi dapat dijelaskan melalui analisa *shear stress lines*. Teknik visualisasi dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- Pembuat campuran *Palm Oil* dan *Titanium Oksida (TiO<sub>2</sub>) powder* dengan perbandingan volume 5:1, kemudian *diblander* selama 15 menit sampai campuran menyatu dengan butiran halus TiO<sub>2</sub> tidak tampak.
- Pengenceran campuran OVF menggunakan minyak tanah dengan perbandingan volume 1:5.
- Pemasang *airfoil* dan pelat datar pada terowongan angin sebelum fan terowongan angina dijalankan.
- Pemoleskan campuran pada permukaan pelat datar hingga merata.
- Pengoperasian terowongan angin hingga tercapai kecepatan yang diinginkan.
- Penghentian fan pada terowongan angin setelah terlihat jejak aliran minyak pada bidang tumpu.
- Pemotretan pada bidang tumpu.
- Pengulangan semua proses diatas dengan penggantian bidang tumpu serta variasi sudut serang.

### 3.2.3 Bagan Alur Eksperimen.

Alur eksperimen yang dilakukan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3-12 tentang prosedur pengujian *oil visualization flow*. Pertama dilakukan pemasangan perangkat model uji, yaitu bidang tumpu dan bodi didalam *test section* lorong angin. Kemudian validasi putaran motor terhadap kecepatan aliran *free stream* di dalam terowongan angin. Pengukuran kecepatan aliran di dalam lorong angin digunakan *static pressure* di sekeliling *inlet test section*.



Gambar 3-12 Bagan Alur Eksperimen OVF

Eksperimen dilakukan dengan membandingkan struktur aliran 3D di Permukaan bidang tumpu melalui paparan *skin friction shear stress* tanpa dan dengan turbulenter generator jenis *forward facing step turbulator* (FFST) pada bodi tunggal sayap. Kemudian eksperimen ini dikembangkan terhadap efektifitas penggunaan FFST terhadap peningkatan sudut serang pada bodi. Kemudian hasil ini dipertegas dengan hasil numerik berupa eksplorasi detail aliran yang lebih kompleks dan rumit.

### 3.2.4 Kalibrasi Lorong Angin.

Proses kalibrasi ini menggunakan alat ukur tiga macam, yaitu Manometer, *Pressure different digital*, dan *Pressure Transducer* dan Data Acquisition (DAQ) *Omega*. Hasil pengukuran didapatkan pada manometer dan *pressure different* KRISBOW tabel 3-2. Perhitungan tekanan manometer menggunakan persamaan 3-1. Density yang digunakan adalah kerosin (minyak tanah).

$$P_{mano} = \frac{2\rho_{kerosin} \sin 15^\circ \Delta l}{1000} \text{ kPa} \quad 3-1$$

Tabel 3-2 Hasil pengukuran manometer dan *pressure different*.

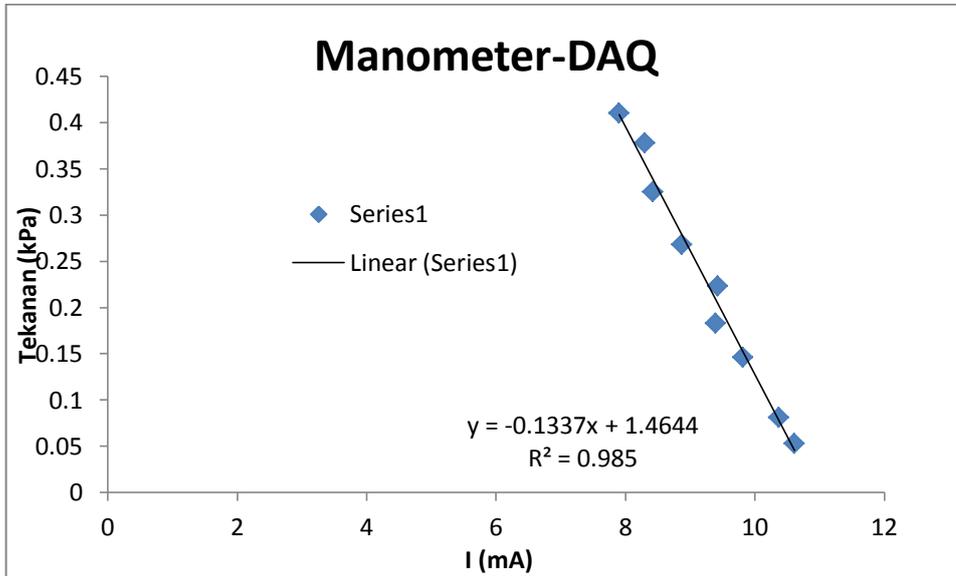
Putaran	$\Delta L$ mano	P mano.	P dig.Kris
rpm	m	kPa	kPa
500	0.013	0.052811509	0.04
600	0.02	0.081248475	0.07
800	0.036	0.146247254	0.14
900	0.045	0.182809068	0.18
1000	0.055	0.223433305	0.22
1100	0.066	0.268119966	0.27
1200	0.08	0.324993899	0.32
1300	0.093	0.377805407	0.38
1400	0.101	0.410304797	0.44

Hasil pengukuran menggunakan *pressure transducer* dan DAQ didapatkan data kuat arus (I) dalam satuan mA dan waktu. Waktu pengambilan data digunakan 2 ms selama 10 detik. Hubungan hasil pengukuran manometer dan *pressure transducer* dikaji pada gambar 3-13. Pada grafik tersebut dilakukan regresi dengan pendekatan fungsi linier. Fungsi yang didapatkan dalam proses regresi ditampilkan pada persamaan 3-2.

$$P = -0.1337I + 1.4644$$

3-2

Dimana *squared value* (koefisien korelasi) sebesar 0.985, hal ini mencerminkan pendekatan regresi linier dapat mewakili hubungan tekanan manometer dan arus DAQ dengan baik.



Gambar 3-13 Hubungan Tekanan Manometer dan Arus *Pressure Transducer*.

Pada tabel 3-3 dipaparkan contoh pengolahan data dari DAQ dengan pressure transducer. Data yang dikeluarkan alat tersebut berupa arus listrik DC dengan satuan mA. Kuat arus tersebut dikonversikan menjadi tekanan manometer dengan menggunakan persamaan 3-1. Persamaan tersebut dipaparkan pada persamaan 3-3, dengan pendekatan pitot tube antara tekanan stagnasi, tekanan dinamis dan tekanan statis.

$$P_{stagnasi} = P_{statis} + P_{dinamis}$$

$$P_{stagnasi} = P_{statis} + \frac{1}{2}\rho V^2$$

$$P_{stagnasi} - P_{statis} = \frac{1}{2}\rho V^2$$

$$V^2 = \frac{2}{\rho}(P_{stagnasi} - P_{statis})$$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_{stagnasi} - P_{statis})}$$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{manometer})} \quad 3-3$$

Kecepatan (V) ke arah x disebut sebagai U, sehingga

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{manometer})}$$

Selanjutnya kecepatan arah x tiap waktu dihitung kemudian dirata-rata. Parameter tersebut disebut sebagai *mean* U atau  $\bar{U}$ . Perhitungan fluktuasi kecepatan pada setiap waktu menggunakan persamaan 3-4, dimana kecepatan sesaat dikurangi dengan kecepatan rata-rata.

$$u' = U - \bar{U} \quad 3-4$$

Berdasarkan persamaan selanjutnya dilakukan perhitungan kuadrat dari fluktuasi kecepatan, kemudian dihitung intensitas turbulensi ( $T_u$ ) yang terjadi pada tiap putaran dengan persamaan 3-5, kemudian dirata-rata menjadi intensitas turbulensi rata-rata.

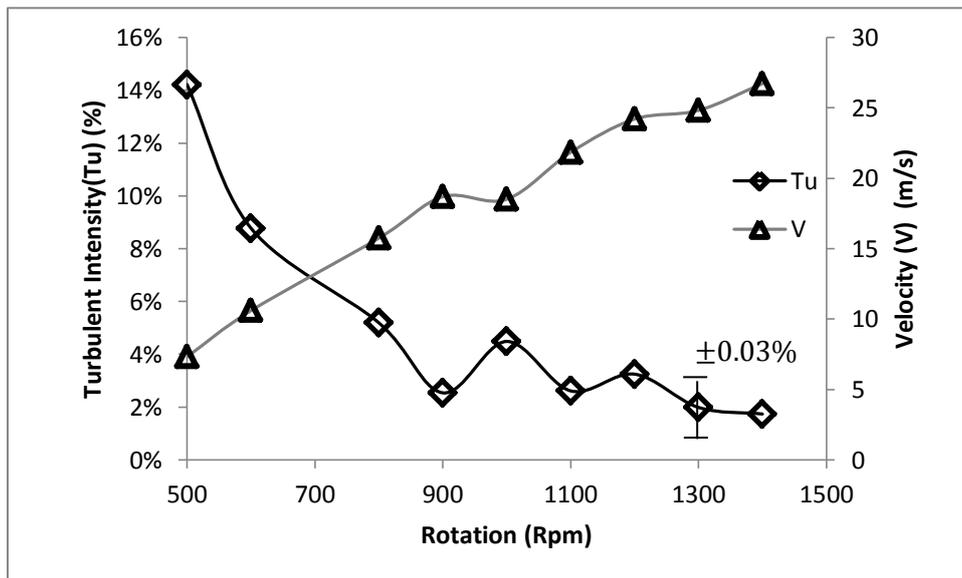
$$T_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{U}} \quad 3-5$$

Tabel 3-3 Data konversi DAQ pada putara 500RPM

Mean l	10.6129538	Mean U	9.50695525	mean u' <sup>2</sup>	1.83	Mean Tu	14.22%
--------	------------	--------	------------	----------------------	------	---------	--------

t	l	P	U	u'	u' <sup>2</sup>	Tu
0	10.565	0.058855	10.1614165	0.654461283	0.42832	0.06884
0.002	10.629	0.050343	9.3979281	-0.10902715	0.011887	0.011468
0.004	10.624	0.051008	9.45979489	-0.04716036	0.002224	0.004961
0.006	10.636	0.049412	9.310624	-0.19633125	0.038546	0.020651
0.008	10.615	0.052205	9.5701473	0.063192047	0.003993	0.006647
0.01	10.611	0.052737	9.61878644	0.111831192	0.012506	0.011763
0.012	10.589	0.055663	9.88202337	0.375068123	0.140676	0.039452
0.014	10.612	0.052604	9.60664974	0.099694493	0.009939	0.010486
0.016	10.673	0.044491	8.83483933	-0.67211592	0.45174	0.070697
0.018	10.714	0.039038	8.27573074	-1.23122451	1.515914	0.129508
0.02	11.028	-0.002724	2.18608037	-7.32087488	53.59521	0.770055

Hasil perhitungan tersebut dilakukan pada setiap putaran, kemudian ditabelkan menjadi karakteristik lorong angin. Karakteristik terowongan angin di laboratorium mekanika fluida dipaparkan pada gambar 3-14, dimana ditunjukkan intensitas turbulensi fungsi dari putaran fan terowongan angin. Pada putaran dibawah 500 RPM kondisi kerja terowongan sangat buruk disebabkan putaran motor yang tidak stabil sehingga tidak dianjurkan untuk dilakukan eksperimen pada kondisi tersebut. Pada putaran motor fan 500 RPM karaterisitik terowongan aliran dihasilkan kecepatan aliran *freestream* 7 m/s dan intensitas turbulensi 14,22 %. Kerja terowongan angin ini yang disarankan dilakukan antara 800 RPM sampai dengan 1500 RPM dengan fluktuasi intensitas turbulensi antara 1-5%.



Gambar 3-14 Karakteristik terowongan angin di laboratorium sistem termal dan fluida UK. Petra.

Pada pengukuran intensitas turbulensi dan kecepatan berdasarkan perhitungan persamaan 3-8 memiliki *uncertainty* 0.3%. Pada putaran 1200 RPM didapatkan intensitas turbulensi  $2.6 \pm 0.03$  % dan kecepatan  $25 \pm 0.00003$  m/s.

3.2.5 Ketidak pastian (*uncertainty*) pengukuran laju aliran lorong angin.

Pengukuran kecepatan aliran pada lorong angin menurut Fox et al [40] dapat didekatkan dengan persamaan Bernoulli seperti persamaan 3-5. Dimana h merupakan ketinggian dari manometer .

$$V = \left( \frac{2gh\rho_{kerosin}}{\rho_{udara}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Oleh karena itu variasi nilai kecepatan aliran (V) yang dihasilkan merupakan nilai ketidak pastian dari interval nilai ketinggian manometer (h). didapatkan

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{h}{V} \frac{\partial \left( \left( \frac{2gh\rho_{kerosin}}{\rho_{udara}} \right)^{\frac{1}{2}} \right)}{\partial h}$$

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{h}{V} \frac{2g\rho_{kerosin}}{\rho_{udara}} \frac{\partial \left( (h)^{\frac{1}{2}} \right)}{\partial h}$$

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{h}{V} \frac{2g\rho_{kerosin}}{\rho_{udara}} \frac{1}{2} h^{-\frac{1}{2}} \frac{2g\rho_{kerosin}}{\rho_{udara}}$$

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{h}{V} \frac{1}{2} \frac{2g\rho_{udara} h^{-\frac{1}{2}} 2g\rho_{udara}}{\rho_{kerosin}}$$

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{h}{V} \frac{1}{2} V^{-1} \frac{2g\rho_{udara}}{\rho_{kerosin}}$$

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{1}{V} \frac{1}{2} V^{-1} \frac{2g\rho_{udara} h}{\rho_{kerosin}}$$

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{1}{V} \frac{1}{2} V^{-1} V^2$$

$$\frac{h \partial V}{V \partial h} = \frac{1}{2}$$

3-6

Hasil tersebut didapatkan ketidak pastian (u) dari pengukuran kecepatan manometer dengan dipaparkan pada persamaan 3-7.

$$u_v = \mp \left[ \left( \frac{1}{2} u_h \right)^2 + \left( \frac{1}{2} u_{\rho_{kerosin}} \right)^2 + \left( -\frac{1}{2} u_{\rho_{udara}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad 3-7$$

Ketidak-pastian massa jenis bernilai nol karena tidak ada variasi temperatur yang besar pada kedua material tersebut. Sedangkan ketinggian manometer (h) , didapatkan dengan persamaan 3-8 dan  $\Delta l$  memiliki tidak pastian  $u_{\Delta l} = 0.001$ .

$$h = 2 \sin 15^\circ \Delta l \quad 3-8$$

$$u_h = 2 \sin 15^\circ u_{\Delta l}$$

$$u_h = 2 \sin 15^\circ \mp 0.001$$

$$u_h = \mp 0.00051$$

Sedangkan untuk ketidak pastian kecepatan aliran didapatkan sebagai berikut ini. Dimana hasil ketidak pastian pengukuran menggunakan pitot tube pada lorong angin sebesar 0.255%.

$$u_v = \mp \left[ \left( \frac{1}{2} u_h \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_v = \mp \left[ \left( \frac{1}{2} 0.00051 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_v = \mp [0.000000065025]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_v = \mp 0.000255$$

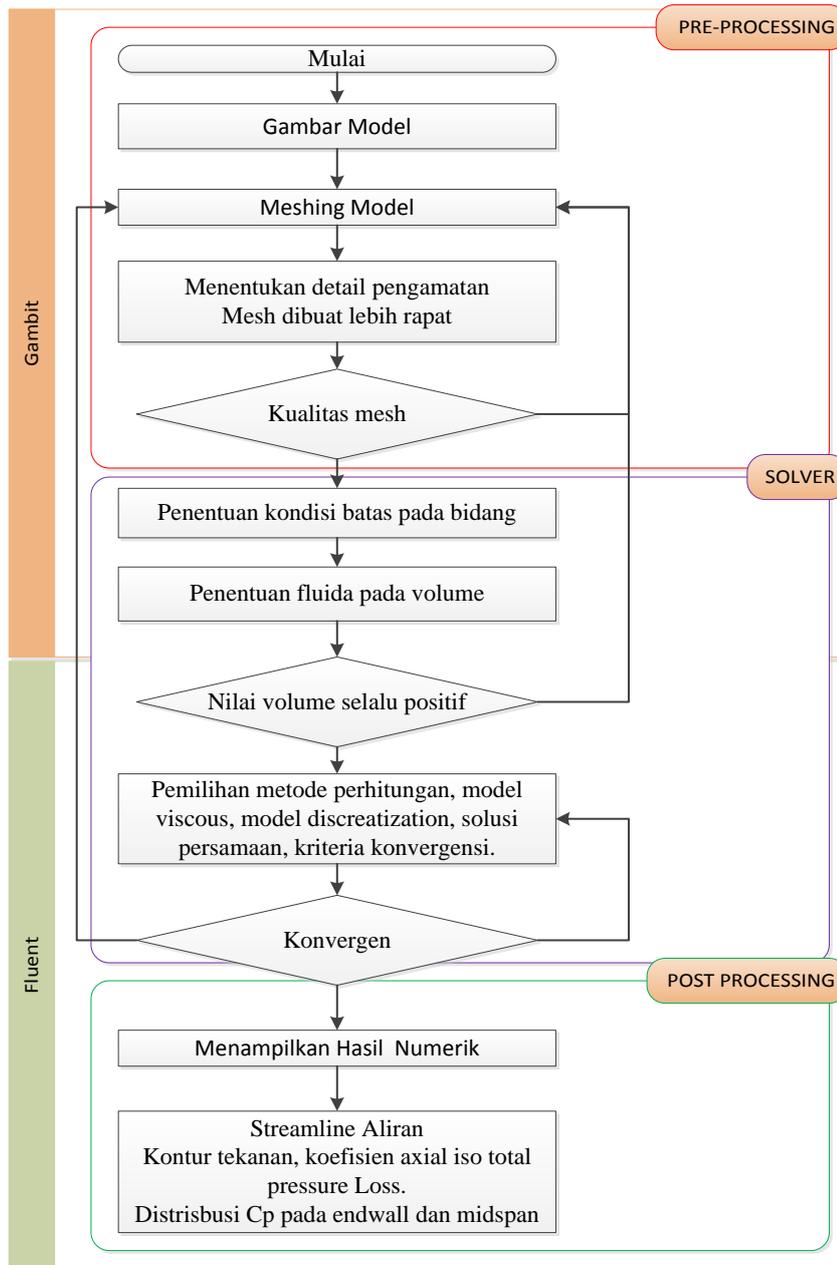
$$u_v = \mp 0.0255\%$$

### 3.3 Metode Numerik

Metode ini numerik menggunakan paket komersial CFD dengan dasar metode perhitungan *finite volume*. Tahap simulasi numerik ini dibagi menjadi 3 bagian yaitu, PRE PROCESSING, SOLVER, dan POST PROCESSING. Pada proses persiapan (Pre processing) digunakan program Geometry and Meshing Intelligent Tools (GAMBIT) untuk proses pembuatan model, pembentukan meshing dan penentuan posisi kondisi batas. Pada tahap *pre processing* yang paling sulit dilakukan adalah proses pembuatan *meshing*. Hal ini sangat tergantung dari tingkat kerumitan model dan kualitas meshing yang diharapkan. Kualitas meshing yang baik menjadi penentu terhadap waktu yang diperlukan dalam iterasi. Jumlah mesh yang semakin banyak diperlukan waktu iterasi semakin lama, namun hasil simulasi belum tentu baik. Oleh karena itu proses simulasi yang baik harus memiliki *grid independency*, di mana variasi *meshing* tidak mempengaruhi hasil dari proses simulasi, kemudian di validasi dengan hasil eksperimen.

Pada proses penyelesaian (*Solver*) digunakan paket komersial dari Ansys Fluent. Pada perangkat lunak tersebut telah disediakan fasilitas pemilihan persamaan model viscous, kondisi batas, material, persamaan penyelesaian, hubungan persamaan dan kriteria konvergensi. Proses iterasi dinyatakan selesai apabila telah melewati batas kriteria konvergen. Pemilihan semua ini disesuaikan dengan referensi dan hasilnya divalidasikan dengan hasil eksperimen terdahulu. Kemudian proses dilanjutkan dengan penelitian yang diinginkan menggunakan semua parameter yang telah ditentukan.

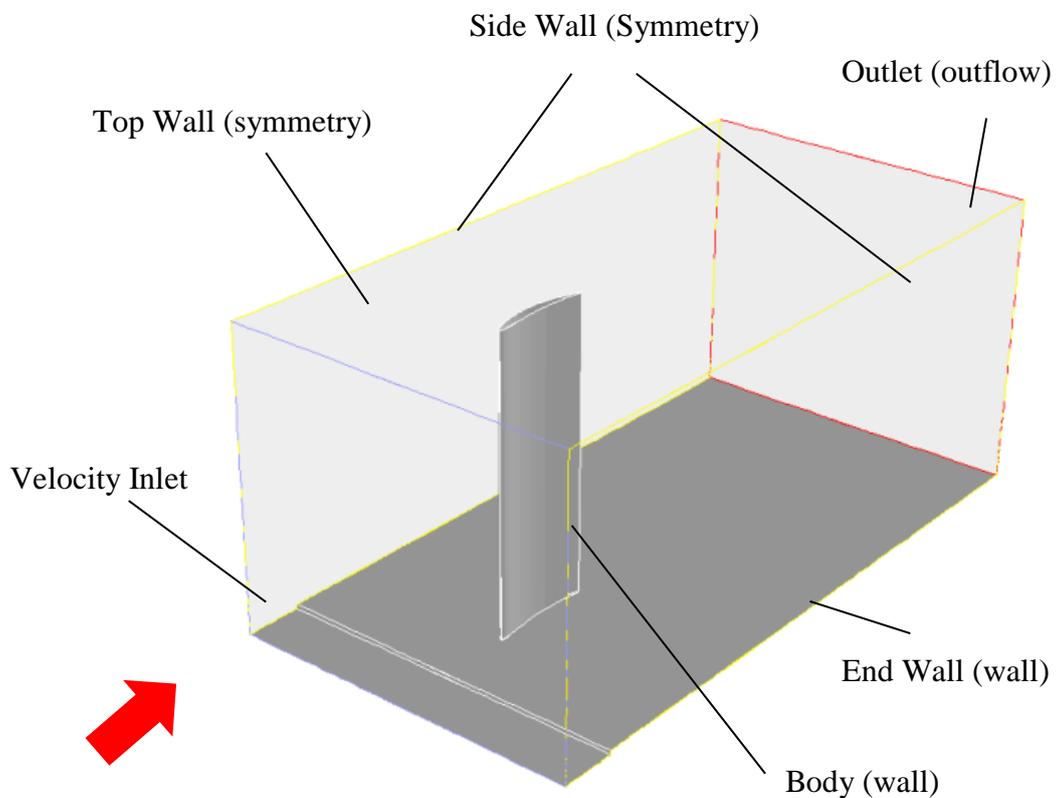
Pada proses display (*post processing*) hasil simulasi menggunakan paket komersial TECPLOT 2010. Hal ini merupakan proses eksplorasi semua hasil numerik baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Kajian kualitatif berupa *pathline* atau *streamline* aliran di daerah sekitar persimpangan (*junction*) bidang tumpu. Sedangkan kajian kuantitatif berupa kontur tekanan total, kecepatan dan intensitas turbulensi. Bagan alur numerik dipaparkan pada gambar 3-15. Hal ini disebabkan program *ansys fluent* belum memiliki fasilitas untuk menampilkan *streamline aliran* secara manual, sehingga penelusuran topologi aliran sulit dilakukan. Sedangkan pada TECPLOT penelusuran *topology* aliran dapat dilakukan secara otomatis yang tidak ada pada fasilitas Ansys Fluent.



Gambar 3-15 Bagan Alur Numerik

### 3.3.1 Model dan Mesh pada kasus 3D.

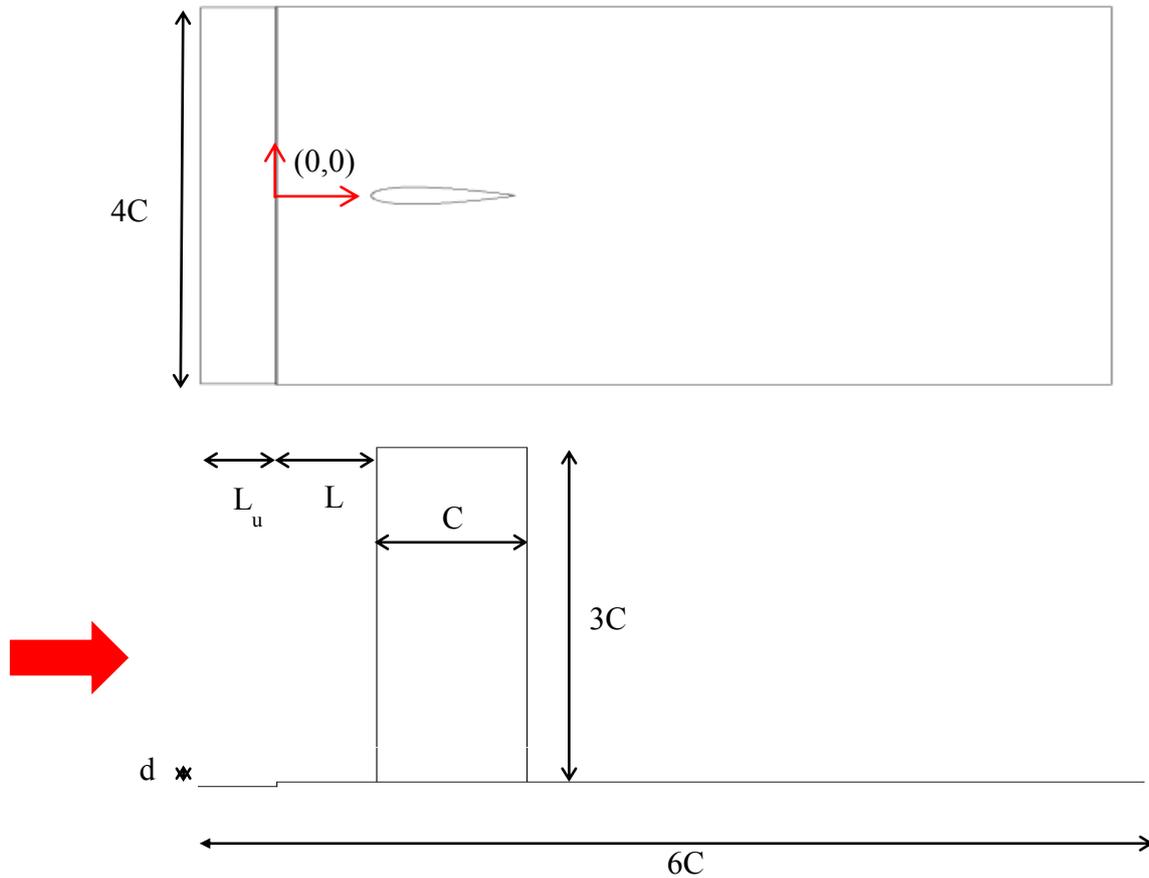
Domain penelitian yang dipaparkan pada gambar 3-16, dimana bodi, dinding samping, bidang tumpu didefinisikan dengan dinding. Sedangkan bidang permukaan aliran masuk dikondisi dengan *velocity inlet* dan sisi luar aliran dikondisikan dengan *outflow*. Hal ini disebabkan kondisi tersebut disesuaikan dengan lorong angin pada eksperimen dimana fan atau blower diposisikan sebagai kondisi hisap. Selain itu kondisi tersebut disesuaikan dengan aliran *incompressible*



Gambar 3-16 Domain analisa numerik 3D

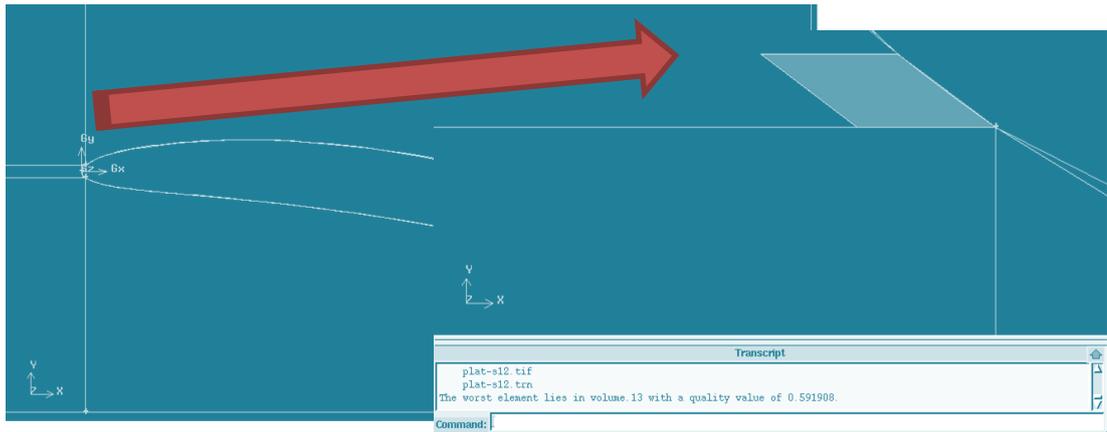
FFST ditempatkan pada jarak tertentu dari bidang aliran masuk sedangkan jarak bodi sayap diletakkan pada  $L$  dan  $L_u$  tertentu. Kajian terhadap jarak yang paling optimal dilakukan awal sebelum proses simulasi numerik 3D, sedangkan panjang chord yang digunakan 120 mm. Luas bidang tumpu yang digunakan berukuran 4C X 6C. Posisi koordinat (0,0) berada pada daerah *centerline* tetap pada posisi FFST. Jarak bodi menuju outlet berubah, jika ditambahkan dengan

panjang depan parameter depan bodi total sama  $6C$ . hal tersebut ditunjukkan pada gambar 3-17



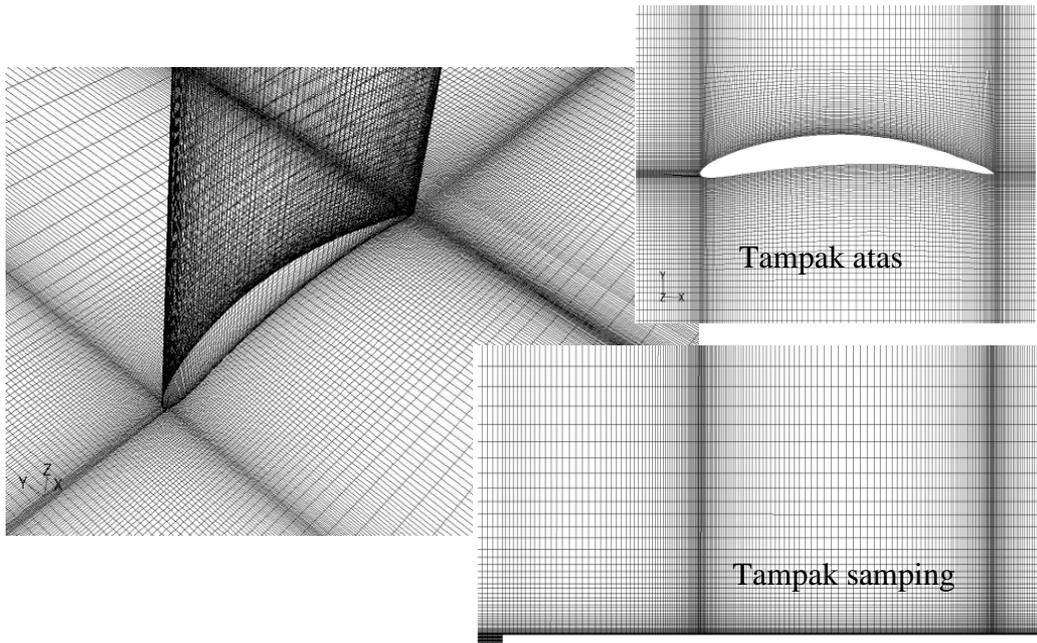
Gambar 3-17 Parameter analisa numerik 3D

Meshing yang digunakan pada model numerik diharapkan memiliki mesh yang berbentuk Map dengan nilai kualitas mesh kurang dari 0.59. Hal ini sangat penting dalam proses iterasi supaya lebih cepat mencapai konvergensi, agar dapat menghemat waktu iterasi. Selain itu bentuk meshing yang teratur dihasilkan jumlah yang lebih sedikit dan sangat rapat pada daerah rentan terhadap fenomena aliran. Kualitas mesh yang terburuk terjadi pada daerah dekat *leading edge* seperti yang ditampilkan pada gambar 3-18.



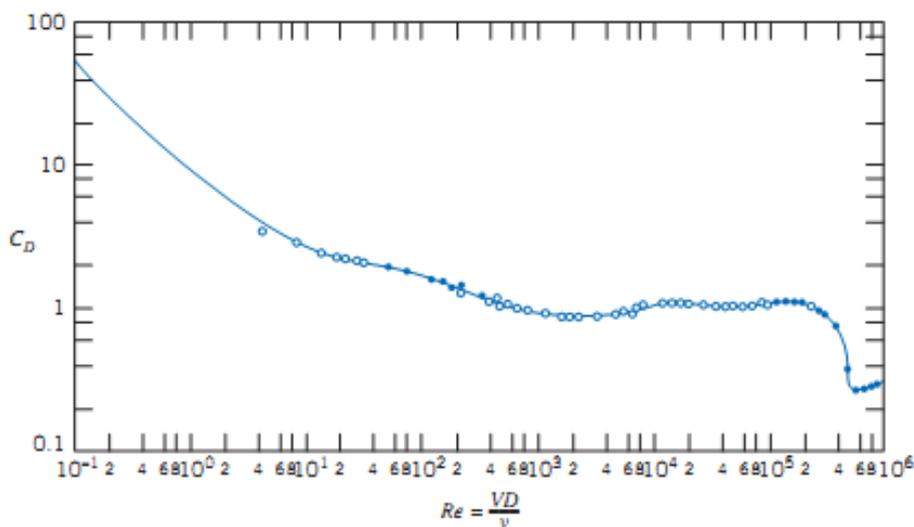
Gambar 3-18 *Worst Element* pada model

Bentuk meshing digunakan adalah hexagonal map pada seluruh meshing ditunjukkan pada gambar 3-19. Daerah-daerah yang penting untuk aliran eksternal berada di dalam boundary layer, sehingga spasi jarak tiap mesh diharapkan lebih rapat.



Gambar 3-19 Meshing pada permukaan model.

Penelitian ini melakukan analisa dengan menggunakan nilai Reynolds yang konstan, yaitu  $Re = 10^5$ . Nilai tersebut menurut Fox dan McDonald's [40] nilai  $C_d$  pada silinder melingkupi daerah  $Re = 10^4$  sampai dengan  $10^5$  memiliki nilai yang sama, sehingga efek perbedaan variasi kecepatan tidak mempengaruhi karakteristik aerodinamika suatu benda. Nilai Reynolds tersebut menjustifikasi bahwa efek perbedaan kecepatan pada *wind tunnel* tidak mempengaruhi karakteristik fenomena terbentuk aliran sekunder. Nilai tersebut dipaparkan pada gambar 3-20

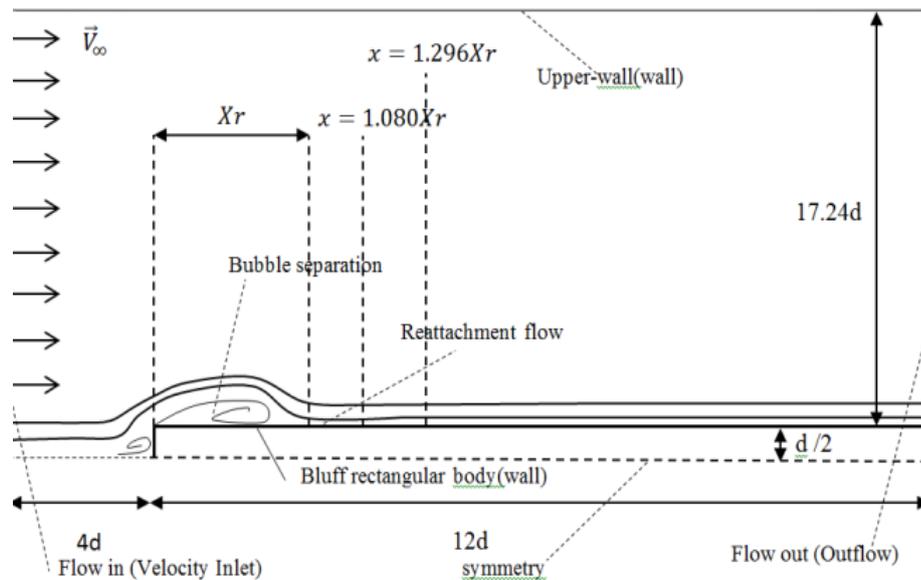


Gambar 3-20 Koefisien Seret (Drag) pada silinder [40].

### 3.4 Validasi simulasi aliran pada *blunt rectangular* berdasarkan eksperimen Djilali.

Pada proses numerik diperlukan tahap validasi hasil numerik dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yaitu Djilali [26]. Metode numerik dilakukan dengan menggunakan analisa 2D dan persamaan viscous Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) dan kondisi keadaan tunak (steady state). Pengamatan yang dilakukan dengan menggunakan beberapa ketebalan *Bluff Rectangular* yang dinyatakan dengan bilangan tak berdimensi.

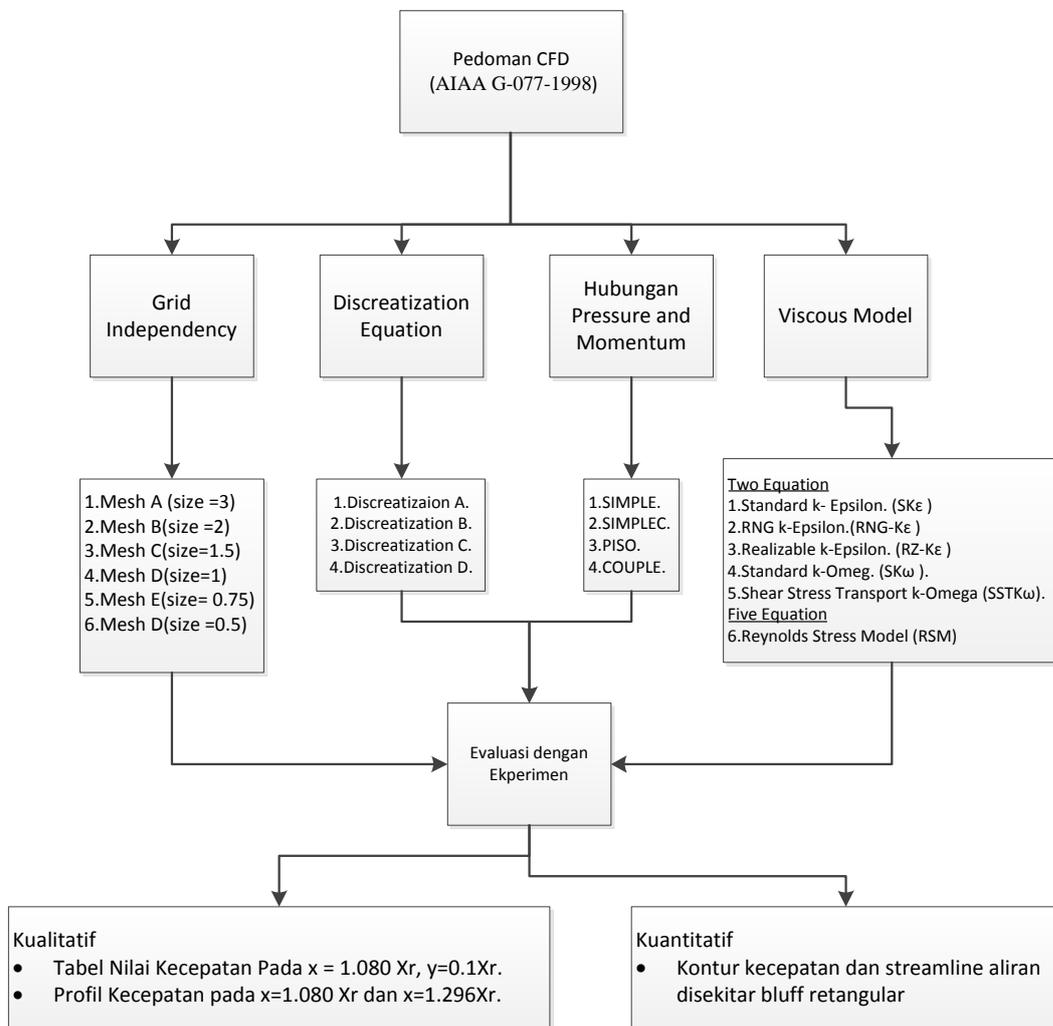
*Blockage ratio*  $Br = \frac{d}{L}$ , dinyatakan sebagai  $Br = 5.8\%$  dan aliran yang melintasi menggunakan  $Re_d=5.10^4$ . Intensitas turbulensi (Tu) aliran saat masuk dalam test section adalah  $0.25\%$  dan length scale turbulenti  $0.001$  meter. Kemudian evaluasi difokus pada posisi  $x = 1.08Xr$ . Kondisi batas ini disesuaikan seperti yang dilakukan oleh Djilali et al [22,23]. Domain simulasi dipaparkan pada gambar 3-21.



Gambar 3-21 Domain numerik *bluff rectangular*

Beberapa pernyataan dari pedoman terhadap ketidak pastian CFD yang telah disepakati AIAA G-077-1998 dikemukakan oleh Feritas [51]. Proses awal dievaluasi terhadap *grid independency*. Setelah itu dilanjutkan dengan variasi model viscous, *discretization* persamaan dan hubungan metode perhitungan antara tekanan dan momentum. Bagan alur validasi dipaparkan pada gambar 2-22.

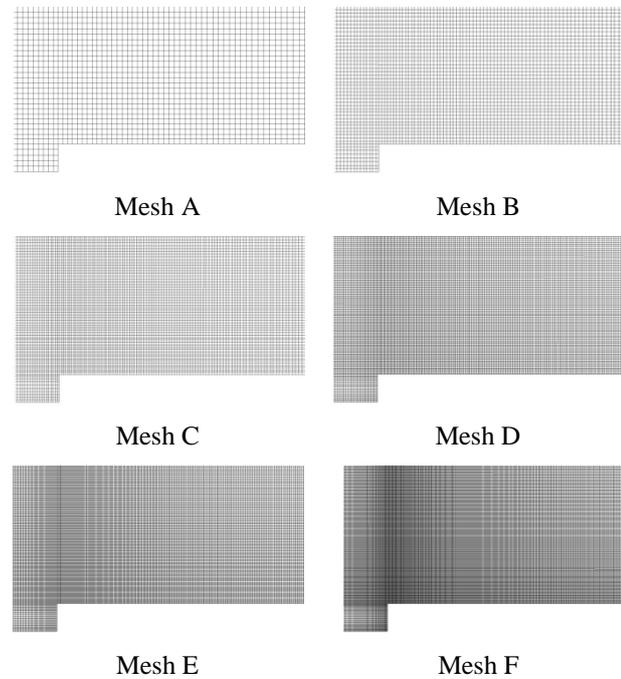
Pada proses numerik pengaruh variasi *mesh* tidak mempengaruhi hasil simulasi, pernyataan tersebut disebut sebagai *grid independency*. Pada gambar 3-23 dipaparkan variasi *meshing* yang dikaji dalam proses validasi. Mesh A merupakan model dengan jumlah mesh yang terkecil, kemudian selanjutnya Mesh B sampai dengan F jumlah mesh semakin meningkat dua kali lipat. Oleh karena itu dicari batasan ukuran mesh yang tidak mempengaruhi hasil simulasi numerik.



Gambar 3-22 Bagan Alur Validasi

Anggapan tentang *mesh* yang semakin rapat dihasilkan kualitas hasil simulasi yang lebih baik, namun hal tersebut tidak terbukti. Pada makalah ini hasil terhadap kajian mesh dipaparkan pada tabel 3-4. Keakuratan pada proses simulasi numerik dinyatakan dalam bentuk penyimpangan prediksi atau *error* terhadap nilai eksperimen. Hasil untuk mesh A, B dan C didapatkan bahwa pernyataan tentang semakin rapat mesh dihasilkan kesalahan yang lebih kecil, namun untuk mesh D, E dan F menunjukkan yang berkebalikan bahwa semakin rapat menghasilkan kesalahan prediksi semakin besar. Hal ini dinyatakan bahwa mesh memiliki sesuatu konfigurasi optimal sesuai dengan bentuk dan model yang dibentuk. Sehingga kajian mesh diharuskan dilakukan pada awal proses simulasi.

Sebab tidak ada kepastian tentang ukuran dan bentuk yang optimal, hal ini sangat tergantung dari kecepatan aliran, fluida, kekasaran permukaan dan geometri benda. Kajian ini menentukan batas mesh yang memiliki *grid independency*

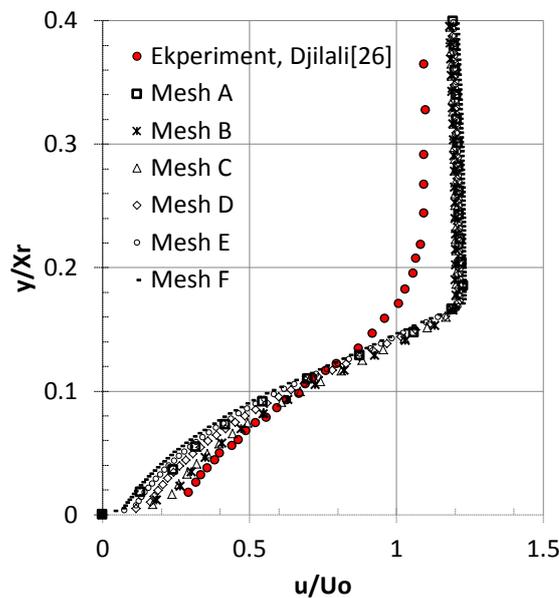


Gambar 3-23 Variasi *Meshing* untuk proses *grid independency*

Tabel 3-4 Variasi *Meshing* terhadap *grid independency*

Model	Cells	Nodes	y+(Max)	y+(Min)	U x1.08xr,y0.1xr	Error	Iterasi
Mesh A	13,640	13,890	124.52	161.35	0.626	7.5%	436
Mesh B	30,720	31,095	82.75	95.68	0.687	1.5%	690
Mesh C	54,880	55,380	61.26	63.61	0.680	0.4%	1030
Mesh D	123,240	123,989	39.80	42.08	0.638	5.7%	2013
Mesh E	192,450	193,386	30.98	33.17	0.607	10.3%	3193
Mesh F	41,800	343,047	22.04	24.04	0.577	14.7%	5502
Eksperimen					0.677	0.1%	

Evaluasi pada suatu posisi tertentu memungkinkan terjadi kesalahan secara konseptual, sehingga perlu dipaparkan profil kecepatan di titik pengamatan seperti dipaparkan pada gambar 3-24. Semua model grid independent dibawah  $y < 0,1x_r$  dihasilkan *under prediction* sedangkan  $y > 0,1x_r$  diatasnya dihasilkan nilai yang *over prediction* dibandingkan dengan nilai eksperimen. Profil kecepatan yang terjadi pada posisi pengamatan memiliki kecenderungan yang sama seperti yang dipaparkan pada tabel 3-5.



Gambar 3-24 Profil kecepatan pada  $X = 1.08 X_r$

$y^*$  yaitu parameter non dimensional perbandingan posisi  $y$  dengan fungsi tegangan geser permukaan. Untuk nilai yang dianjurkan diantara 30-300, sehingga sangat tergantung jarak mesh pertama terhadap dinding. Hasil menunjukkan nilai  $y^+$  dan  $y^*$  yang memiliki antara nilai 60 dihasilkan prediksi yang sangat baik.

Evaluasi dilanjutkan pada variasi permodelan turbulence yang dipaparkan tabel 3-6, untuk perbedaan prediksi aliran dengan berbagai model viscous. Semua model viscous selain RNG- $K\epsilon$  dan SST- $K\omega$  didapatkan kesalahan prediksi 10%-15% dibandingkan dengan eksperimen, sehingga sangat tidak dianjurkan digunakan untuk memprediksi aliran pada kondisi didekat dinding dan memprediksi separasi aliran. Sedangkan untuk model terbaik adalah model viscous SST- $K\omega$  dengan kesalahan prediksi disuatu posisi sebesar 0.37% dan S

$K\epsilon$  sebesar RMS 1.48%. Sedangkan pada keluarga K-Epsilon menunjukkan hasil yang terbaik model S- $K\epsilon$  dihasilkan prediksi terbaik sebesar 5.76%.

Tabel 3-5 Variasi Model Turbulence Viscous.

Model	Viscous	$U_{x1.08xr,y0.1xr}$	Error	Iterasi
SK $\epsilon$	Standard K-Epsilon	0.638	5.76%	2013
RNG-K $\epsilon$	RNG K-Epsilon	0.607	10.34%	3193
RK $\epsilon$	Realizable K-Epsilon	0.577	14.77%	5502
SK $\omega$	Standard K-Omega	0.572	15.51%	Non Conv
SST-K $\omega$	SST-K-Omega	0.680	0.37%	1030
RSM	Reynolds Stress Model	0.687	1.48%	690
Eksperimen		0.677	0.00%	

Proses *discretization* persamaan tekanan, momentum dan model viscous diharuskan menggunakan lebih dari *second order* didalam pedoman simulasi numerik, hal ini perlu dibuktikan secara kualitatif yang dipaparkan pada tabel 3-6. Untuk nilai pada posisi tertentu didapatkan bahwa fist order dan dihasilkan kesalahan prediksi yang kecil paling kecil, kemudian second order dibandingkan dengan orde yang lebih tinggi, namun nilai kesalahan penyimpangannya tidak terlalu besar. Sedangkan untuk model *discretization* yang lebih tinggi seperti model *discretization* D dan C menunjukkan kesalahan yang lebih besar. Kemudian untuk *discretization* D menunjukkan nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan *discretization* C, walaupun tidak konvergen. Proses iterasi selalu diharapkan waktu proses iterasi lebih cepat dan selalu konvergen, sehingga disimpulkan bahwa *discretization* untuk proses CFD dianjurkan hanya digunakan cukup *second order*.

Tabel 3-6 Evaluasi *Discretization*

Model	Pressure	Momentum	$k$	$\omega$	$U_{x1.08xr,y0.1xr}$	Error	Iterasi
Discret A	Standard	Fist Order Upwind	Fist Order Upwind	Fist Order Upwind	0.67711	0.02%	921
Discret B	Second Order	Sec. Order Upwind	Sec. Order Upwind	Sec. Order Upwind	0.67952	0.37%	1030
Discret C	PRESTO	QUICK	QUICK	QUICK	0.65609	3.09%	1136
Discret D	PRESTO	Third Or. MUSCL	Third Or. MUSCL	Third Or. MUSCL	0.68990	1.91%	non conv
Eksperimen					0.677	0.0%	

Hubungan perhitungan antara nilai tekanan dan momentum dengan beberapa metode dinyatakan pada tabel 3-7. Hasil pada tabel tersebut menunjukkan metode SIMPLEC lebih baik dibandingkan dengan metode yang lain namun waktu iterasi yang dibutuhkan lebih lama. Khusus kasus *bluff rectangular* yang terjadi perbedaan kecepatan yang tinggi, maka kecepatan digunakan sebagai tebakan awal dalam proses iterasi lebih baik menggunakan tebakan nilai awal simulasi berdasarkan kecepatan. Hal ini serupa metode SIMPLEC yang melakukan tebakan awal dengan kecepatan kemudian dikoreksi dengan tekanan, sehingga metode ini paling baik digunakan untuk variasi kecepatan yang tinggi. Sebab karakteristik aliran yang terjadi di *bluff rectangular* terjadi *bubble separation* dengan memiliki nilai variasi kecepatan yang sangat besar pada daerah tersebut.

Tabel 3-7 Hubungan tekanan dan kecepatan pada proses simulasi.

Model	Pressure-Velocity	$U_{x1.08x,y0.1x}$	Error	Iterasi
SIMPLE	SIMPLE	0.67952	0.37%	1030
SIMPLEC	SIMPLEC	0.67602	0.14%	1212
PISO	PISO	0.68200	0.74%	1084
COUPLE	COUPLE	0.67951	0.37%	non conv
Eksperimen		0.67700	0.00%	

Parameter kesalah prediksi hasil simulasi yang dapat diterima dalam penelitian dinyatakan lebih dari 10% dari data eksperimen. Pada tabel 3-8 parameter yang masih mungkin digunakan dalam simulasi *bubble separation*. Khusus parameter grid independency sangat tergantung dari bentuk geometri dan tempat analisa, yang dinyatakan dengan parameter  $y^+$ .

Tabel 3-8 Parameter FLUENT 3D yang direkomendasikan.

Grid independency	$y^+=$ sesuai wall function, terbaik 60.
Model Viscous	SST-K-Omega, RSM, SK-Epsilon
Discretization Equation	Semua model, First-order terbaik
Hubungan Tekanan dan Kecepatan	Semua model, SIMPLEC terbaik

Sesuai dengan rekomendasi yang telah ditetapkan, sebelum kajian numerik dilakukan pengujian *grid Independence* terlebih dahulu. Model yang digunakan merupakan aliran pada pelat datar pada kecepatan udara *free stream* 15m/s dengan intensitas turbulensi 5%. Pada tabel 3-9 dipaparkan variasi mesh dari A sampai dengan mesh D untuk setiap tingkatan mesh dilakukan pengurangan jumlah mesh dengan interval setengah dari mesh sebelumnya. Dasar jumlah Mesh A disesuaikan dengan kebutuhan analisa aliran separasi 3D yang terjadi di dinding, sehingga  $y^+$  diharuskan berada di dalam *boundary layer*.

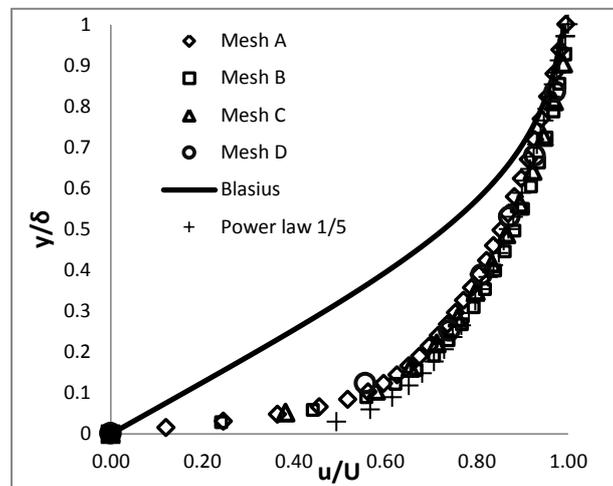
Lapisan *boundary layer* paling dekat dinding adalah *laminar sublayer* di mana nilai  $y^+$  kurang dari 10. Mesh yang masih menjangkau daerah *laminar sublayer* adalah Mesh A dan Mesh, sedangkan untuk nilai kecepatan dan shape faktor Mesh A,B dan C memiliki nilai yang mendekati sama. Oleh karena itu Mesh B merupakan pilihan terbaik untuk proses simulasi lebih lanjut, dimana nilai kecepatan dan shape faktor mendekati sama dengan dua mesh yang lain sehingga telah memiliki *grid Independence*. Hasil evaluasi ini tidak dapat divalidasi dengan hasil eksperimen, sebab posisi *laminar sublayer* sangat tipis dari dinding dan sulit diukur. Namun profil kecepatan pelat datar tersebut dibandingkan dengan persamaan *power law* yang terjadi pada aliran internal saat sudah *fully development*.

Tabel 3-9 Evaluasi *grid independency* pelat datar.

Model	Node	Cells	$y^+$	$y^*$	Iterasi	Velocity (m/s) ( $x=164\text{mm}$ , $y=0.5\text{mm}$ )	Shape Factor $H=\delta^*/\theta$
Mesh A	177,711	176,000	4.761	4.739	2102	9.53	2.02
Mesh B	116,497	115,200	7.772	8.904	2033	9.52	2.00
Mesh C	68,886	68,000	11.928	13.175	1047	8.97	2.09
Mesh D	34,386	33,800	19.952	21.731	710	8.48	2.66
Power Law = $1/n, n=5$						10.36	1.70
Blasius						5.95	2.60

Validasi profil kecepatan dengan *power law* yang dipaparkan pada gambar 3-25, Penyelesaian persamaan Blasius merupakan persamaan aliran laminar sedangkan untuk aliran turbulen ditunjukkan pada *power law*. Persamaan *power law* dengan  $n=5$  yang paling mendekati hasil simulasi numerik aliran *free stream*

dengan kecepatan 15m/s dan intensitas turbulensi 5%. Hasil menunjukkan bahwa kesalahan hasil prediksi numerik menunjukkan sebesar 9% dalam hasil profil kecepatan. Penyimpangan terbesar terjadi didaerah dekat dengan dinding dimana prediksi numerik power law dengan order 5 lebih fuller dibandingkan dengan hasil numerik, hal ini disebabkan posisi pengamatan mempengaruhi nilai Reynolds number aliran sesuai dengan teori *boundary layer internal flow*. Dampak perubahan Reynolds number aliran menyebabkan perubahan profil kecepatan aliran. Hal ini diperlihatkan pada gambar 3-23. Model Viscous yang digunakan RSM.



Gambar 3-25 Profil kecepatan pada  $X = 1.08 X_r$

Simulasi numerik pada model 2D dilakukan perbaikan meshing khususnya didekat dinding. Hal ini disebabkan terhadap analisa *boundary layer* yang terjadi di dekat dinding. Meshing disesuaikan agar model memiliki nilai  $y^+$  mendekati 1, sehingga dapat mengeksplorasi daerah *laminar sublayer*. Model viscous yang digunakan RSM dan fungsi dinding *enhanced wall treatment*, agar dapat menganalisa fluktuasi kecepatan secara tiga dimensi.

Dampak fenomena *bubble separation* yang merupakan *time dependent* sehingga dilakukan pembuktian simulasi dengan kondisi Unsteady. Kondisi tersebut perlu untuk dibuktikan dengan simulasi URANS dan LES. Parameter simulasi numeric di tunjukkan pada tabel 3-10.

Tabel 3-10 Parameter FLUENT 2D yang direkomendasikan.

Grid independency	$y^+=1$ .
Wall function	Enhanced Wall Treatment
Model Viscous	RSM, URANS dan LES
Discretization Equation	Semua model, Second-order terbaik
Hubungan Tekanan dan Kecepatan	Semua model, SIMPLEC terbaik

*Sengaja dikosongkan*

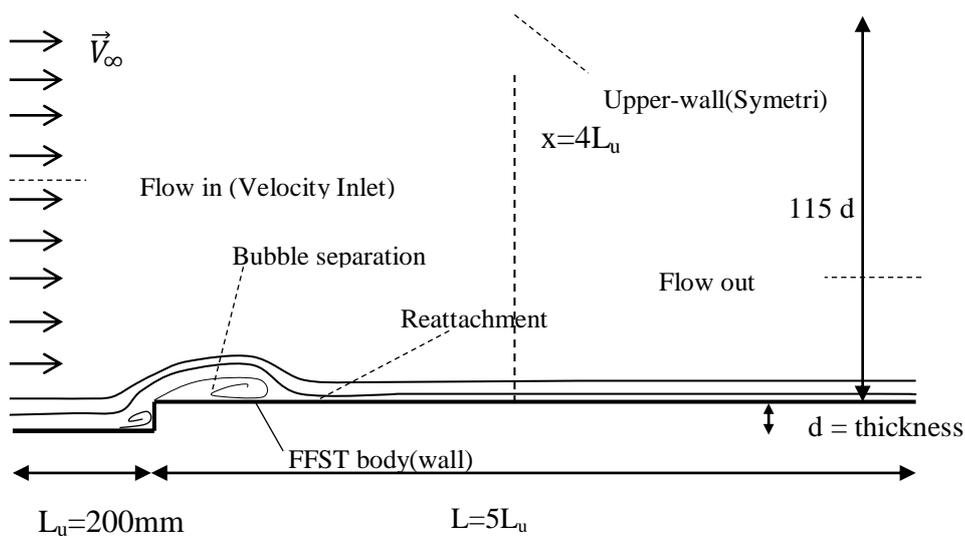
**Sengaja dikosongkan**

## BAB 4

### HASIL DAN ANALISA

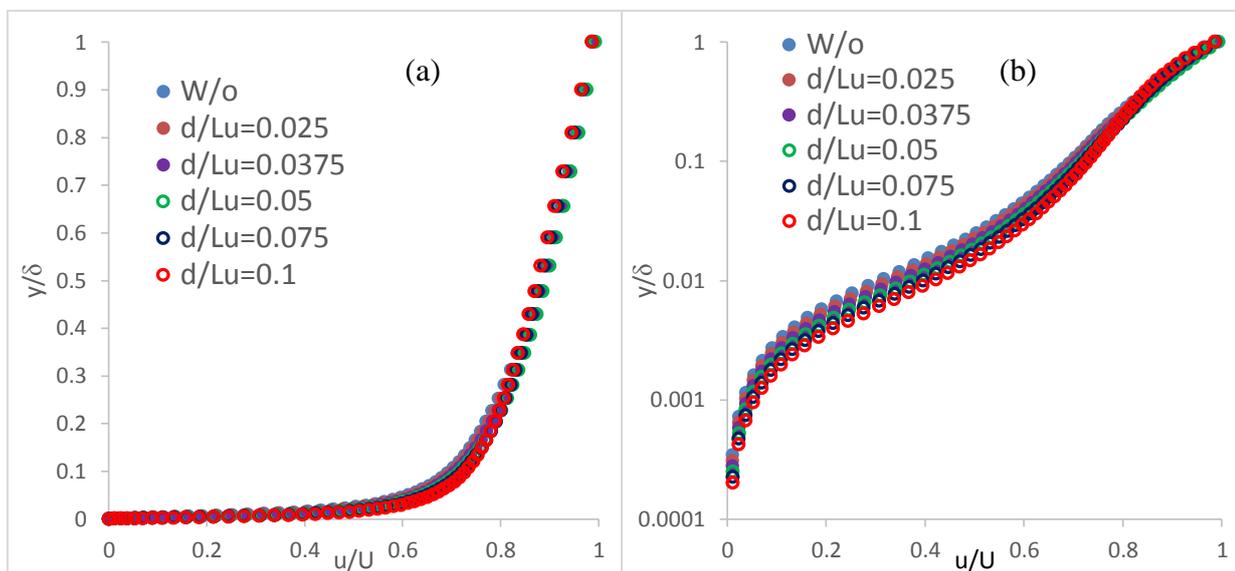
#### 4.1 Optimasi Ketebalan dan Posisi *Forward Facing Step Turbulent Generator* (FFST) dari Inlet dengan Simulasi Numerik 2D.

Simulasi numerik dilakukan dengan domain seperti dipaparkan pada gambar 4-1. Penelitian ini menggunakan variasi ketebalan FFST dengan parameter tidak berdimensi  $d/L_u$ , dimana ketebalan FFST ( $d$ ) dan posisi FFST dari inlet ( $L_u$ ). Berdasarkan dari penelitian Suksangpanomrung et al [24] dampak dari dinding *test section* dapat diabaikan apabila *blockage ratio* ( $Br$ ) kurang dari 1%. Parameter tersebut merupakan perbandingan ketebalan FFST ( $d$ ) dengan lebar test section ( $H$ ), dimana penelitian ini nilai *blockage ratio* sebesar 0.86%. Nilai ini lebih kecil dari penelitian Suksangpanomrung et al [24] dan aliran *free stream* yang digunakan memiliki nilai Reynolds number  $Re_d = 5.10^4$  terhadap tebal FFST. Evaluasi profil kecepatan aliran dilakukan pada posisi  $X=4L_u$ , dimana aliran telah mengalami *reattachment*. Domain penelitian yang digunakan pada penelitian ini sisi atas menggunakan *simetris*, sisi fluida masuk menggunakan *velocity inlet*, sisi fluida keluar menggunakan *outflow* dan yang lainnya menggunakan *wall*.



Gambar 4-1 Domain simulasi perbandingan tebal dengan jarak FFST

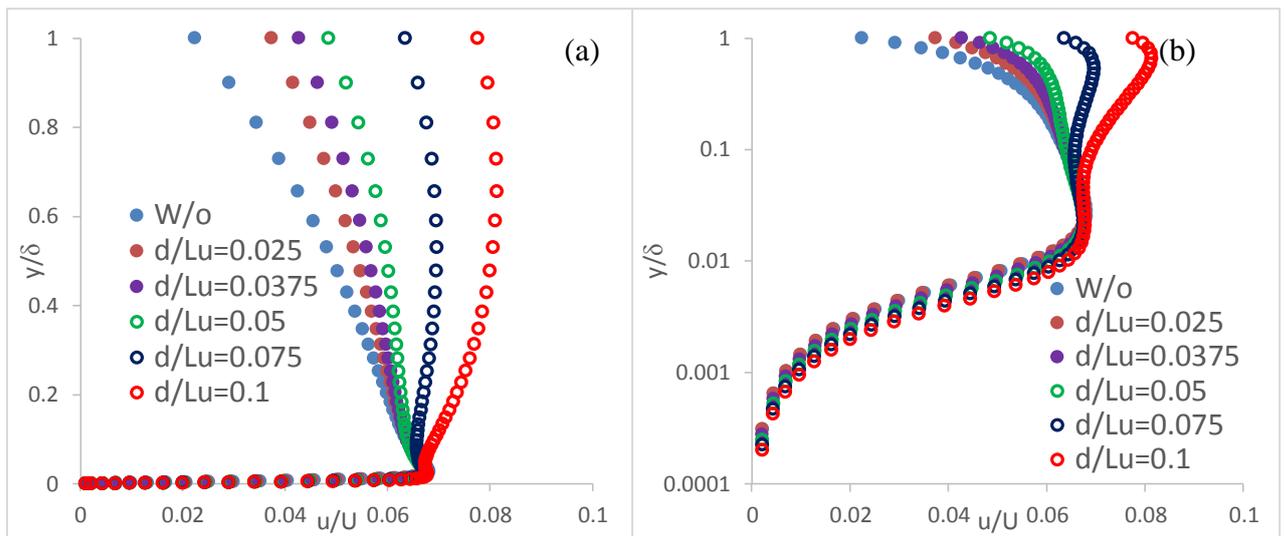
Profil kecepatan dipaparkan pada gambar 4-2. Hasil profil kecepatan pada FFST  $d/L_u=0.025$  dan  $d/L_u=0.0375$  indentik dengan profil kecepatan tanpa FFST. Hal ini mengindikasikan bahwa dampak FFST tersebut tidak efektif. Sedangkan profil kecepatan yang terjadi pada FFST  $d/L_u=0.05$  sampai dengan  $d/L_u=0.1$  memiliki momentum yang lebih kuat di *laminar sub layer* yaitu *boundary layer* ( $y/\delta$ ) kurang dari 0.1, sedangkan pada *buffer layer* momentum yang dimiliki lebih kecil. Pada hasil evaluasi profil kecepatan diperlihatkan bahwa semakin tebal dimensi FFST menyebabkan peningkatan momentum di dekat dinding dan penurunan momentum pada ketebalan *boundary layer* ( $y/\delta$ ) lebih dari 0.1.



Gambar 4-2 Profil kecepatan pada variasi ketebalan FFST (a)  $y/\delta$  skala normal, (b)  $y/\delta$  skala logaritma .

Intensitas turbulensi merupakan parameter indikasi terjadinya fluktuasi kecepatan di dalam aliran. Aliran dengan intensitas turbulensi tinggi diprediksi lebih tangguh terhadap hambatan aliran. Semua aliran yang menggunakan FFST selalu dihasilkan profil intensitas turbulensi yang lebih tinggi di dalam *boundary layer*. Hal ini diperlihatkan pada gambar 4-3 dimana peningkatan intensitas turbulensi yang signifikan terjadi pada ketebalan FFST  $d/L_u$  lebih dari 0.075. Pada FFST dengan ketebalan  $d/L_u=0.1$  dihasilkan aliran dengan profil intensitas turbulensi yang paling besar dibandingkan dengan konfigurasi yang lainnya,

kemudian disusul oleh ketebalan  $d/Lu = 0.075$ . Selain itu profil intensitas turbulensi dengan FFST memiliki intensitas turbulensi yang tinggi dekat bidang tumpu atau pada ketebalan *boundary layer*  $y/\delta$  lebih dari 0.05. Secara keseluruhan profil intensitas turbulensi dengan FFST lebih menguasai pada seluruh posisi ketebalan *boundary layer*.



Gambar 4-3 Profil Intensitas turbulensi pada variasi ketebalan FFST, (a)  $y/\delta$  skala normal, (a)  $y/\delta$  skala logaritma.

Pada tabel 4-1 dipaparkan parameter yang mengidentifikasi karakteristik aliran dalam bentuk *disturbance thickness* atau ketebalan *boundary layer*. *Displacement thickness* merupakan parameter yang menyatakan ketebalan daerah aliran momentum yang telah di integrasikan. *Momentum thickness* merupakan besaran energi momentum terdapat di daerah aliran viscous. Perbandingan parameter antara *displacement thickness* dan *momentum thickness* merupakan parameter yang dinyatakan dengan *shape factor*.

*Shape factor* yang bernilai 3 merupakan aliran laminar, jika terjadi separasi pada aliran tersebut nilai semakin tinggi, sedangkan *shape factor* dengan nilai 1.3 menunjukkan aliran dalam kondisi aliran turbulen. Batas aliran turbulen memiliki *shape factor* 2.5 sampai dengan 1.3. Aliran turbulen memiliki momentum energi yang kuat dan turbulensi intensitas yang tinggi. Hasil simulasi pada daerah pengamatan didapatkan bahwa dengan FFST ketebalan 0.075 dan 0.1  $d/Lu$  memiliki nilai *shape factor* 1.31 yang merupakan nilai terkecil.

Kondisi ini menunjukkan bahwa dimensi FFST tersebut merupakan parameter yang terbaik diaplikasi mereduksi aliran terjadinya aliran sekunder. Sedangkan pada aliran tanpa FFST didapatkan *shape factor* 1.35 nilai lebih besar dibandingkan dengan aliran dengan FFST. Namun pada  $d/L_u$  dengan nilai kurang dari 0.05 memiliki nilai *shape factor* yang lebih kecil pula sehingga turbulensi aliran semakin besar.

Tabel 4-1 Parameter *Boundary Layer* tanpa dan dengan FFST.

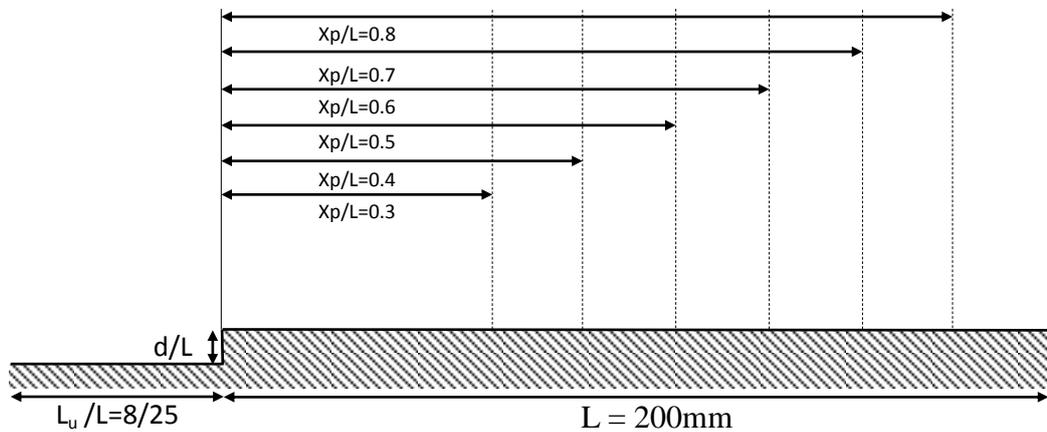
Model		$d/L_u=0.025$	$d/L_u=0.0375$	$d/L_u=0.05$	$d/L_u=0.075$	$d/L_u=0.1$
Parameter	W/o					
Disturbance Thickness ( $\delta$ )mm	18.1877	20.2148	22.467	24.9695	27.7501	30.8396
Displacement Thickness( $\delta^*$ )	0.00273309	0.00296	0.00321	0.00347	0.00400	0.00453
Momentum Thickness ( $\theta$ )	0.00202094	0.00220	0.00241	0.00263	0.00308	0.00351
Shape Factor (H)	1.35	1.34	1.33	1.32	1.30	1.29

Hubungan antara nilai perbandingan angka  $d/L_u$  disesuaikan bahwa semakin jauh penempatan FFST dihasilkan *Shape Factor* yang semakin kecil. Hal ini menginformasikan bahwa semakin jauh *boundary layer* tersebut berkembang menghasilkan aliran yang semakin turbulen dibandingkan tanpa FFST.

**Sengaja dikosongkan**

## 4.2 Perkembangan boundary layer setelah melintasi FFST dengan Simulasi numerik 2D .

Hasil kajian optimasi ketebalan FFST dihasilkan aliran yang semakin turbulen di dekat bidang tumpu. Penelitian menggunakan numerik 2D untuk eksplorasi karakteristik aliran, dimana dimensi dan posisi dipaparkan pada gambar 4-4. Evaluasi karakteristik aliran berbentuk profil kecepatan dan intensitas turbulensi yang diamati disepanjang perubahan posisi menuju *downstream* dengan interval  $X_p/L=0.1$ . Parameter tersebut merupakan perbandingan antara posisi pengamatan dengan panjang lintasan, dimulai dari 0.3 sampai dengan 0.8. Pengamatan aliran lebih difokuskan pada aliran *viscous* dekat dinding.

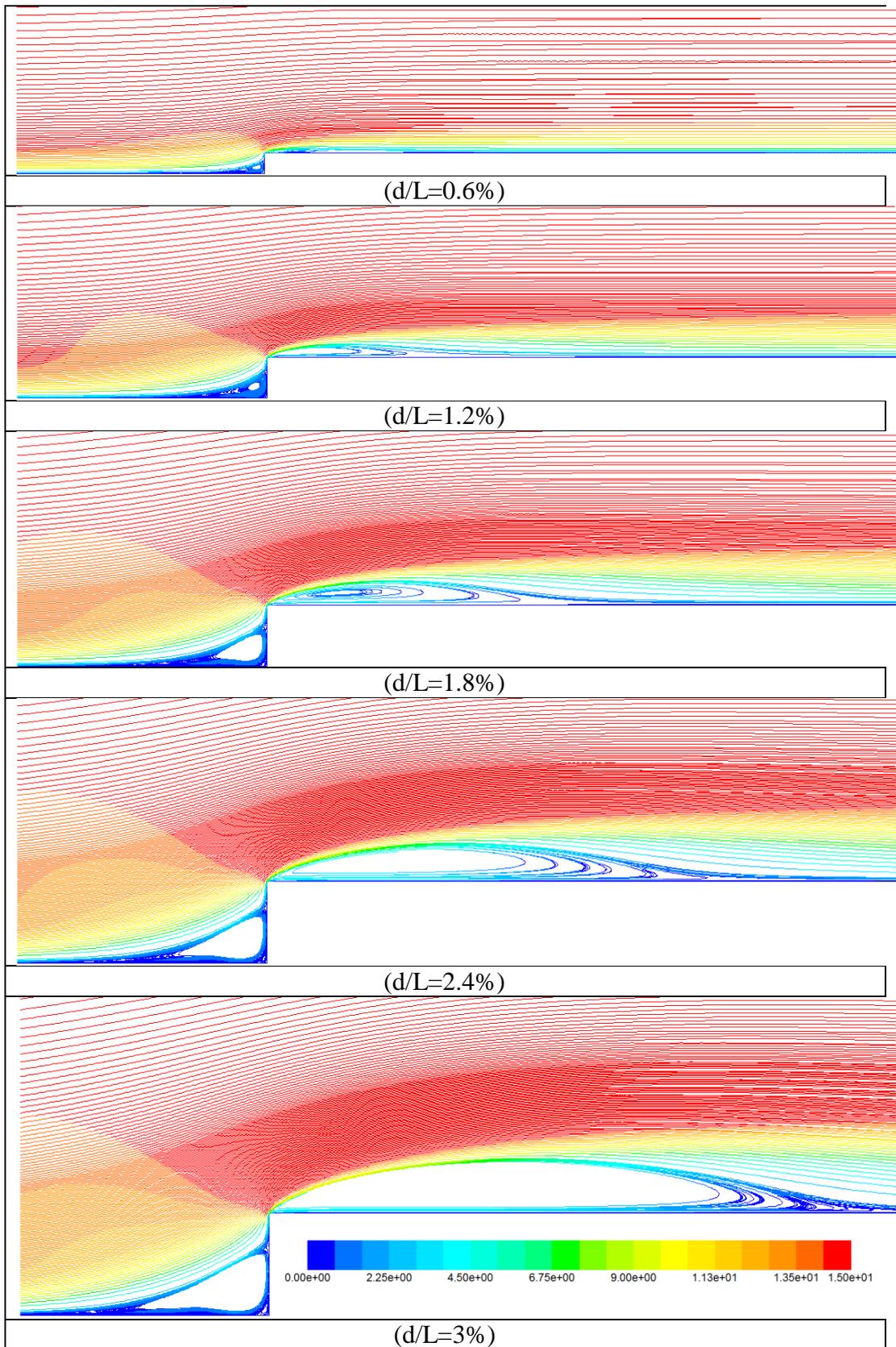


Gambar 4-4 Dimensi dan posisi evaluasi karakteristik aliran.

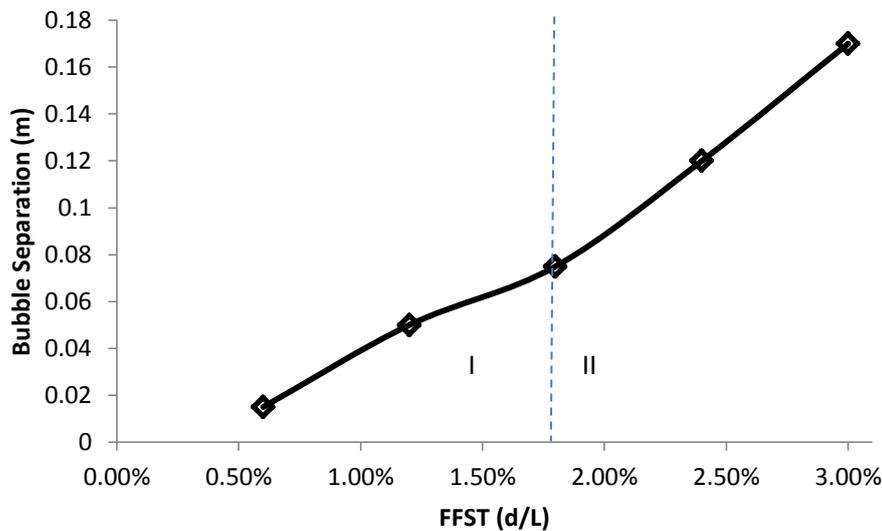
Analisa numerik dalam bentuk *streamline* aliran dipaparkan pada gambar 4-5. Hasil menunjukkan semakin tebal FFST yang digunakan selalu dihasilkan posisi *reattachment point* semakin jauh. Akibat hal itu ukuran *bubble separation* semakin besar, sehingga memproduksi intensitas turbulensi aliran yang semakin tinggi. Jika dievaluasi secara keseluruhan, peningkatan intensitas turbulensi aliran di daerah *reattachment point* selalu diimbangi dengan terjadinya penurunan energi momentum aliran. Karakteristik aliran setelah melintasi FFST indentik dengan Serry [27], dimana terjadi dua daerah resirkulasi aliran yaitu di depan FFST dan setelah melintasi FFST. Seiring dengan semakin tebal FFST selalu dihasilkan *bubble separation* atau resirkulasi aliran semakin kuat. Peningkatan *bubble separation* setelah melintasi FFST jauh lebih besar dibandingkan dengan

*bubble* di depan FFST. Dua resirkulasi aliran ini merupakan indentitas FFST sehingga berbeda terhadap karakteristik aliran *Bluff rectangular Turbulent Generator*(BRT). FFST memiliki potensi pemicu lebih besar dalam peran meningkatkan intensitas turbulensi aliran dibandingkan dengan BRT, selain itu fenomena ini selalu diimbangi dengan penurunan momentum energi pada aliran di dekat bidang tumpu. *Bubble separation* merupakan peristiwa terjadi aliran terseparasi mampu *reattachment*, sedangkan aliran terseparasi yang tidak mampu kembali disebut sebagai *massive separation*. Fenomena terjadi *massive separation* sering terjadi pada jenis turbulenti generator *obstacle* dimana aliran hancur membentuk gugusan vortex. Peristiwa tersebut menyebabkan hancurnya energi baik momentum dan tekanan sehingga membangkitkan kerugian energi yang besar. Pada analisa aliran fluida peristiwa tersebut selalu dihindari sebab menyebabkan timbulnya getaran dan panas. Selain itu apabila *massive separation* menguasai daerah saluran keluar menyebabkan terjadi *stall*, dimana aliran tidak mampu melintasi saluran tersebut.

Peningkatan *bubble separation* dipaparkan pada gambar 4-6. Hasil peningkatan terbentuknya *bubble separation* dikelompokkan menjadi dua daerah yaitu pada ketebalan FFST dari 0.5% - 2 % (keluasan I) dan 2% - 3% (keluasan II) dibandingkan dengan panjang lintasan. Pada ketebalan I memiliki peningkatan *bubble separation size* lebih landai dibandingkan dengan ketebalan II. Dimana ketebalan II memiliki peningkatan *bubble separation zone* yang lebih panjang. Hal ini sebanding dengan peningkatan Reynolds number aliran seperti yang pernah diungkapkan oleh Serry[48]. Hasil analisa ini didapatkan bahwa dimensi FFST diharuskan memiliki ketebalan lebih dari 2% dari panjang lintasan.

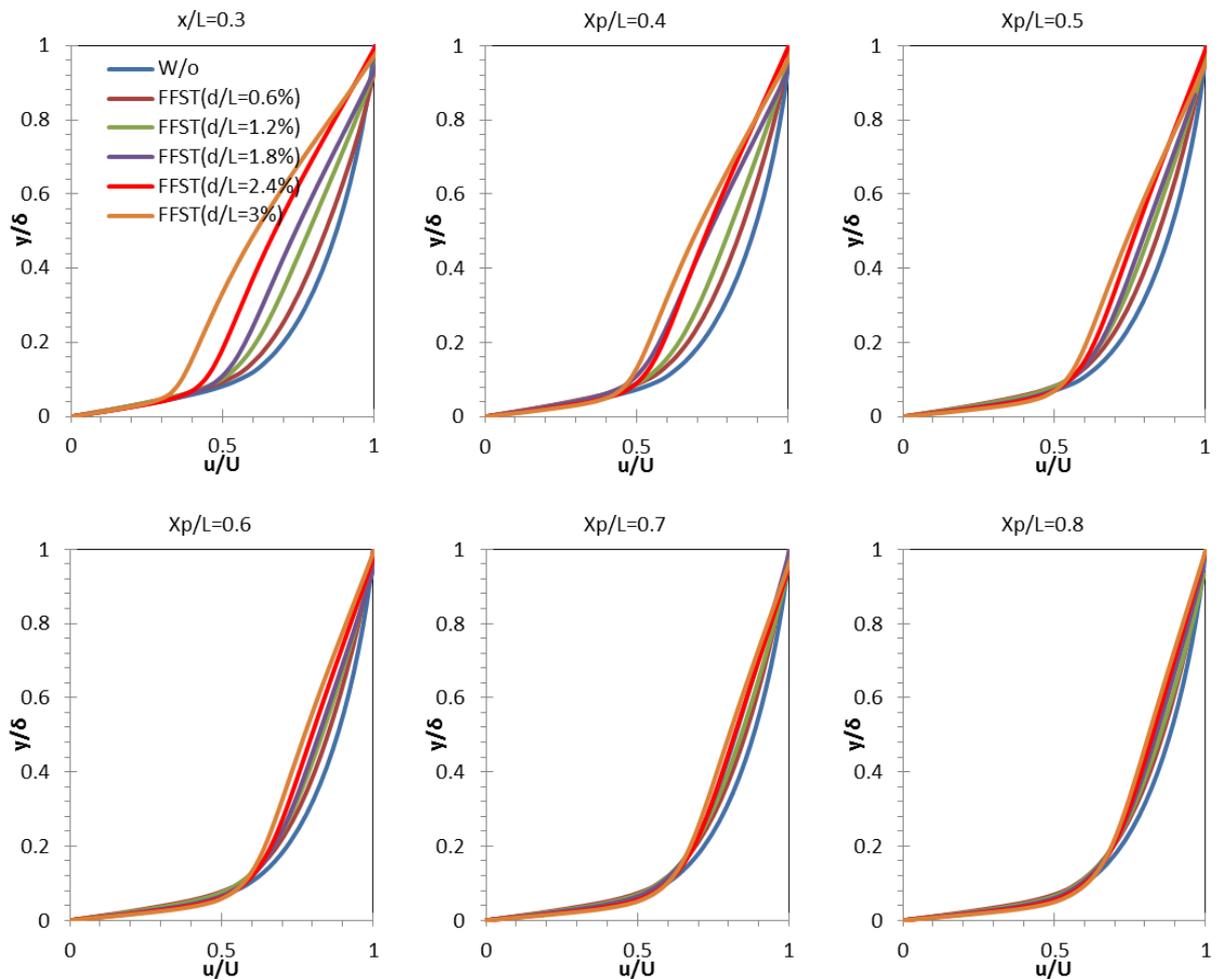


Gambar 4-5 *Streamline* aliran setiap ketebalan FFST dengan kontur kecepatan



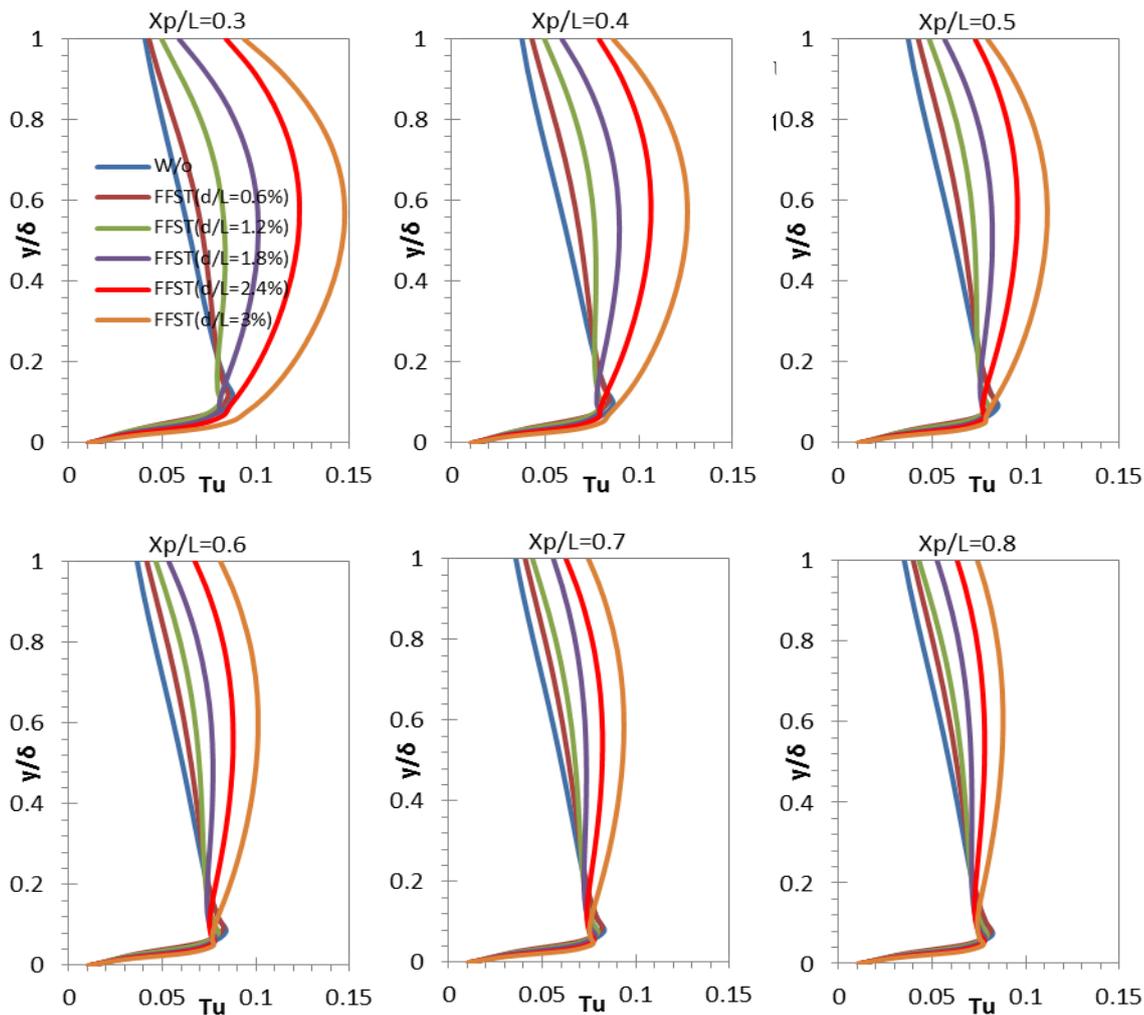
Gambar 4-6 *Bubble separation zone (length)* terhadap ketebalan FFST

Perkembangan profil kecepatan aliran setelah melintasi FFST dipaparkan pada gambar 4-7, menunjukkan bahwa kecepatan mengalami defisit energi yang besar khusus di daerah *buffer layer* hingga mendekati *turbulent layer*. Perkembangan profil kecepatan khususnya di daerah *laminar sub layer* hingga *buffer layer* semakin meningkat seiring dalam aliran perjalanan aliran menuju *downstream*. Fenomena ini menegaskan bahwa peningkatan momentum aliran di dekat bidang tumpu terjadi dampak resirkulasi aliran setelah melintasi FFST. Peningkatan momentum di dekat bidang tumpu sangat diharapkan dapat mereduksi terjadinya separasi aliran 3D. Hal ini berdasarkan teori tentang terbentuk separasi aliran 3D, yang menyatakan ketidak mampuan aliran *viscous* khususnya di dekat bidang tumpu menghadapi *adverse pressure*. Peningkatan momentum aliran *viscous* yang ditandai dengan semakin *fuller* profil kecepatan di dekat bidang tumpu membantu reduksi terjadinya separasi aliran.



Gambar 4-7 Profil Kecepatan setelah melintasi FFST

Perkembangan profil intensitas turbulensi setelah melintasi FFST dipaparkan pada gambar 4-8, hasil menunjukkan bahwa intensitas turbulensi yang sangat tinggi terjadi di daerah resirkulasi. Dampak ini menunjukkan bahwa defisit momentum yang terjadi di daerah resirkulasi terkonversi menjadi kenaikan intensitas turbulensi. Hal ini dibuktikan bahwa kenaikan intensitas turbulensi yang besar terjadi pada daerah *buffer layer* menuju *turbulent layer*, sedangkan pada daerah *laminar sublayer* intensitas turbulensi tidak mengalami perubahan. Perkembangan profil intensitas turbulensi sepanjang melintasi bidang tumpu secara berangsur-angsur semakin lemah seiring dengan peningkatan profil kecepatan. Upaya peningkatan momentum aliran *free stream* dapat dilakukan dengan menggunakan FFST yang diletakkan jauh dari bodi. Sedangkan untuk



Gambar 4-8 Profil Intensitas Turbulensi setelah melintasi FFST.

Dampak penggunaan FFST dapat ditinjau melalui *boundary layer* dalam bentuk *shape factor* dari setiap posisi pengamatan. Hasil menunjukkan bahwa bidang tumpu dengan FFST mengalami penurunan nilai *Shape factor*, sehingga diindikasikan memiliki momentum aliran yang lebih kuat di daerah *viscous*. Namun pada ketebalan FFST  $d/L=0.6\%$  dihasilkan *shape factor* yang lebih besar sehingga FFST tersebut tidak efektif dan mereduksi energi momentum aliran. Dampak penggunaan FFST semakin efektif seiring dengan peningkatan ketebalan FFST mulai dari ketebalan  $d/L=1.2\%$ , yang terindikasi dengan mengecilnya nilai dari *shape factor*. Selain itu peningkatan *shape factor* terjadi seiring dengan peningkatan panjang lintasan, hal ini terindikasi terhadap teori profil perkembangan profil kecepatan (*boundary layer teori external flow*) yang

diperlihatkan pada tabel 4-2. Dimana nilai Reynolds number besar seiring panjang lintasan yang dilalui aliran. Oleh karena itu aliran yang semakin turbulen selalu menghasilkan momentum aliran yang lebih besar.

Tabel 4-2 *Shape factor* aliran pada variasi ketebalan FFST

Dimensi (d/L)	H (Shape Factor)					
	Posisi (Xp/L)					
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
W/o	1.50	1.50	1.49	1.49	1.47	1.47
FFST(d/L=0.6%)	1.57	1.54	1.52	1.51	1.50	1.49
FFST(d/L=1.2%)	1.62	1.57	1.54	1.52	1.50	1.49
FFST(d/L=1.8%)	1.66	1.58	1.56	1.51	1.49	1.46
FFST(d/L=2.4%)	1.75	1.61	1.53	1.50	1.48	1.46
FSST(d/L=3%)	1.98	1.69	1.57	1.51	1.47	1.45

Pada Tabel 4-3 dipaparkan tekanan total yang terjadi di daerah *downstream* pada setiap ketebalan FFST. Tekanan total merupakan besar penjumlahan dari tekanan statis dan tekanan dinamik, ini merupakan indikator kandungan energi di dalam aliran fluida. Hasil numerik menunjukkan hal yang sama bahwa FFST dengan ketebalan 0.6% dari d/L mengalami defisit energi sebesar 10.8% sehingga ketebalan tersebut tidak dianjurkan untuk digunakan. Peningkatan energi yang terkandung dalam aliran semakin meningkat seiring dengan kenaikan tebal FFST. Namun hal itu selalu diimbangi dengan kebutuhan panjang lintasan untuk proses *recovery* semakin jauh.

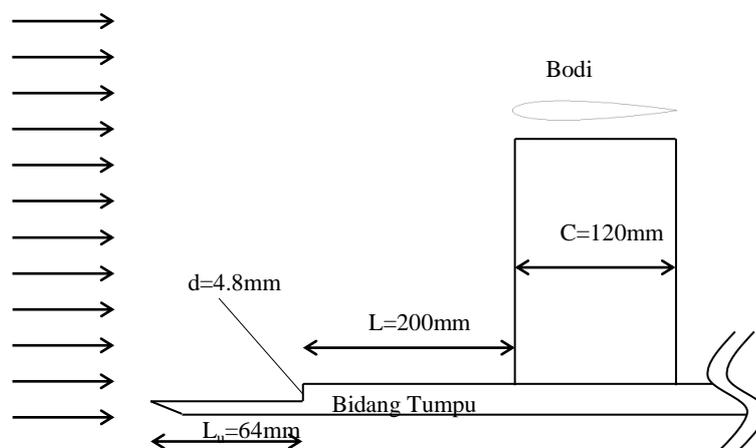
Tabel 4-3 Tekanan total pada daerah *downstream* akibat variasi ketebalan FFST

Bidang Tumpu	Tekanan Total	
	Pa	Persen
Without	137.01	0.0%
FFST(d/L=0.6%)	122.17	-10.8%
FFST(d/L=1.2%)	143.98	5.1%
FFST(d/L=1.8%)	155.61	13.6%
FFST(d/L=2.4%)	164.06	19.7%
FFST(d/L=3%)	168.91	23.3%

### 4.3 Efektivitas FFST terhadap posisi Bodi.

Hasil optimasi kajian *boundary layer* 2D didapatkan bahwa perbandingan  $d/L_u = 0.075$  atau  $d/L = 2.4\%$ . Apabila ketebalan FFST ditentukan sebesar 4.8mm didapatkan posisi FFST dari inlet sebesar  $L_u = 4.8/0.075$  atau 64mm dan posisi bodi dari FFST  $L = 4.8/0.024$  atau 200mm. Hasil optimasi tersebut perlu untuk dibukti kembali secara numerik dengan model 3D melibat bodi tunggal. Domain analisa numerik dipaparkan pada gambar 4-9, hasil secara 2D menunjukkan bahwa posisi tersebut merupakan kondisi paling ideal.

Aplikasi FFST untuk mereduksi terjadinya aliran sekunder biasanya posisi FFST jauh dari bodi. Hal ini disebabkan aliran yang dihasilkan memiliki momentum aliran yang kuat, namun Wu dan Zhong[46] melakukan yang berbeda. Wu dan Zhong mengaplikasikan FFST tepat di dekat *leading edge*, dimana terbentuk aliran dengan intensitas turbulensi yang maksimal. Oleh karena itu diperlukan upaya untuk mengeksplorasi perbedaan dua hal tersebut.



Gambar 4-9 Domain Penempatan Bodi dan FFST

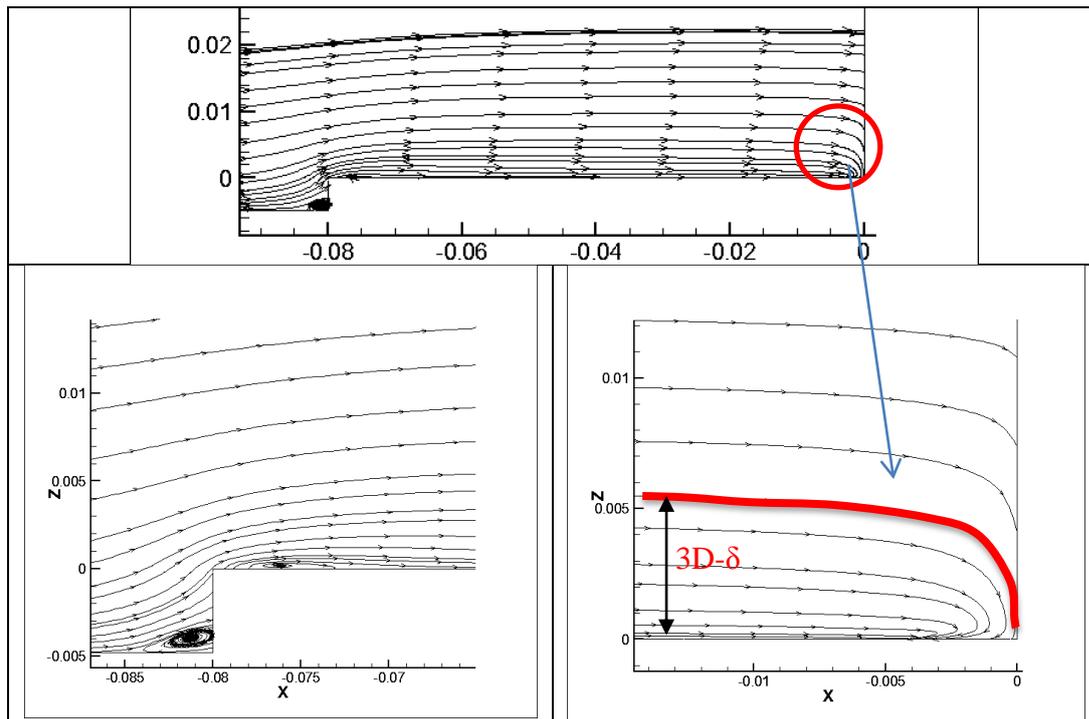
Dari analisa *boundary layer* 2D didapatkan bahwa karakteristik aliran di bidang tumpu, apabila bodi diletakkan dekat dengan daerah resirkulasi menghasilkan intensitas turbulensi yang tinggi namun momentum aliran lemah. Sedangkan posisi bodi semakin jauh dari FFST menghasilkan momentum aliran kuat dan intensitas turbulensi yang rendah. Dua pernyataan ini menjelaskan bahwa energi yang hilang menjadi bentuk energi yang lain. Oleh karena itu

dibutuhkan penelitian yang membandingkan dampak peningkatan momentum dan intensitas turbulensi serta teori tentang ungkapan revolusi energi tersebut.

Fenomena ini dijelaskan pada gambar 4.10 perjalanan elemen fluida bagian *center* saat bertemu dengan FFST dan *leading edge*. Energi momentum yang dihasilkan fluida dikelompok menjadi dua bagian yaitu energi kinetik elemen kecepatan fluida ( $u,v,w$ ) dan energi fluktuasi kecepatan aliran fluida ( $u',v',w'$ ). TKE yang tidak terkonversi kembali menjadi momentum aliran di dalam boundary layer. Fenomena ini merupakan adanya TKE terkonversi menjadi akselerasi partikel. Hal ini disebabkan nilai TKE selalu berfluktuasi sepanjang waktu sehingga menghasil akselerasi dan meningkatkan kecepatan partikel.

Kecepatan partikel ini yang menghasilkan energi momentum di dalam *boundary layer*. Hal ini disebabkan oleh peristiwa *bubble separation* yang selalu membangkitkan *vortex*, dimana terjadi meleburan energi antara elemen fluida. Peleburan energi tersebut merupakan peristiwa terjadinya menyeteraan energi antara elemen fluida, dimana elemen fluida yang memiliki energi yang tinggi melepaskan sebagian energinya kepada elemen fluida yang lebih kecil. Akibatnya elemen fluida di daerah *boundary layer* selalu memiliki energi yang lebih besar berupa momentum dan TKE.

Elemen fluida pada bagian *center* ketika bertemu dengan *leading edge* terbagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama adalah kelompok elemen fluida yang mampu menyentuh permukaan *leading edge*, kelompok ini merupakan daerah aliran *inviscid flow*. Kejadian pada daerah tersebut merupakan fenomena aliran 2D seperti yang terjadi pada daerah *midspan*, dimana peristiwa kejadian aliran 3D merupakan interaksi dua aliran viscous. Sedangkan pada daerah aliran 2D hanya terhadap satu aliran viscous di sekitar kontur bodi. Elemen fluida akhir yang mampu menyentuh *leading edge* disebut batas elemen fluida yang masuk menuju formasi *horseshoe vortex*. Batas tersebut apabila diukur dengan acuan bidang tumpu disebut *3D-Disturbance thicknes* ( $3D-\delta$ ) seperti gambar 4-10.

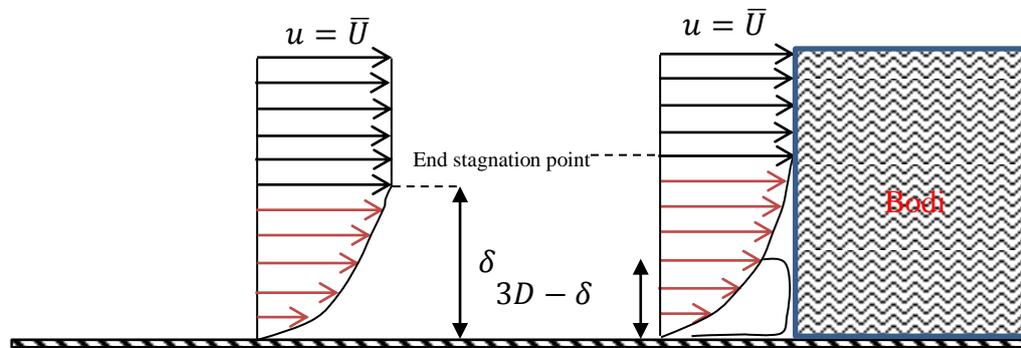


Gambar 4-10 Streamline *centerline* pada daerah *upstream*.

Pada gambar 4-11 diperlihatkan profil kecepatan saat mendekati *leading edge*. Sebelum menyentuh *leading edge*, profil kecepatan aliran seperti saat aliran internal melintasi bidang tumpu. Aliran terbagi oleh *boundary layer* menjadi dua daerah yaitu aliran *viscous* dan *inviscid*. Batasan tersebut dinyatakan pada saat kecepatan lokal aliran mencapai  $0.99 \bar{U}$  (kecepatan *freestream*), dimana tebal dari lapisan batas ini disebut sebagai *disturbance thickness* ( $\delta$ ). Ketika aliran menyentuh *leading edge* maka terjadi interaksi dua aliran *viscous*, sehingga terjadi aliran sekunder. Penelitian ini mengungkapkan dua batas aliran, salah satunya batas aliran *viscous* dan *inviscid* yang dinyatakan dengan *end stagnation point* (ESP). Stagnation point selalu dinyatakan dimana aliran memiliki nilai *pressure coefficient* sebesar 1, kondisi tersebut aliran tidak mengalami kerugian energi dari *freestream*.

Semua aliran *inviscid* selalu mampu menyentuh *leading edge* sedangkan aliran *viscous* hanya beberapa aliran yang mampu menyentuh *leading edge*. Oleh karena itu batas aliran *viscous* yang mampu menyentuh *leading edge* diilustrasikan dengan  $3D$ - *disturbance thickness* ( $3D - \delta$ ). Pada aliran sekunder merupakan interaksi aliran *viscous* sehingga dua parameter (ESP dan  $3D - \delta$ )

tersebut dapat menjadi penentu terbentuknya aliran sekunder. Fenomena tersebut dapat dibandingkan antara aliran tanpa dan dengan FFST terhadap terbentuk aliran sekunder.



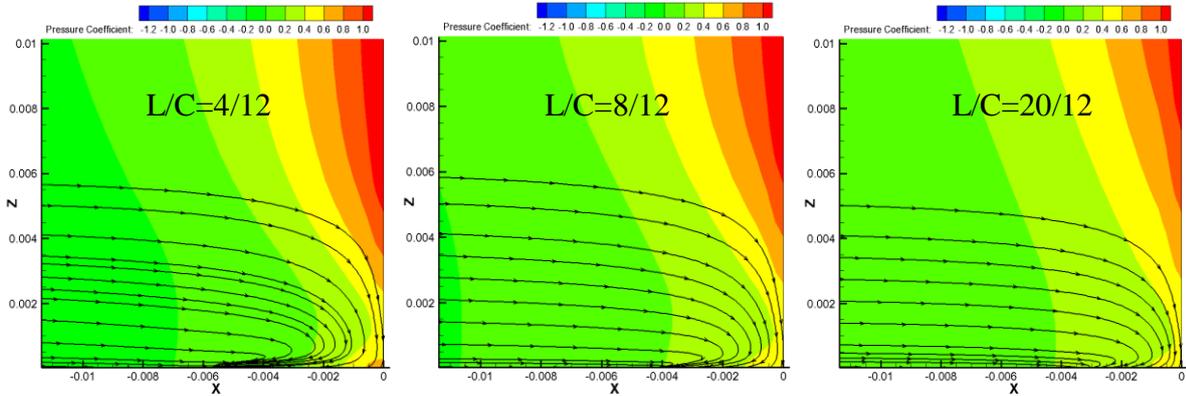
Gambar 4-11 Profil kecepatan saat di *leading edge*.

Penelitian ini dilanjutkan dengan menganalisa dampak perubahan posisi FFST ( $L$ ) terhadap karakteristik aliran 3D. Posisi FFST divariasikan berdasarkan bilangan tidak berdimensi perbandingan antara posisi FFST terhadap bodi dengan panjang *chord* bodi kontur bodi  $L/C$ . Kemudian struktur aliran dianalisa berdasarkan kontur kecepatan dan tekanan kemudian diperkuat terhadap topologi aliran sekunder.

Bagian aliran yang lain merupakan kelompok daerah aliran viscous, yang berada di dekat bidang tumpu. Kelompok aliran ini merupakan kelompok elemen fluida yang tidak mampu menyentuh *leading edge*. Akibat posisi  $3D-\delta$  yang semakin jauh maka daerah *fluida* yang masuk menuju formasi *horseshoe vortex* semakin luas, sehingga aliran dengan FFST memiliki komponen energi aliran yang lebih banyak. Pergerakan kelompok aliran ini bergerak menuju bidang tumpu sehingga disebut sebagai *attached flow*. *Attached flow* ini bergerak melawan aliran yang berasal dari *upstream*, pertemuan dua *attached flow* menyebabkan terjadinya *forward saddle point*(FSP).

Selain penambahan FFST, posisi FFST pada bodi atau objek mempengaruhi posisi  $3D-\delta$  yang ditunjukkan pada gambar 4-12. Pada FFST terhadap berjarak  $L/C = 4/12$  dan  $8/12$  tebal dari  $3D-\delta$  antara 5.6mm-5.8mm sedangkan pada jarak  $L/C = 20/12$  sebesar 0.5mm. Hal ini menunjukkan bahwa tebal  $3D-\delta$  terbesar terjadi pada  $L/C = 8/12$  sebesar 5.8mm. Fenomena ini diprediksi memiliki elemen fluida yang lebih luas sehingga diprediksi lebih

mampu mereduksi terjadi aliran sekunder. Apabila posisi FFST terlalu jauh didapatkan posisi  $3D-\delta$  semakin kecil dan mendekati bidang tumpu yang diprediksi memiliki elemen fluida yang semakin kecil.

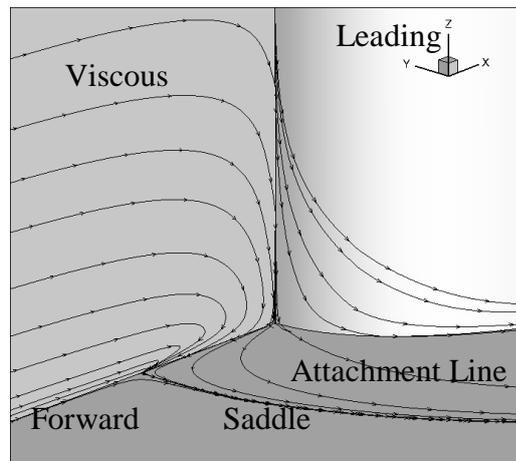


Gambar 4-12 Posisi  $3D$ - *Disturbance Thicknes* dan kontur *Pressure Coefficient*.

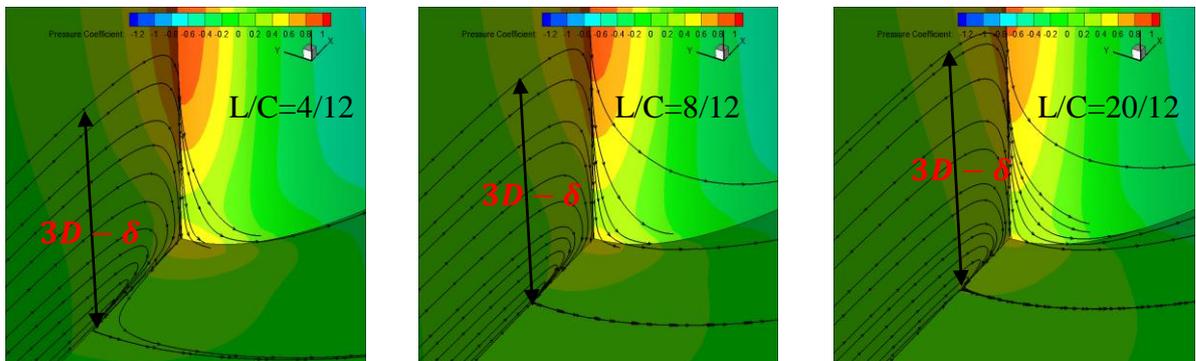
Pada gambar 4-13 ditunjukkan posisi  $3D-\delta$  dan distribusi tekanan tampak  $3D$ , dimana semua aliran masuk dalam batas  $3D-\delta$  bergerak masuk menuju formasi *horseshoe vortex*. Sedangkan posisi *end stagnation point* (ESP) semakin menjauhi bidang tumpu, dimana definisi batas aliran memiliki *pressure coefficient* bernilai 1. Definisi ini merupakan batasan aliran *viscous* dan *inviscid* disebut *disturbance thickness* atau *boundary layer thickness*. Sedangkan untuk  $3D$ -*disturbance thickness* selalu berada di dalam aliran *viscous*, jika terjadi interaksi dua aliran *viscous* maka terbentuk aliran sekunder atau aliran  $3D$ . ESP selalu indetik dengan teori perkembangan *boundary layer* pada *internal flow*, dimana semakin panjang lintasan aliran maka *disturbance thickness* semakin tebal.

Dampak daerah aliran yang semakin luas akibat penambahan FFST menyebabkan intensitas aliran *attached flow* dari *leading edge* semakin kuat, sehingga posisi FSP bergerak menjauhi bodi kontur. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4-11, dimana FSP selalu menghasilkan dua  $3D$  *separation line* seperti yang diungkap oleh peneliti aliran sekunder terdahulu.  $3D$  *separation line* tersebut menjadi dua yaitu menuju *lower* dan *upper side*, garis tersebut merupakan garis batas terjadi aliran sekunder atau aliran *separation 3D*. Sehingga semua elemen fluida yang berada di dalam garis  $3D$  *separation line* disebut sebagai aliran dalam formasi aliran sekunder yang berbentuk *horseshoe vortex*.

*Attached flow* yang masuk di dalam formasi *horseshoe vortex* disebut sebagai *attachment line*, hal ini digunakan untuk membedakan *attached flow* yang berada di dalam formasi *horseshoe vortex*. Kedua *attachment line upper* dan *lower side* merupakan penentu atau penyebab terjadi *vortex* di dalam formasi *horseshoe vortex*. Penambahan FFST menyebabkan elemen *attachment line upper* dan *lower side* memiliki energi yang lebih besar yang terdiri dari momentum dan *turbulent kinetic energy* (TKE).



(a)



(b)

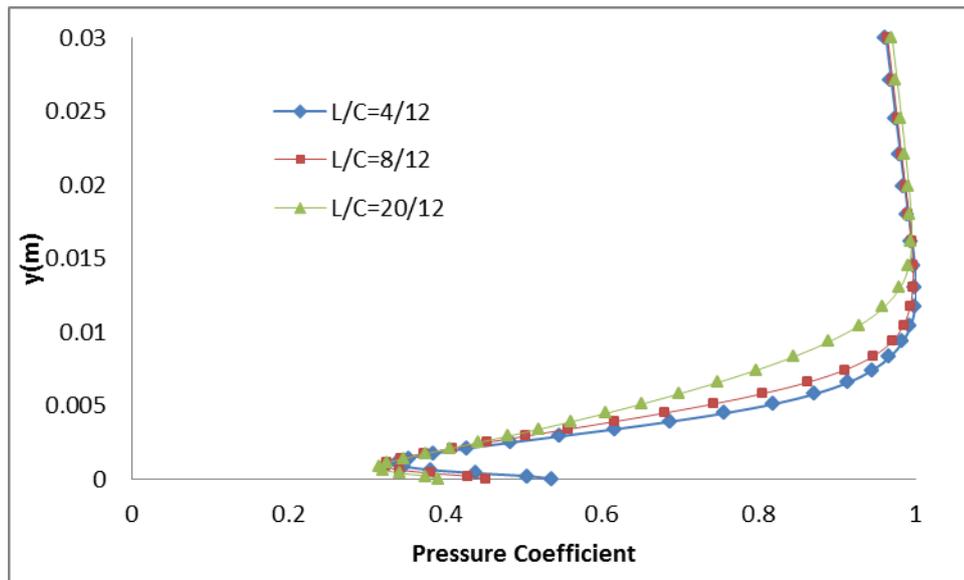
Gambar 4-13 Topologi aliran 3D di *leading edge* (a).Detail aliran sekunder. (b). Perbandingan Posisi *3D-Disturbance Thickness* dan kontur Pressure Coefficient.

Penelitian tentang aliran sekunder selalu dimulai dari *forward saddle point*, namun posisinya sangat tergantung dari *3D-Disturbance thickness*. Ketebalan gangguan aliran 3D ini didefinisikan batas aliran yang mampu menyentuh *leading edge* atau bodi (objek). Pada penelitian sebelumnya

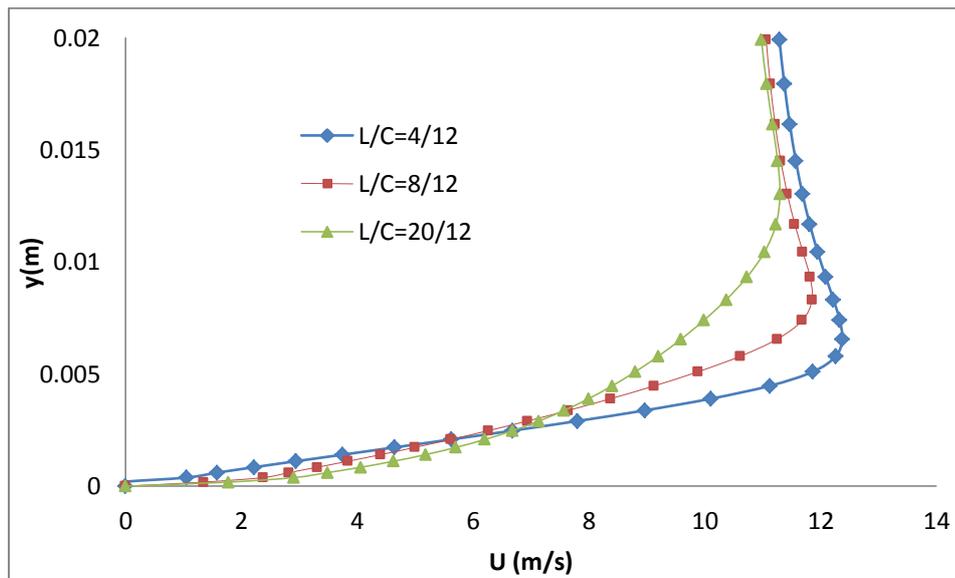
fenomena ini tidak pernah tampak dibahas tentang terbentuk aliran sekunder, sebab penambahan FFST berdampak terhadap posisi *3D-Disturbance thickness*.

Evaluasi karakteristik aliran dilakukan pada garis posisi *centre line* dimana  $Y=0$  dan  $X=-5$  mm sebelum menyentuh *leading edge*. Pada gambar 4-14 dipaparkan profil nilai *pressure coefficient*, dimana FFST dengan jarak 40mm selalu menunjukkan nilai yang semakin besar hal ini memperlihatkan bahwa tekanan pada daerah *leading edge* lebih tinggi. *End stagnation point* pada FFST  $L/C=4/12$  berada pada  $y=0.012$  m sedangkan pada  $L/C=8/12$   $y=0.014$ m, jika FFST semakin jauh dari bodi  $L/C=20/12$  didapatkan tinggi ESP  $y=0.016$  m. Hal ini menandakan bahwa semakin jauh posisi FFST maka *disturbance thickness* semakin tebal seperti ilustrasi posisi ESP. Nilai *Pressure coefficient* menunjukkan bahwa distribusi tekanan di daerah yang semakin dekat dengan FFST semakin besar. ESP merupakan pusat aliran yang mengalir di dalam aliran sekunder melalui *attachment line*.

Selain itu pada gambar 4-15 dipaparkan distribusi kecepatan pada garis evaluasi sama dengan evaluasi *Pressure coefficient*. Pada FFST dengan jarak  $L/C=4/12$  kecepatan aliran di daerah inviscid memiliki momentum yang lebih besar dibandingkan dengan posisi yang lainnya. Sedangkan FFST pada jarak  $L/C=8/12$  dan  $20/12$  memiliki nilai yang sama besar. Boundary layer khusus daerah *laminar sub layer*, kecepatan pada  $L/C=4/12$  memiliki kecepatan yang lebih kecil. Padahal terjadinya  $3D-\delta$  terjadi pada  $y=\pm 0.006$ mm sehingga aliran pada FFST  $4/12$  tidak dapat memperkuat aliran yang masuk menuju formasi *horseshoe vortex*. Oleh karena itu aliran dengan  $L/C=8/12$  dan  $20/12$  diprediksi mampu mereduksi aliran sekunder lebih baik, namun pernyataan ini masih belum kuat sebab masih ada bentuk energi. Salah satu energi yang dapat mereduksi terjadinya aliran sekunder adalah *Turbulent Kinetic Energy* (TKE).



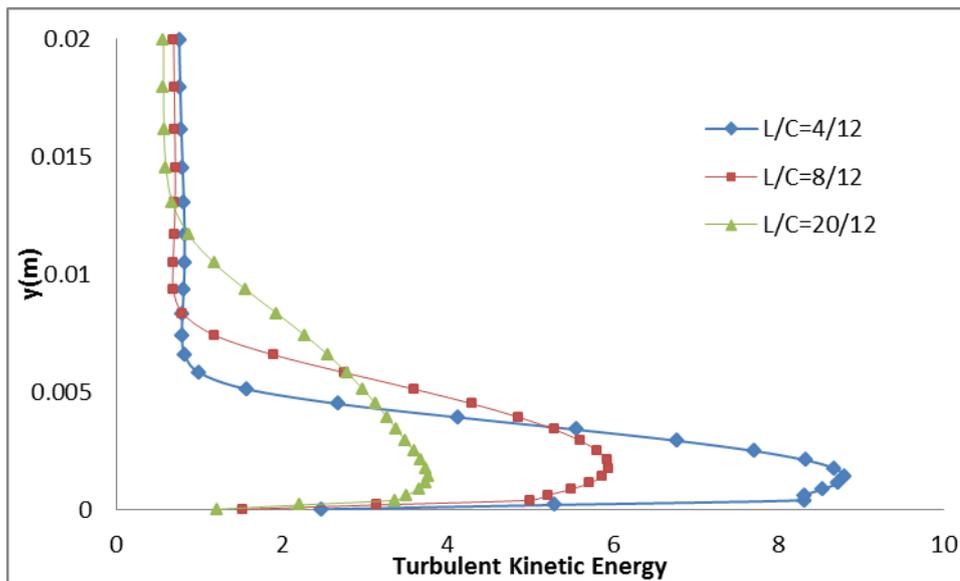
Gambar 4-14 Distribusi Tekanan Saat di *Leading edge*.



Gambar 4-15 Distribusi Kecepatan Saat di *Leading edge*.

Pada gambar 4-16 dipaparkan profil TKE yang terjadi pada aliran sebelum menyentuh *leading edge*. Sesuai dengan prediksi perkembangan intensitas turbulensi pada 2D, TKE pada FFST yang lebih dekat dengan *leading edge* menghasilkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan posisi yang lebih jauh. Namun batas ketinggian TKE yang kuat semakin lebih dekat dengan bidang tumpu. Oleh karena itu peningkatan TKE pada FFST L/C= 4/12 memiliki

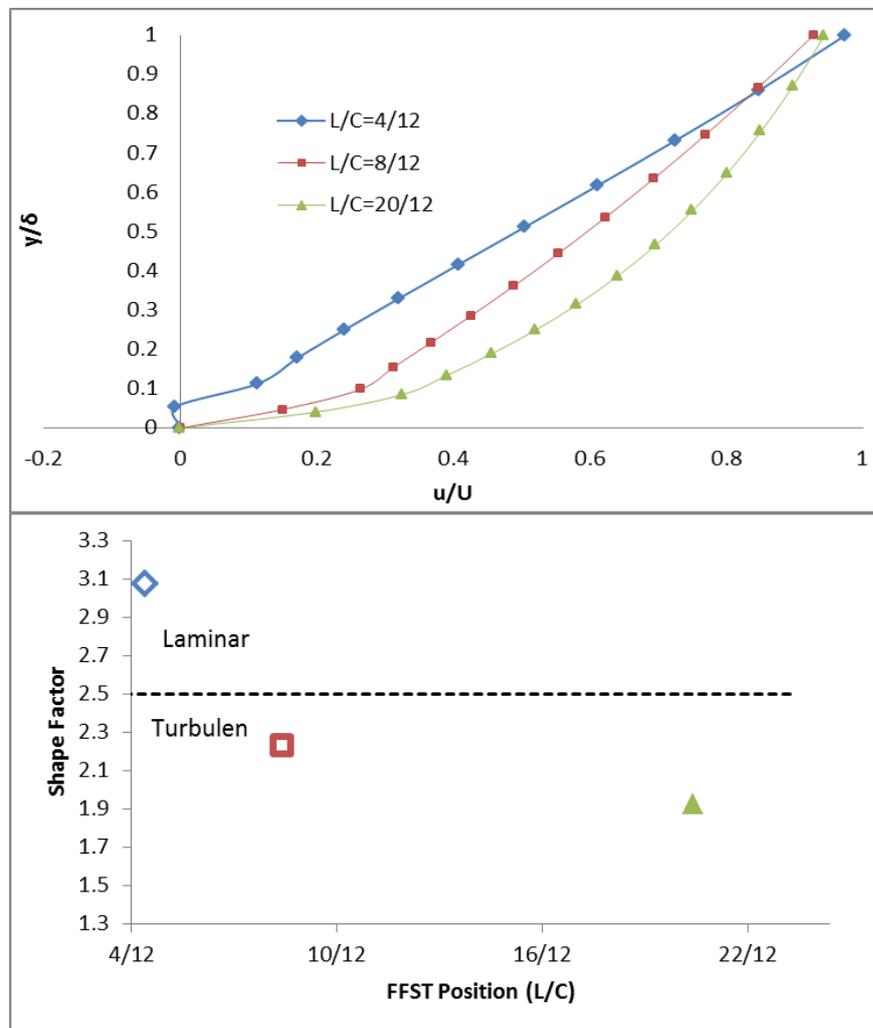
maksimum TKE  $8.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$  namun batas ketinggiannya sebesar  $0.003 \text{ m}$  sehingga diprediksi kurang mampu mereduksi aliran sekunder. Sedangkan untuk FFST  $L/C=8/12$  memiliki nilai TKE maksimum  $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$  dan batas ketinggian TKE kuat  $0.008 \text{ m}$  diprediksi mampu mereduksi aliran sekunder lebih baik dengan FFST  $L/C=4/12$ . Apabila dibandingkan dengan FFST  $L/C=20/12$  memiliki nilai TKE yang sangat kecil sebesar  $3.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$  walaupun batasan ketinggian TKE kuat berada pada  $0.013 \text{ m}$ .



Gambar 4-16 Distribusi *Turbulence Kinetic Energy* Saat di *Leading edge*.

Perbandingan profil kecepatan pada aliran tidak dapat dibandingkan dengan parameter berdimensi sehingga diperlukan evaluasi *boundary layer* seperti aliran 2D seperti yang dipaparkan pada gambar 4-17. Profil aliran pada FFST yang sangat dekat dengan *leading edge* yang sangat dekat memiliki profil kecepatan yang cenderung mendekati aliran laminar. Hal ini dibuktikan pada nilai *shape factor* dimana FFST dengan  $L/C=4/12$  memiliki nilai lebih dari 2.5 dimana merupakan karakteristik aliran laminar. Aliran pada posisi  $L/C=4/12$  memiliki nilai 3.1 merupakan klasifikasi aliran laminar yang mengalami separasi, sehingga posisi tersebut masih dalam lingkup *bubble separation*. FFST pada jarak  $L/C=8/12$  tepat berada pada aliran turbulen, sedangkan posisi FFST semakin jauh memiliki nilai *shape factor* yang semakin kecil menunjukkan aliran semakin turbulen. Tinjauan ini hanya dilakukan pada salah satu bentuk energi aliran,

namun perlu diperhatikan energi TKE yang semakin jauh memiliki nilai lebih kecil. Bentuk dua energi tersebut merupakan faktor yang menentukan terbentuknya aliran sekunder.



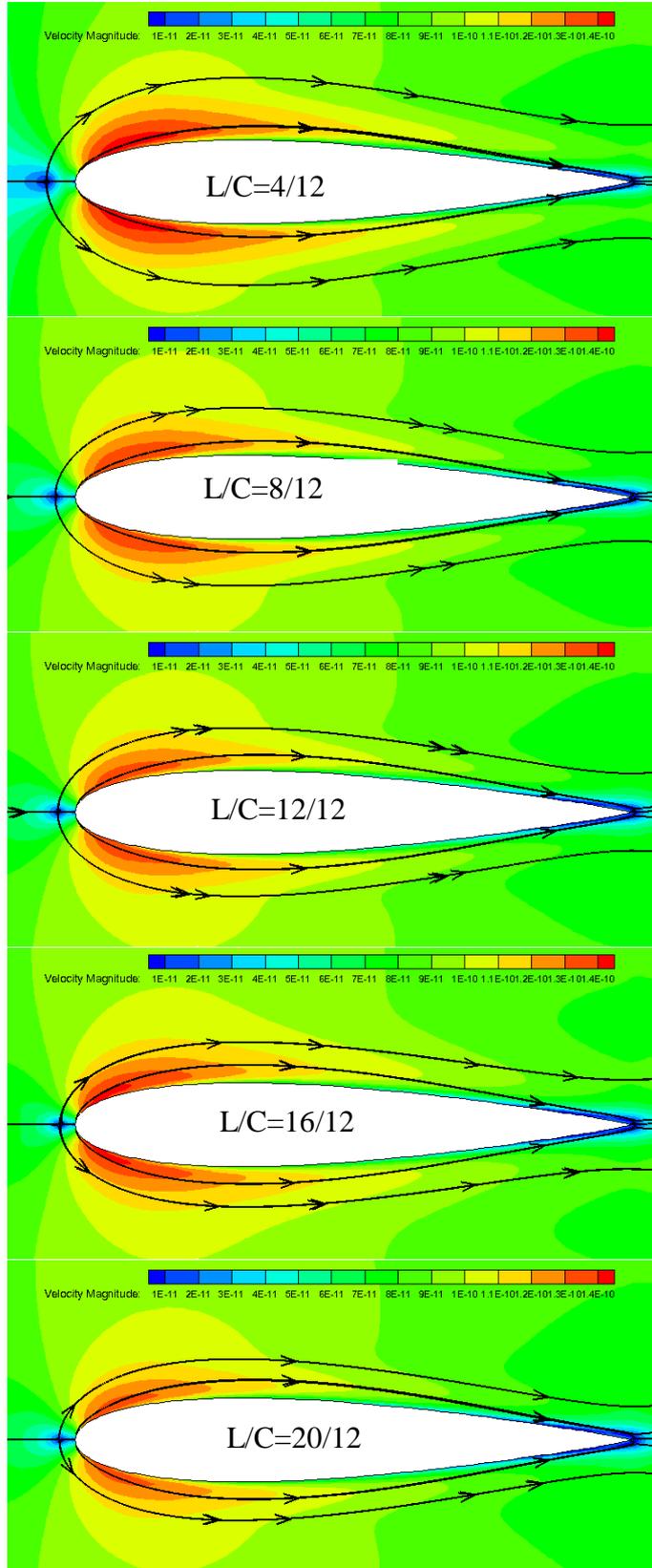
Gambar 4-17 Distribusi *Turbulence Kinetic Energy* Saat di *Leading edge*(bilangan tidak dimensional).

Karakteristik aliran dengan intensitas turbulensi tinggi terjadi di daerah dekat daerah resirkulasi, dimana semakin jauh meninggalkan FFST semakin lemah. Hal ini ditunjukkan intensitas turbulensi aliran yang tinggi sehingga menyebabkan garis separasi 3D semakin membuka dan menjauhi kontur bodi. Hasil eksplorasi karakteristik aliran 3D tersebut dipaparkan pada gambar 4-18 pada posisi  $L/C=4/12$  sampai dengan  $L/C=20/12$ . Pemulihan momentum aliran

terbesar terjadi di posisi jauh dari daerah sirkulasi, sehingga momentum aliran semakin kuat berdampak terhadap *3D separation line* lebih berimpit dan tertutup dengan bodi kontur bodi. Sedangkan *3D separation line* lebih membuka dan menjauhi bodi terjadi pada posisi FFST dekat dengan daerah resirkulasi aliran.

Penambahan FFST menyebabkan reduksi kecepatan yang sangat drastis yang diimbangi dengan peningkatan intensitas turbulensi. Fenomena ini menyebabkan perubahan momentum aliran di dalam *boundary layer* menjadi TKE terjadinya *bubble separation*. Aliran saat mendekati *leading edge* penambahan FFST menyebabkan kecepatan semakin rendah. Hal ini berdampak terhadap salah satu faktor yang menyebabkan posisi *forward saddle point* semakin menjauh dari *leading edge*. Namun apabila dilanjutkan evaluasi pada daerah *trailing edge* penambahan FFST menyebabkan peningkatan kecepatan di daerah tersebut. Daerah ini merupakan tempat muara aliran sekunder secara 3D yang menimbulkan *wake*. Oleh karena itu perubahan energi tersebut menyebabkan aliran fluida memiliki cadangan energi yang diperlukan pada saat berada pada daerah *trailing edge*.

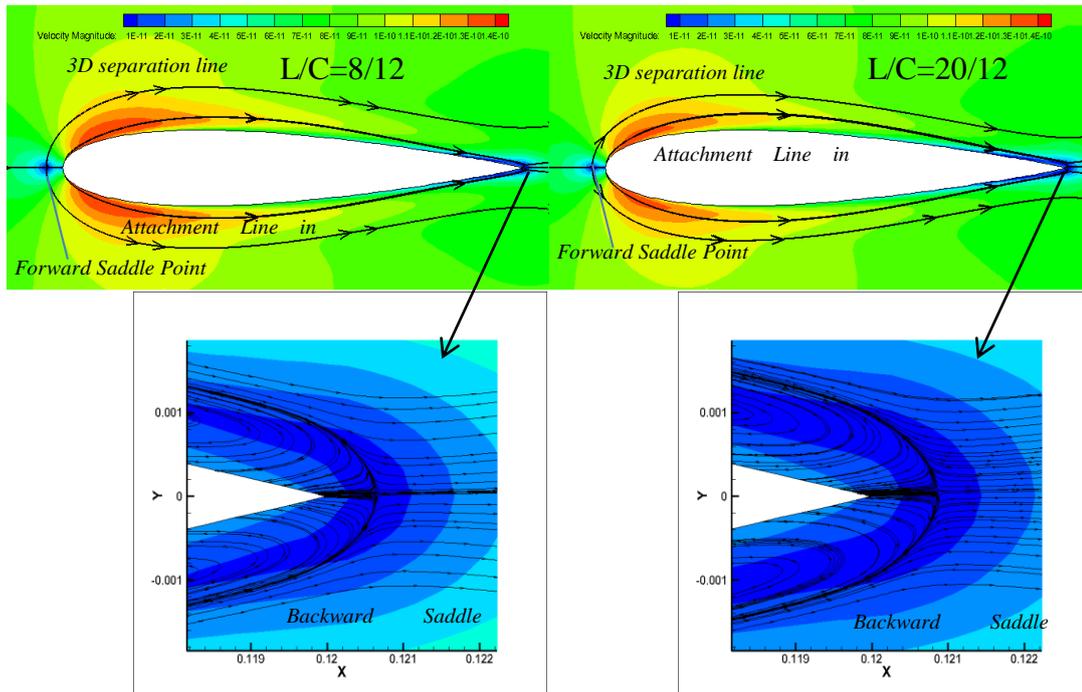
Hasil peningkatan panjang jarak posisi bodi terhadap FFST menyebabkan perubahan posisi *forward saddle point*. Perubahan ini berdampak terhadap terbentuk *3D separation line*, apabila momentum aliran rendah maka *3D separation line* semakin membuka dan menjauhi kontur bodi sedangkan pada aliran yang berasal dari *upstream* dengan momentum aliran yang tinggi berlaku sebaliknya. Pada *post-processing* menggunakan program komersial TECPLOT topologi aliran yang dilakukan berdasarkan persamaan mempersentasikan bahwa **“corner wake penyebab blockage terjadi akibat interaksi beberapa attachment line yang berasal dari 3D-Disturbance thickness dan End Stagnation Point di leading edge”**. Pada teori sebelumnya Mirmanto dan Sasongko[4] selalu menyatakan bahwa *blockage* sangat ditentukan oleh haluan *3D separation line*, hal ini tidak berlaku pada aliran yang memiliki intensitas turbulensi yang lebih tinggi.



Gambar 4-18 Topologi aliran akibat perubahan posisi bodi.

Pada ESP merupakan sumber terbentuk *attachment line*, yang merupakan aliran membentuk *forward saddle point* (FSP). Titik pertemuan ini merupakan batas terbentuk *skewed boundary layer*, penentu terbentuk *3D separation line* atau disebut sebagai *dividing streamline*. Peningkatan momentum pada aliran *viscous* menyebabkan desakan aliran dari *upstream* semakin kuat sehingga mampu mendominasi aliran bergerak menuju *downstream*. Akibatnya dominasi aliran menuju *downstream* berdampak terhadap pergeseran FSP semakin mendekati *leading edge*. Hal ini mengindikasikan aliran sangat dekat dengan daerah *resirkulasi* sangat rentan terhadap gangguan aliran sehingga aliran sangat rawan terseparasi.

Pada gambar 4-19 dipaparkan posisi *forward saddle point* (FSP) dengan indikasi kontur kecepatan bernilai rendah berwarna biru, semakin mendekati *leading edge* ketika aliran memiliki momentum aliran yang kuat sesuai dengan Sasongko dan Mirmanto [35]. Namun pada aliran *viscous* dengan intensitas turbulensi tinggi berlalu sebaliknya, FSP bergerak di *upstream* dan menjauhi *leading edge* disebabkan desakan aliran yang lebih kuat dari dalam formasi *horseshoe vortex* akibat semakin besar  $3D-\delta$ . Kecepatan tinggi diindikasikan dengan kontur berwarna merah lebih terpusat di dekat bodi pada aliran dengan intensitas turbulensi tinggi. Oleh karena itu aliran dengan intensitas turbulensi tinggi mampu berperan dalam upaya mereduksi penyumbatan aliran di daerah *corner wake*. ESP merupakan sumber *attachment line* yang masuk di dalam formasi *horseshoe vortex* sedangkan  $3D-\delta$  merupakan batas aliran *viscous* yang tidak mampu menyentuh *leading edge* dan bergerak menjadi *3D-separation line*.



Gambar 4-19 Kontur kecepatan dan topologi aliran 3D.

Ketika *attachment line* yang berasal dari ESP bergerak menelusuri bodi di dalam formasi *horseshoe vortex* memiliki komponen menuju aksial lebih kuat. Hal ini disebabkan oleh posisi  $3D-\delta$  dan ESP yang semakin jauh dari bidang tumpu memiliki elemen fluida yang semakin besar masuk dalam formasi *horseshoe vortex*. Oleh sebab itu aliran tersebut memiliki kandungan energi yang lebih besar. Selain itu peningkatan intensitas turbulensi akibat penambahan FFST, menyebabkan terjadinya konversi energi menjadi kecepatan secara berangsur-angsur di daerah *downstream* semakin memperkuat *attachment line* tersebut. *Attachment line* pada bidang tumpu dengan FFST semakin berimpit dengan bodi dan tidak mudah terintimidasi menjadi *corner wake* yang menyebabkan *blockage*.

*Blockage* aliran di daerah *downstream* dapat dipresentasikan dalam paparan kerugian energi pada arah aksial. Berdasarkan persamaan kekekalan energi menggunakan penjumlahan energi tekanan dan energi kinetik, sedangkan untuk energi potensial diabaikan. Parameter ini digunakan dengan tekanan total yang merupakan penjumlahan dari tekanan statis dan tekanan dinamis.

Persamaan kerugian tekanan total arah aksial berdasarkan persamaan dibawah ini :

$$\text{Axial total pressure loss coefficient} = \xi_{axial} = \frac{P_{t,\infty} - P_{t,c}}{\frac{1}{2} \rho \bar{V}_{x\infty}^2}$$

Hasil simulasi terjadi kerugian energi pada daerah *downstream* dipresentasikan pada gambar 4-20, dimana daerah warna biru yang mengindikasikan daerah bebas dari penyumbatan lebih menguasai daerah *downstream*. Selain itu khusus di daerah *corner*, *blockage* aliran semakin kecil dibandingkan dengan FFST jauh dari bodi. Hal ini merupakan teori baru, **bahwa aliran dengan *Flucluating Component* Kecepatan yang tinggi lebih efektif mereduksi terjadinya *blockage* pada daerah *corner*, Jika dibandingkan dengan memperkuat *Mean Flow***. Peristiwa ini memberikan informasi bahwa momentum aliran yang tinggi dibutuhkan di dalam formasi *horseshoe vortex*, pada aliran daerah *adverse pressure* yaitu setelah *thicknes* maksimum bodi. Peningkatan momentum yang tepat di daerah tersebut terjadi pada posisi FFST terhadap bodi  $L/C=8/12$ . Aliran saat melintasi *leading edge* diharapkan memiliki momentum yang lemah dan *attachment line* yang berasal dari ESP diharapkan lebih kuat, akibatnya posisi FSP semakin menjauhi *leading edge*. Hal ini disebabkan oleh daerah tersebut kosong lebih luas, akibat *3D separation line* semakin membuka dan menjauh dari kontur bodi.

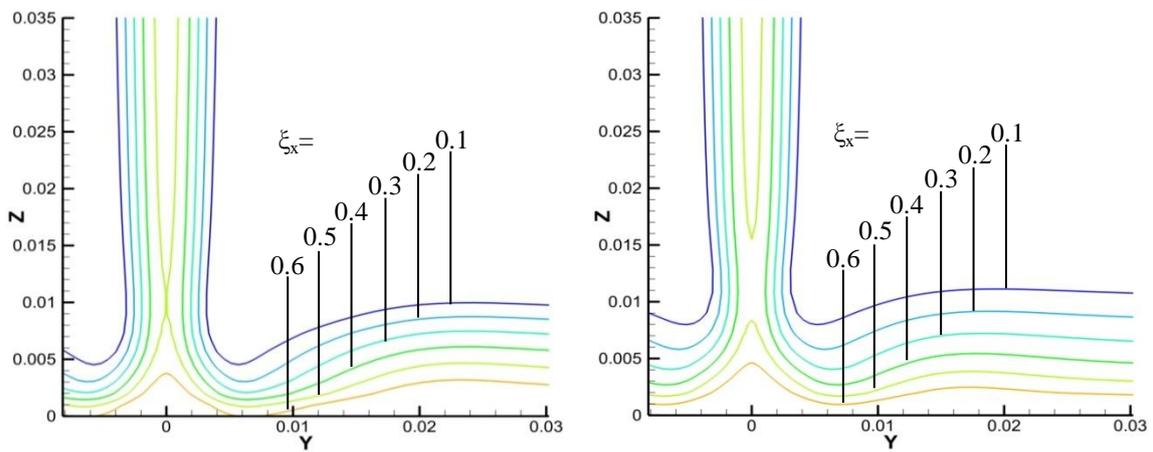
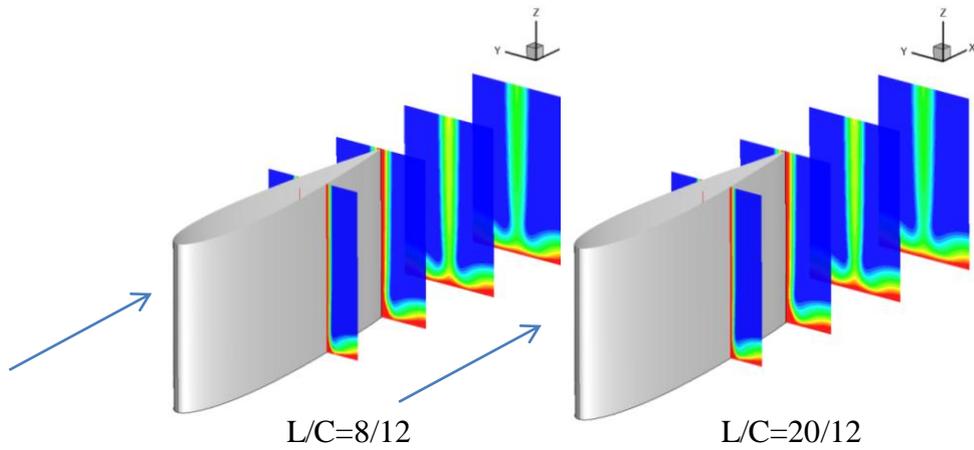
Peristiwa momentum aliran besar di dalam formasi *horseshoe vortex* disebabkan oleh konversi energi TKE menjadi momentum secara berangsur-angsur sepanjang lintasan *attachment line*. Sedangkan kenaikan momentum di awal formasi *horseshoe vortex* kurang efektif dan tidak terlalu tepat digunakan mereduksi *blockage* di dalam formasi *horseshoe vortex*, sebab momentum sekuat apapun tidak mampu menembus formasi *3D separation line* dari arah *upstream*.

Analisa efektifitas FFST dalam mereduksi terjadi kerugian energi ditunjukkan pada gambar 4-21. Hasil efektifitas FFST terbaik secara kuantitatif terjadi pada posisi  $X/C=12/12$  atau 120 mm, namun pada  $L/C=8/12$  atau 80 mm dihasilkan hasil yang mendekati sama. Kerugian energi yang terjadi seiring dengan menjauhnya posisi bodi dengan FFST semakin bertambah sehingga

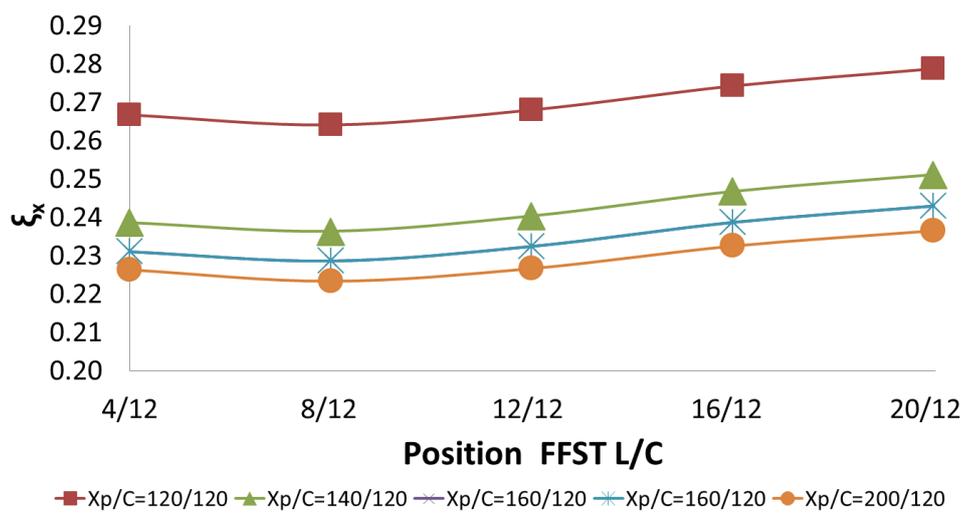
berdampak terhadap penurunan efektifitas FFST. Namun posisi FFST yang sangat dekat terhadap bodi, yaitu pada  $L/C=4/12$  ditunjukkan kandungan energi yang kecil dibandingkan dengan  $L/C=8/12$ . Hal ini disebabkan oleh posisi tersebut aliran masih berada di daerah *reattachment flow* (resirkulasi) dibandingkan dengan posisi lainnya, sehingga aliran masih *unstable* dan peristiwa *recovery* aliran terlambat. Oleh karena itu aplikasi Wu dan Zhong [49] meletakkan tepat pada *leading edge* bukan posisi yang paling efektif, sedangkan menurut hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa posisi FFST yang terbaik diletakkan pada  $L/C=8/12$  dari panjang *chord length* atau 80mm. Apabila FFST semakin dekat maka aliran masih belum pulih sempurna atau masih pada kondisi laminar, sedangkan pada FFST yang sangat jauh dari bodi dihasilkan 3D-*Disturbance thickness* yang semakin tipis sehingga elemen fluida yang masuk menuju *horseshoe vortex* semakin sedikit. Apabila elemen fluida semakin sedikit maka penyumbatan akibat aliran sekunder semakin kuat, sehingga 3D- $\delta$  sangat menentukan terbentuk FSP yang berdampak pada ukuran intensitas aliran sekunder. Namun pada aliran yang jauh dihasilkan posisi ESP yang semakin jauh dari bidang tumpu, hal ini merupakan tanda bahwa aliran semakin turbulen. Pada aliran sekunder dampak ESP tidak terlalu signifikan apabila dibandingkan dengan 3D- $\delta$ .

FFST dengan  $L/C=8/12$  merupakan posisi terbaik digunakan sebagai reduksi terjadinya aliran sekunder, hal ini disebabkan :

1. 3D- *Disturbance thickness* yang paling tebal.
2. Batas daerah ketebalan TKE maksimum yang tepat pada 3D-*Disturbance thickness*.
3. Shape factor aliran sudah berada pada daerah aliran turbulen.
4. Tidak dijumpai kecepatan yang bernilai negatif.



Gambar 4-20 Axial Iso total pressure loss coefficient ( $\xi_x$ )



Gambar 4-21 Efektivitas reduksi penyumbatan aliran pada daerah *downstream*.

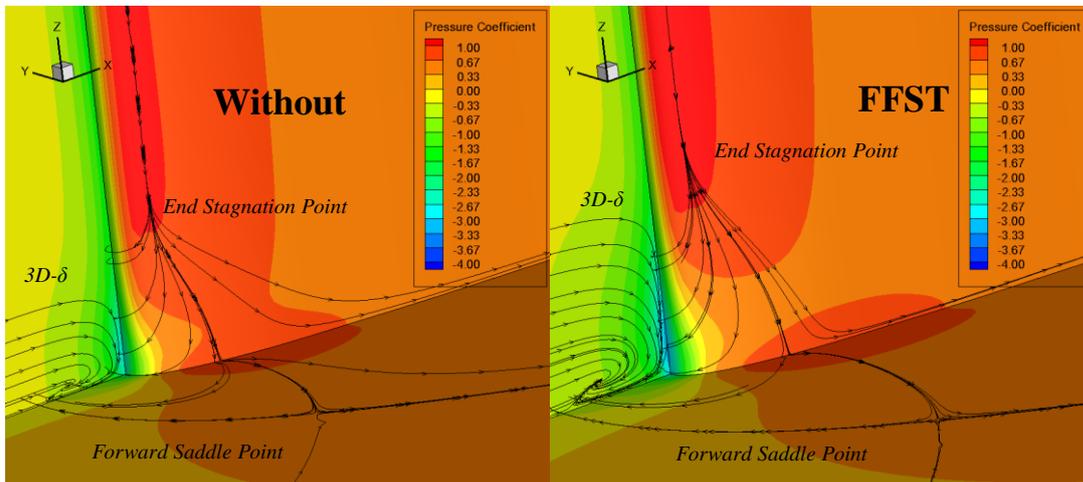
#### 4.4 Aplikasi FFST pada asimetris bodi tunggal (9C7/32.C50)

Bodi dengan profil 9C7/32.5C50 merupakan jenis airfoil yang memiliki *maksimum thickness* di daerah tengah bodi yang diindikasikan dengan angka C50. Dimana artinya posisi *maksimum thickness* berada pada 50% *chord length*. Profil seperti ini merupakan jenis airfoil yang sering diaplikasikan pada profil *blade* kompresor aksial, profil tersebut sering digunakan untuk menaikkan tekanan dalam aliran. Selain itu indentitas kelengkungan 32.5 derajat merupakan sudut *camber* dengan kelengkungan sedang, biasanya digunakan pada bagian *midspan blade*. Pemberikan sudut *camber* bertujuan untuk meningkatkan *lift* pada bodi, peningkatan *lift* tersebut berdampak terhadap peningkatan perbedaan tekanan antara *lowerside* dan *upperside*. Selain itu ketebalan bodi yang terjadi dipresentasi dengan nilai 9C artinya 9% dari *chord length*.

Pada gambar 4-22 diperlihatkan kontur *Pressure Coefficient* di sekitar *leading edge* pada bodi asimetris dengan  $\alpha=12^\circ$ . Pada penelitian ini memaparkan posisi *3D-Disturbance Thickness* pada *leading edge* merupakan posisi dimana aliran *free stream* terdekat dekat bidang tumpu mampu menuju *leading edge*. *3D-Disturbance Thickness* semakin bergerak menuju *midspan* menjauhi bidang tumpu, hal ini merupakan dampak penambahan FFST menyebabkan elemen fluida yang masuk dalam formasi *horseshoe vortex* semakin banyak. Selain itu daerah maksimal tekanan pada *leading edge* membesar sehingga aliran lebih terdesak menuju bidang tumpu yang berasal dari *end stagnation point*. Posisi tersebut merupakan batasan aliran mencapai *pressure coefficient* bernilai 1 atau merupakan batas antara aliran viscous dan inviscid. Penelitian ini mendapatkan dua parameter baru tentang terbentuk aliran sekunder yaitu *end stagnation point* (ESP) dan *3D disturbance thickness* (3D- $\delta$ ), dimana perbandingan antara tanpa dan dengan FFST posisi dua parameter berbanding linier.

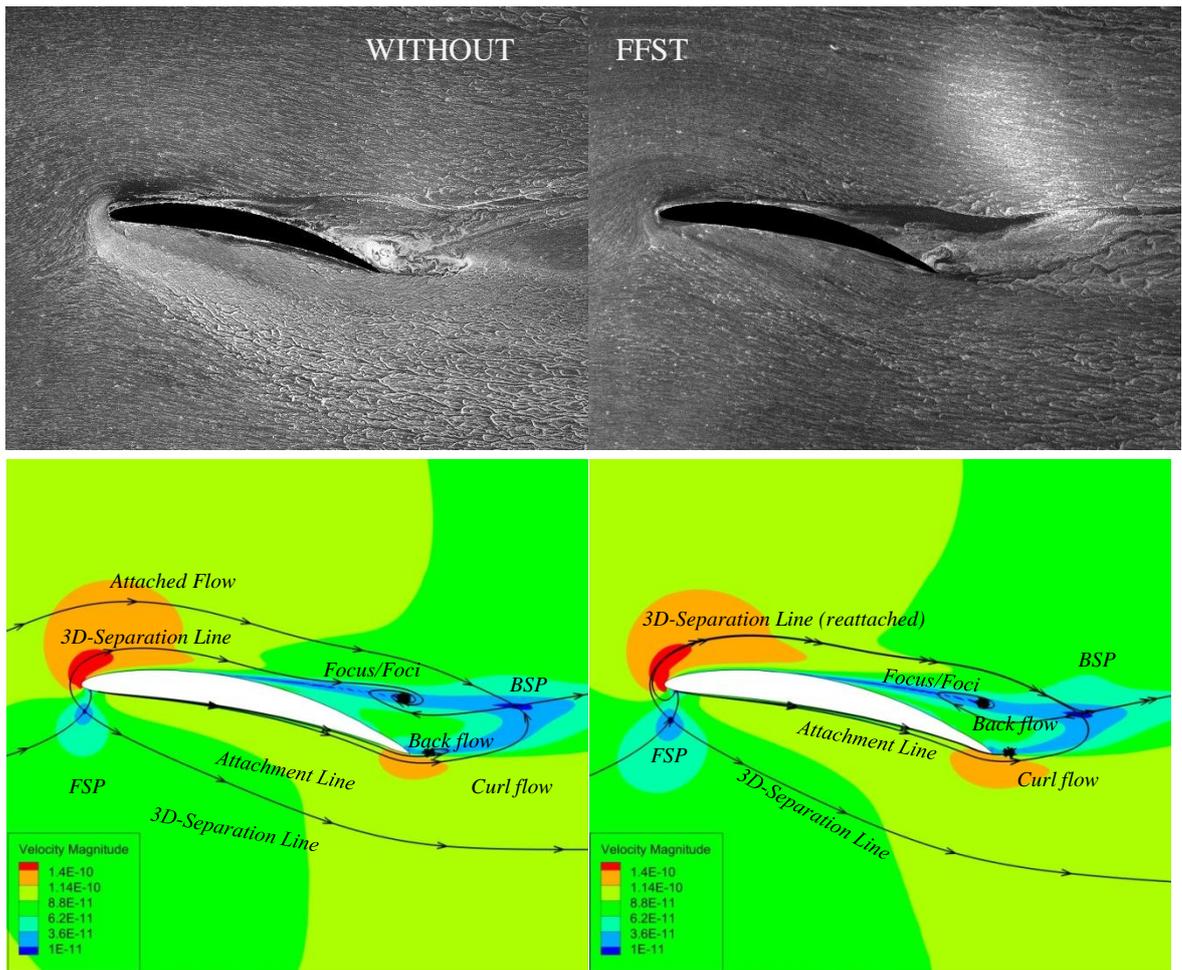
Dampak peristiwa itu menyebabkan aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* memiliki energi lebih besar sehingga lebih mampu mendesak *forward saddle point* menuju *lowerside*. Peristiwa terbentuk aliran 3D selalui dimulai dari *forward saddle point* menurut Mirmanto dan Sasongko[12], namun dampak peningkatan TKE faktor sebagai penentu dimulai dari ESP dan 3D- $\delta$  lebih mendominasi terbentuknya aliran 3D pada aliran TKE tinggi. Karena pada ESP

merupakan sumber terbentuk *attachment line*, yang bergerak dan bertemu dengan aliran *free stream* terbentuk *forward saddle point* (FSP). Sedangkan titik pertemuan ini merupakan batas terbentuk *skewed boundary layer*, penentu terbentuk *3D separation line* atau disebut sebagai *dividing streamline*.



Gambar 4-22 Perbandingan kontur *Pressure Coefficient* pada  $\alpha = 12^\circ$

Perbedaan hasil visualisasi jejak *skin friction* aliran dipresentasikan pada gambar 4-23 pada *angle of attack* ( $\alpha$ )  $12^\circ$ , dihasilkan dari eksperimen pada lorong angin berupa *oil flow visualization*. Pada daerah interaksi tempat terjadinya aliran sekunder peningkatan perbedaan tekanan menyebabkan terjadi *curl flow* semakin hebat, sehingga penyumbatan aliran semakin meningkat. Fenomena itu telah dipaparkan pada hasil eksperimen maupun simulasi terjadi *curlflow* tanpa FFST semakin luas. Namun ketika penambahan FFST pada bidang tumpu mampu mereduksi terjadi *curl flow* pada daerah *trailing edge*, walaupun *3D separation line* semakin menjauhi dan membuka terhadap kontur bodi. Fenomena ini semakin tampak ketika bodi diberikan sudut *camber*, namun *3D separation line* *upper side* membuka dan menjauhi dari bodi tidak sebesar yang terjadi pada bodi simetris.



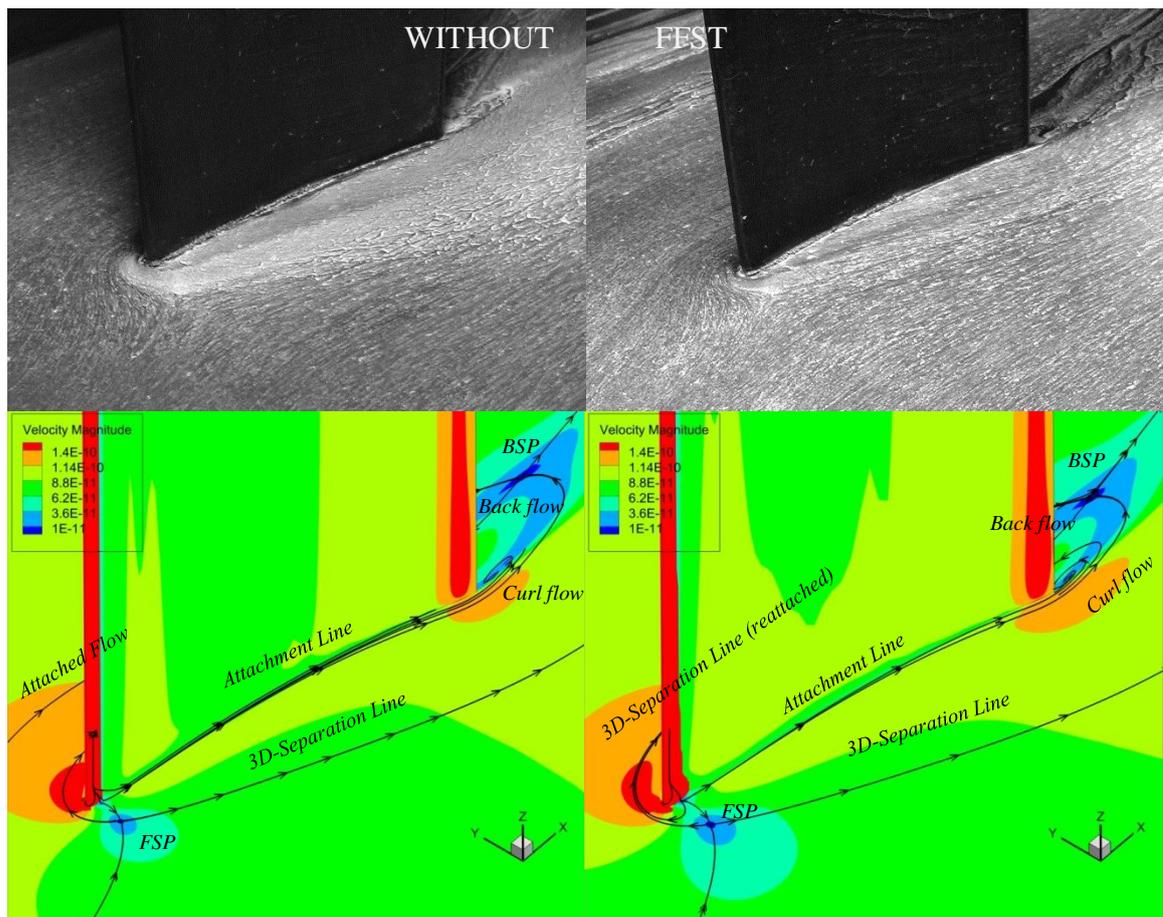
Gambar 4-23 Perbandingan hasil visualisasi jejak aliran pada  $\alpha = 12^\circ$

Fenomena terjadinya *focus* pada *upper side* mengindikasikan bahwa aliran di dalam lingkup *horseshoe vortex* tidak mampu mengalir menuju *downstream*. Penambahan FFST menyebabkan *3D separation line* lebih mampu *attached* sehingga bertemu dengan *curl flow* membentuk *backward saddle point*(BSP). Sedangkan aliran tanpa FFST *3D separation line* terperangkap di dalam formasi *horseshoe vortex* membentuk *focus*.

#### 4.4.1 Karakteristik aliran 3D lower side.

Peningkatan TKE aliran yang berasal dari *upstream* melalui penambahan FFST menyebabkan terjadinya FSP semakin menuju *lower side* bergerak ke *downstream* menghasilkan 3D separation line *lower side* semakin terdorong mengikuti pergerakan FSP. 3D separation line *lower side* semakin membuka dan menjauhi kontur bodi sehingga ruang kosong di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin luas. Hal ini menyebabkan aliran dari *end stagnation point* semakin mudah bergerak menuju bidang tumpu. Pergerakan 3D separation line semakin mudah berinteraksi dengan aliran *inviscid* di luar *boundary layer* sehingga membesar dan melemah kemudian *reattachment* pada bidang tumpu di *downstream*. Pada penelitian sebelumnya Sasongko dan Mirmanto [35] selalu berdasarkan 3D separation line sebagai penentu besar intensitas formasi *horseshoe vortex*. Namun hasil topologi ini menjelaskan bahwa 3D separation line tidak mempengaruhi terjadi *blockage*. *Curl flow* merupakan aliran terjadi akibat perbedaan antara *lower side* dan *upper side* pada daerah *trailing edge*, berasal dari *attachment line end stagnation point* di dalam formasi *horseshoe vortex*. Hal ini tidak tampak pada hasil eksperimen, namun dapat dijelas secara analisa numerik melalui persamaan *streamline* aliran. Informasi di dalam formasi *horseshoe vortex* memiliki komponen kecepatan goresan *skin friction* pada bidang tumpu tidak dapat terdeteksi melalui eksperimen. Pada gambar 4-24. Hasil numerik sangat membantu menelusuri topologi aliran dengan kepastian tinggi karena dilakukan secara otomatis.

*Attachment line* dari *end stagnation point* memiliki kecenderungan mengalir menuju *lower side*, hal ini disebabkan medan haluan menuju *upper side* lebih berat. Penambahan FFST pada bidang tumpu berdampak pada perubahan posisi FSP bergeser menuju arah *lower side*, menyebabkan daerah kontur kecepatan pada *nose* bodi atau ketebalan maksimum pada bodi mengalami penyempitan. Namun *attachment line* menuju *lower side* menuju *trailing edge* mengalami perluasan kontur kecepatan maksimum. Hal ini berdampak pada intensitas *curl flow* pada *trailing edge* semakin mengecil dipaparkan secara jelas dan tegas pada hasil numerik maupun secara eksperimen.

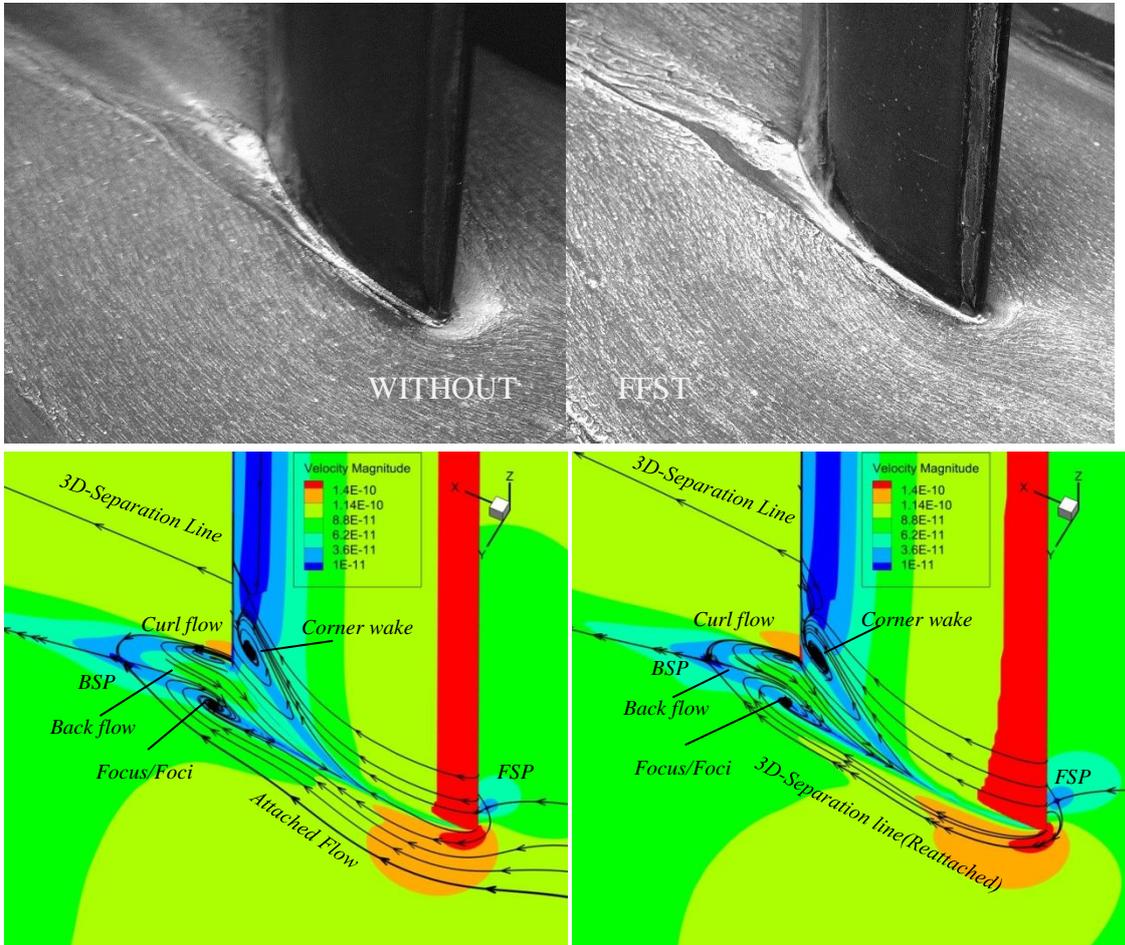


Gambar 4-24 Perbandingan hasil numerik pada *lower side*,  $\alpha=12^\circ$

*Sengaja dikosongkan*

#### 4.4.2 Karakteristik aliran 3D *upper side*.

Hasil visualisasi *skin friction* aliran pada permukaan bidang tumpu dipresentasikan pada gambar 4-25, hasil tersebut indeksi sama dengan hasil numerik berupa distribusi kecepatan dan *streamline* aliran.



Gambar 4-25 Perbandingan hasil eksperimen dan numerik pada *lower side*,  $\alpha=12^\circ$ .

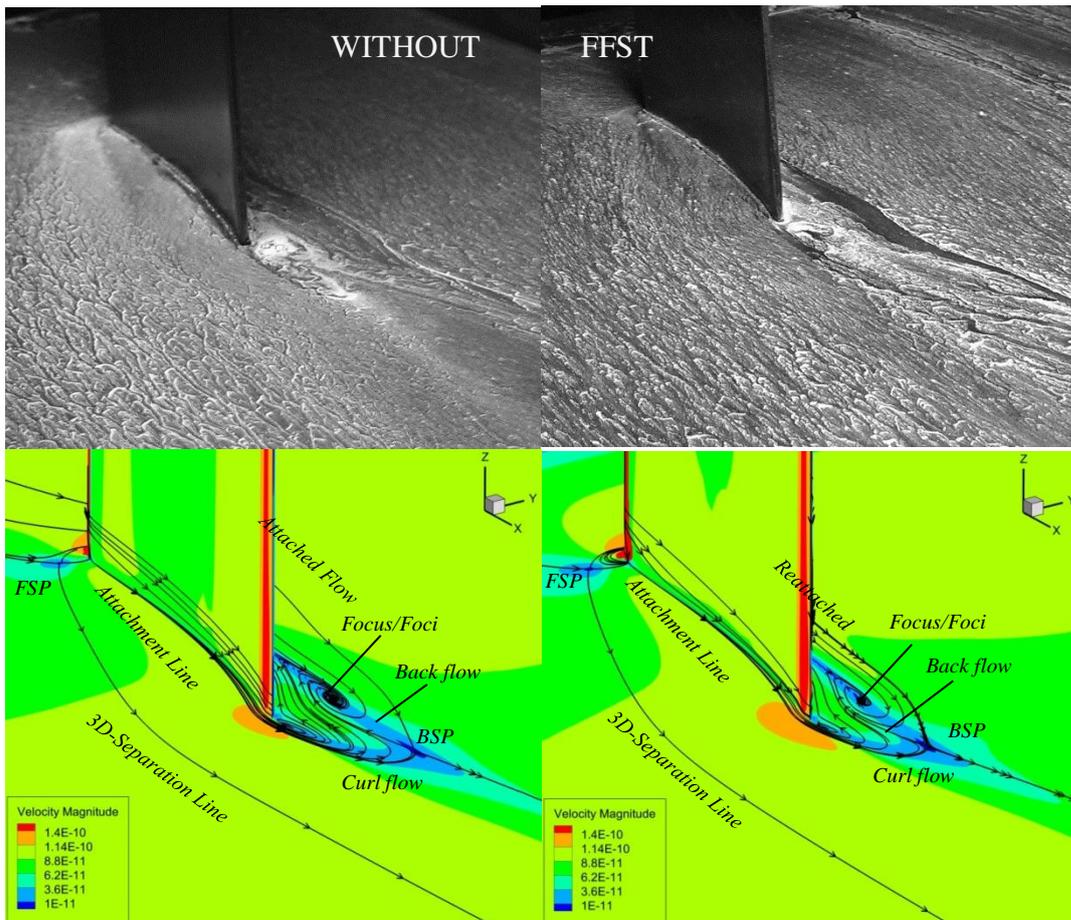
Dampak penambahan FFST pada bidang tumpu terhadap semakin sempit kontur kecepatan maksimum di daerah *nose body*, menyebabkan *3D separation line upper side* bergerak lebih terbuka dan menjauh dari bodi kontur. Selain itu desakan aliran berasal dari *end stagnation point* lebih kuat sehingga *attachment line lower side* semakin berimpit dan mendekat bodi kontur yang menyebabkan efek ganda pada *3D separation line* lebih mampu *attach* kembali. *3D separation line* tersebut pada penambahan FFST bergerak ke *downstream* dan bertemu dengan *curl flow* di *backward saddle point*. Sedangkan bidang tumpu tanpa FFST

*backward saddle point* merupakan titik pertemuan aliran *curl flow* dengan *attachment line* diluar formasi *horseshoe vortex*, sehingga terjadi *backflow* lebih hebat dibandingkan dengan FFST. Hal ini disebabkan aliran separasi merupakan aliran momentum yang lemah dibandingkan *attachment line*. Pertemuan *back flow* dengan *attachment line* dari akhir stagnasi merupakan pemicu terjadinya separasi aliran di *upper side*. Selain ESP peran dari 3D- $\delta$  berdampak terhadap 3D separation line mengitari formasi *horseshoe vortex*.

#### 4.4.3 Karakteristik aliran 3D pada daerah *downstream*.

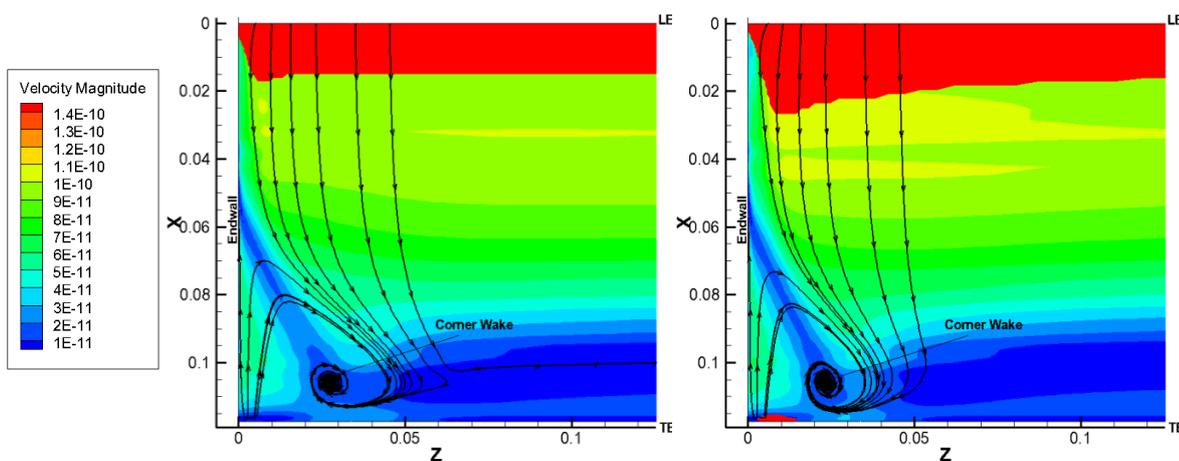
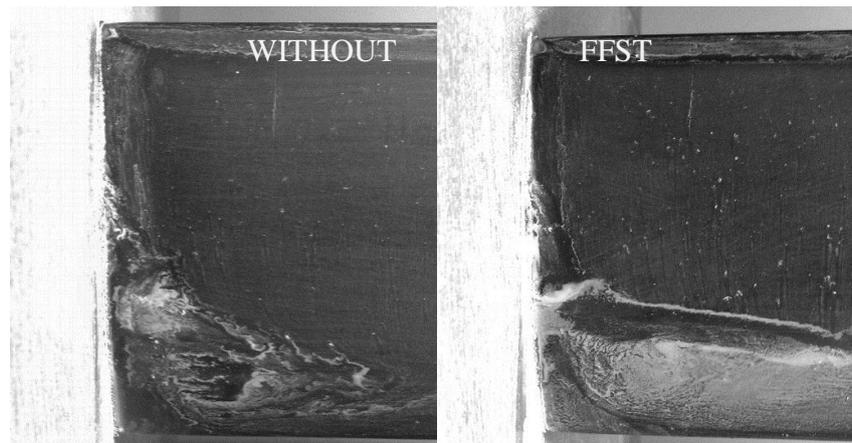
*Backward Saddle Point* menghasilkan dua aliran separasi, salah satunya aliran yang bergerak melawan aliran *free stream* dan mendekati kontur sayap yang disebut sebagai *back flow*. Sedangkan lainnya separasi aliran bergerak menuju daerah *downstream* sehingga tidak berdampak terhadap kinerja sebuah bodi sayap. Pada penambahan FFST *attachment line* dari *end stagnation point* memiliki momentum aliran lebih kuat bertemu dengan *backflow* menyebabkan separasi aliran di dekat bidang tumpu. Separasi aliran tersebut bergerak menjauhi bidang tumpu dan terperangkap di *corner trailing edge*. Aliran yang terperangkap tersebut disebut sebagai aliran *corner wake*. *Corner wake* merupakan penyebab terjadinya penyumbatan aliran, apabila *corner wake* menguasai bodi sayap menyebabkan terjadi *blade stall*. Peristiwa ini dipaparkan lebih jelasnya pada gambar 4-26 .

*Focus flow* terjadi akibat aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* terperangkap sehingga berinteraksi terhadap peningkatan terjadinya *corner wake*. Klasifikasi *focus* menurut Tobak dan Peake [2] menyatakan titik singular yang tidak memiliki garis tangensial kecepatan. Fenomena ini merupakan sejenis *vortex* yang terjadi akibat terperangkap aliran separasi oleh aliran *inviscid* yang jauh dari bidang tumpu. Semakin kuat *backflow* menyebabkan separasi aliran semakin hebat sehingga berdampak terbentuknya *focus*. Penambahan FFST menyebabkan intensitas *back flow* mengalami reduksi yang signifikan, terbukti bahwa *separation line* bertemu dengan *curlflow* lebih lemah. *Focus* terpelintir seperti angin tornado menuju *midspan* dan bergabung dalam pusaran *corner wake* akibat separasi aliran pada *upper side*.



Gambar 4-26 Perbandingan hasil numerik pada *downstream*,  $\alpha=12^\circ$

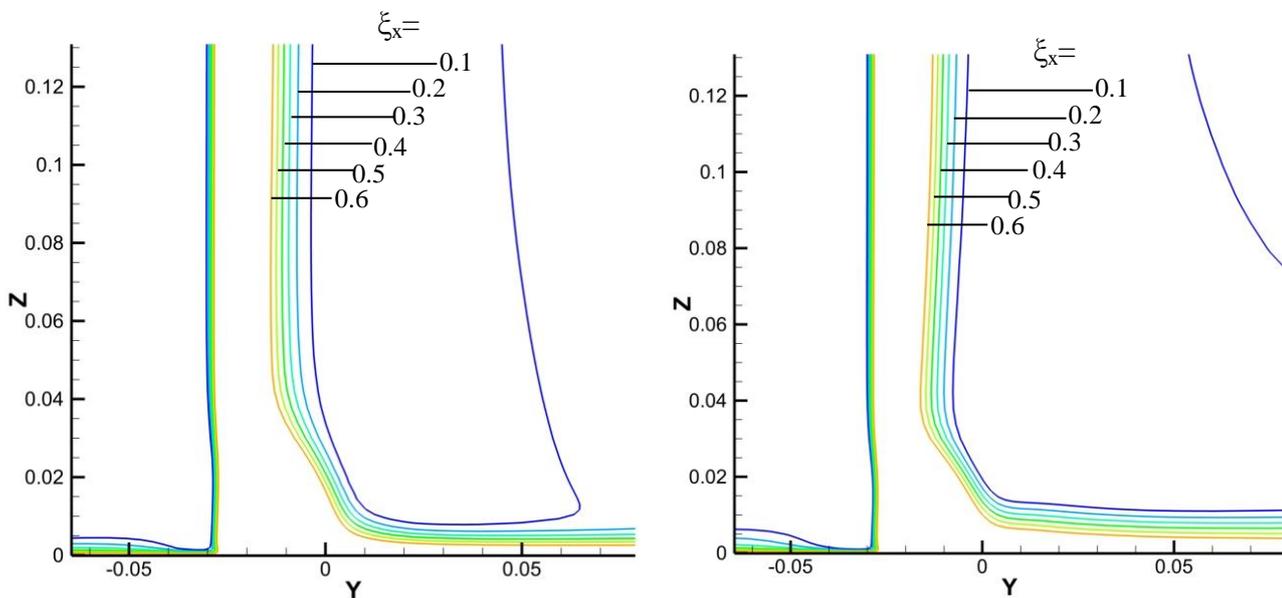
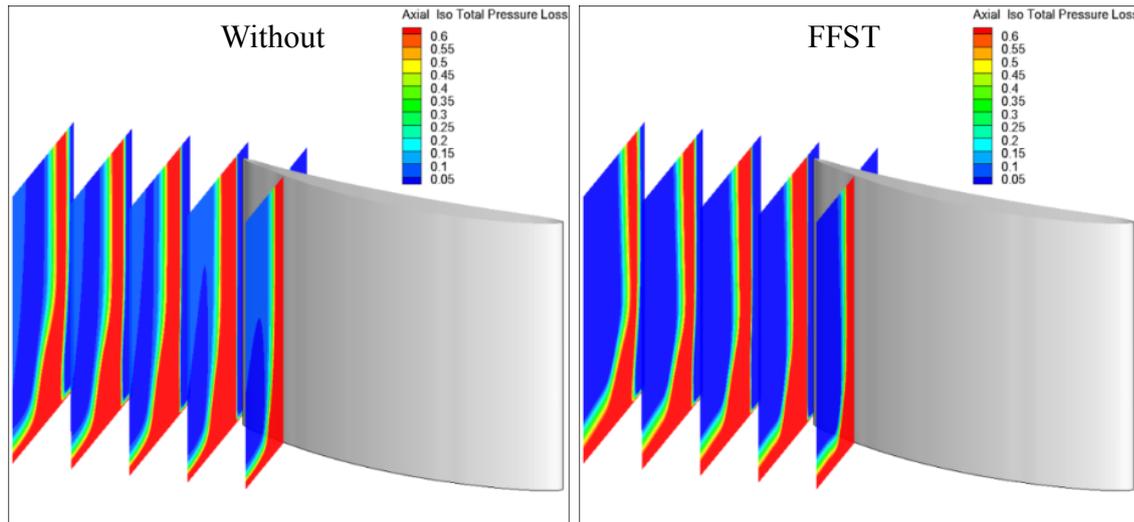
Pada gambar 4-27 dipaparkan *corner wake* yang terjadi pada kontur sayap pada *upper side* hasil eksperimen kemudian dipertegas dengan hasil numerik. Horclock dan Lakshminaraya [1] menyatakan bahwa *corner wake* pada bodi sayap menyebabkan terjadi *blockage* yang telah diketahui menyumbang 50% dari kerugian total hidrolis pada kompresor aksial.



Gambar 4-27 Perbedaan *Blockage* di *upperside body* antara *without* dan dengan FFST,  $\alpha=12^\circ$ .

Aliran dari *leading edge* memiliki misi bergerak menelusuri bodi kontur. Namun akibat adanya gesekan dari bidang tumpu dan bodi, aliran tersebut khususnya di dekat bidang tumpu mengalami separasi yang semakin kuat kemudian terinduksi oleh desakan aliran *backflow* yang berasal dari *downstream*. Peristiwa ini tidak dialami oleh aliran yang jauh dari bidang tumpu yang peristiwa alirannya disebut sebagai aliran 2D. Penambahan FFST pada bodi menyebabkan terjadinya peningkatan momentum aliran di daerah akselerasi sebelum ketebalan maksimal bodi. Peningkatan momentum tersebut disebabkan *attachment line* yang masuk di dalam *horseshoe vortex* semakin kuat, sehingga daerah kecepatan maksimal di dekat bidang tumpu semakin meluas. Perubahan ini menyebabkan graduasi warna ketika memasuki daerah *adverse pressure* semakin kecil sehingga aliran mengalami *deceleration* lebih lemah sehingga separasi aliran sedikit lebih

tertunda. Penambahan FFST berdampak terhadap komponen aliran menuju arah *downstream* semakin besar sehingga pergerakan aliran lebih bergerak menuju *downstream* dibandingkan aliran terdeflesi menuju *midspan* semakin kecil. Komponen aliran terseparasi semakin kecil menyebabkan terbentuknya *corner wake* disekitar *body upper side* semakin mengecil sehingga penyumbatan di daerah *corner trailing edge* semakin lemah.



Gambar 4-28 Perbandingan hasil numerik *axial total pressure loss coefficient* di *downstream*

Reduksi energi yang terjadi di daerah *downstream* diperlihatkan paparan kontur *axial total pressure loss coefficient* pada gambar 4-28. Akibat terbentuk *corner wake* semakin kecil menyebabkan kerugian energi khusus di daerah *corner* semakin kecil. Hal ini diperlihatkan kontur *iso total pressure loss coefficient* maksimal dengan penambahan FFST semakin mengecil dibandingkan dengan tanpa FFST. Selain itu daerah *upper side* kontur *axial iso total pressure loss coefficient* minimum pada daerah sedikit menjauh dari daerah interaksi semakin luas. Namun konsentrasi kontur maksimum *axial iso total pressure loss coefficient* di dekat bidang tumpu *upper side* sedikit lebih tebal ini mengindikasikan bahwa *3D disturbance thickness* aliran semakin tebal.

#### 4.4.4 Karakteristik aliran 3D akibat peningkatan $\alpha$ .

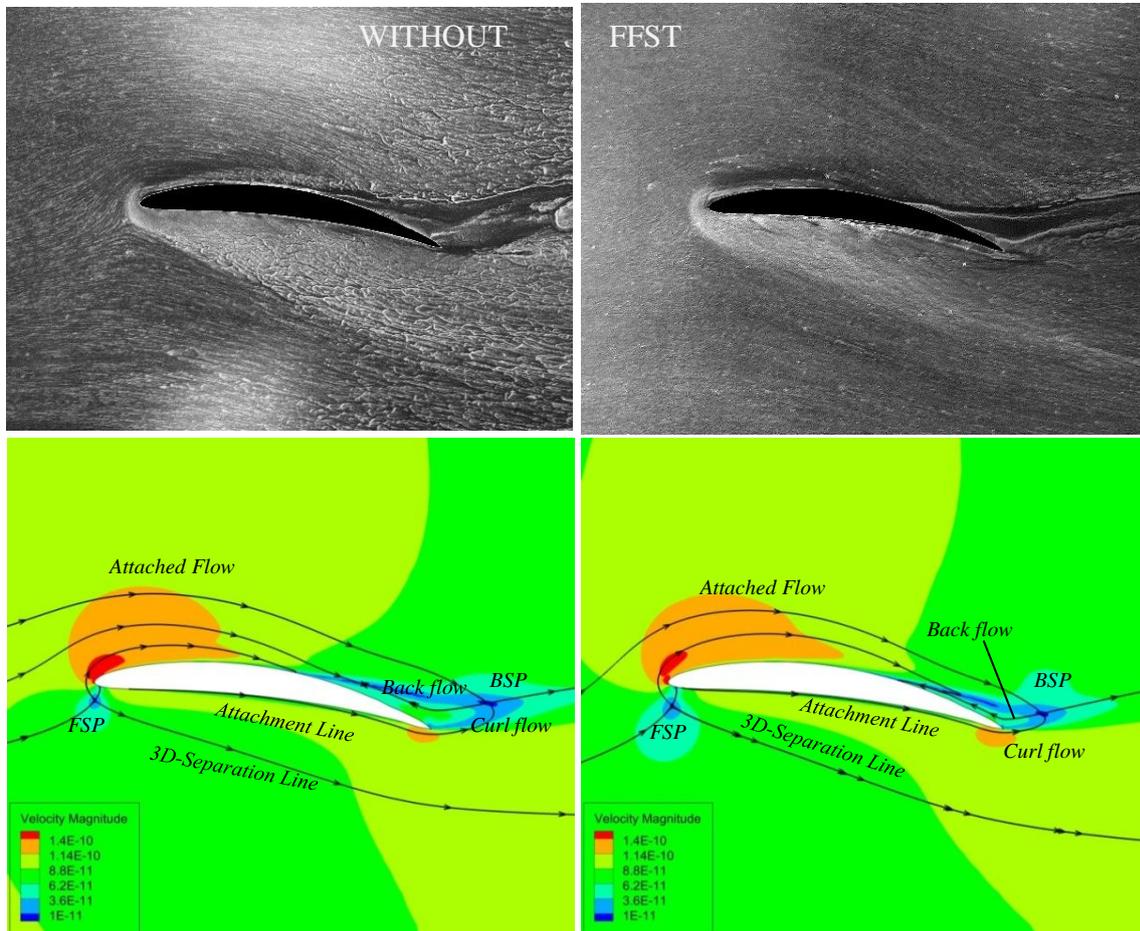
Peningkatan  $\alpha$  terhadap struktur aliran 3D menurut Mirmanto dan Sasongko sangat tergantung terhadap posisi FSP. Dimana FSP dengan penambahan FFST bergerak menuju *pressure side* dan jaraknya semakin jauh terhadap *leading edge*. Pada kajian ini ditemukan hal yang sama terhadap karakteristik beberapa bentuk bidang tumpu. Namun dampak perubahan karakteristik aliran 3D akibat penambahan FFST pada tumpu semakin jelas perbedaannya seiring dengan peningkatan  $\alpha$ .

Pada gambar 4-29 merupakan hasil topologi aliran sekunder dengan  $\alpha=8^\circ$  dan dibandingkan dengan gambar 4-23. Hasilnya dipaparkan beberapa perubahan topologi aliran 3D akibat penambahan FFST pada bidang tumpu disertai dengan peningkatan angle of attack ( $\alpha$ ):

- a. *End stagnation point* dan *3D-disturbance thickness* semakin menjauhi bidang tumpu.

Dampak penambahan FFST selalu mempengaruhi posisi *End stagnation point* yang selalu diindikasikan semakin jauh dari bidang tumpu. Peningkatan *Angle of Attack* ( $\alpha$ ) yang semakin besar tidak mampu merubah posisi *end stagnation point*. Hal ini disebabkan *3D-disturbance thickness* dan ESP tidak dipengaruhi oleh kontur bodi, namun sangat ditentukan oleh panjang lintasan aliran sesuai dengan persamaan *Reynolds* aliran eksternal, apabila semakin panjang lintasan aliran menyebabkan bilangan *Reynolds* semakin besar secara

linier. Fenomena ini secara jelas dipaparkan pada gambar 4-30 berupa kontur distribusi tekanan di daerah interaksi antara bidang tumpu dengan bodi *leading edge*.

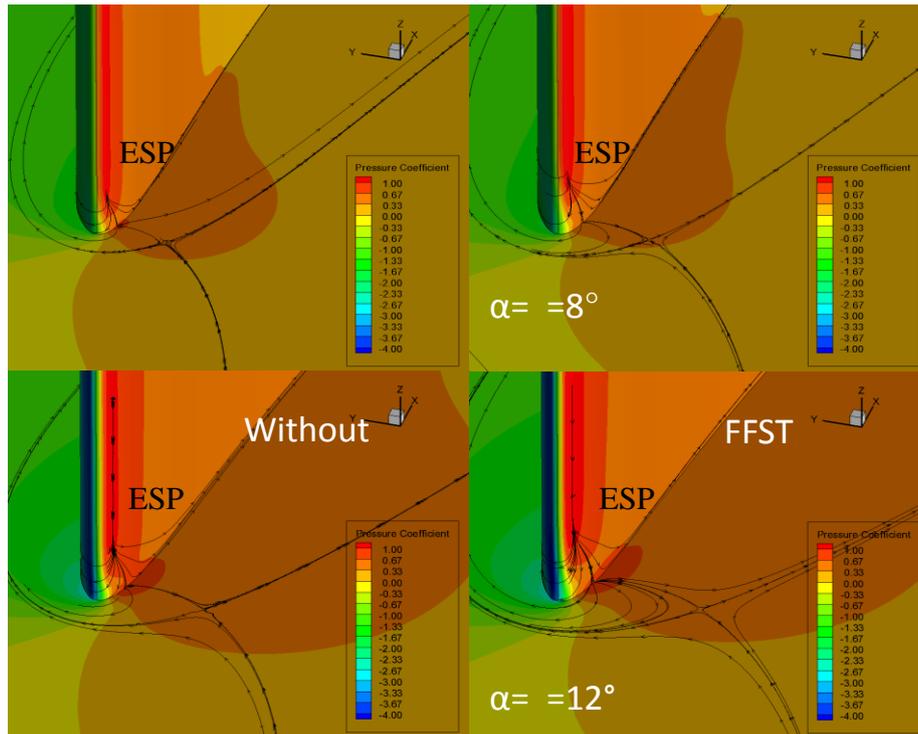


Gambar 4-29 Topologi aliran hasil perbandingan eksperimen dan numerik pada  $\alpha=8^\circ$ .

- b. *Forward saddle point* (FSP) semakin menjauhi dari *leading edge* dan bergerak ke arah *lower side*.

Peningkatan  $\alpha$  berdampak terhadap membesarnya bidang normal yang tegak lurus terhadap arah aliran sehingga TKE *attachment line* dari *end stagnation point* semakin kuat. Hal ini semakin kuat seiring dengan penambahan FFST. Dengan demikian Peningkatan  $\alpha$  terhadap perubahan posisi FSP semakin menjauh dari *leading edge* dan bergerak menuju arah *lower side* semakin berkurang. Hal ini disebabkan beban aliran pada daerah *upper side* semakin meningkat seiring

dengan peningkatan  $\alpha$ , sehingga *attachment line* yang berasal dari ESP lebih bergerak menuju *attachment line lower side*. Dampak komposisi aliran yang bergerak menuju *lower side* semakin meningkat menyebabkan desakan *attachment line* bergerak menuju FSP semakin lemah sehingga perubahan FSP semakin berkurang.



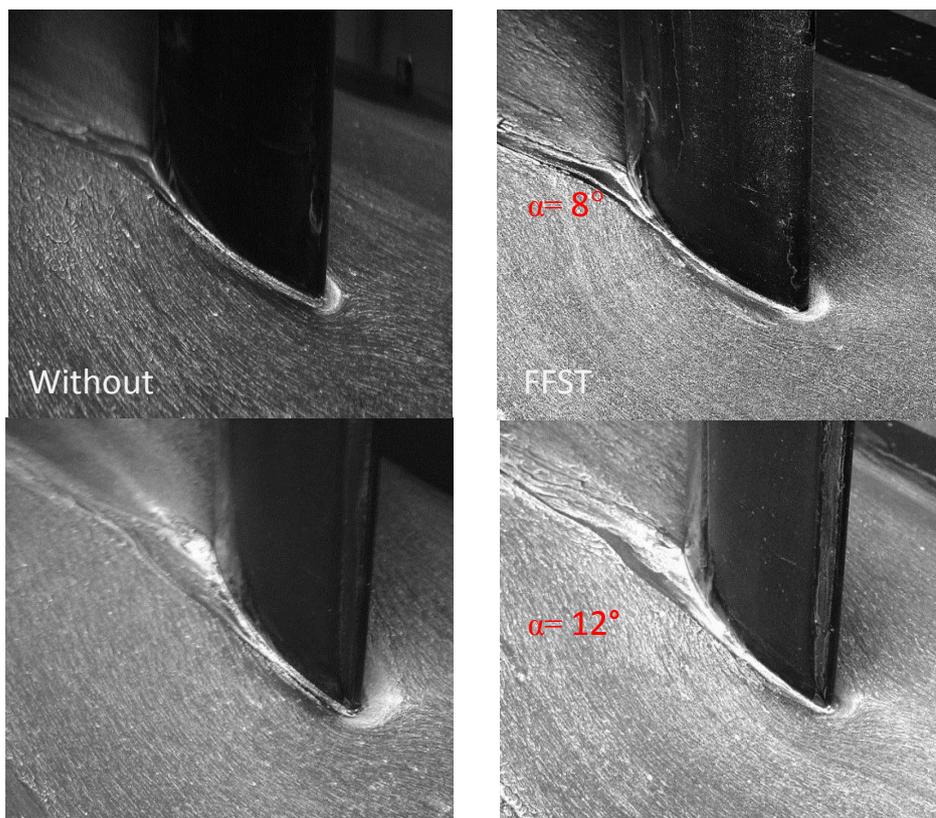
Gambar 4-30 Distribusi kontur tekanan di daerah *leading edge*.

- c. *3D separation line* bergerak lebih membuka dan menjauhi kontur bodi sayap. Dominasi aliran *free stream* yang masuk melalui ESP dan  $3D-\delta$  menyebabkan desakan aliran dari dalam formasi *horseshoe vortex* semakin besar. Akibat desakan aliran tersebut *3D separation line* yang terjadi semakin terbuka dan menjauhi kontur bodi sayap, hal ini terjadi pada *3D separation line upper side* maupun *lower side*. *3D separation line lower side* yang bergerak dari FSP cenderung lebih terbuka dan menjauhi dari kontur bodi, hal ini disebabkan pergeseran FSP yang semakin menuju *lower side*. Kemudian apabila ditinjau dari *3D separation line upper side* ketika memasuki daerah *adverse*, aliran mengalami *recovery* momentum aliran akibat dari konversi TKE yang kuat akibat

penambahan FFST. Pada gambar 4-31 dipaparkan perbandingan karakteristik aliran hasil eksperimen dan numerik pada *upper side*.

Pada daerah tersebut *3D separation line* yang semula lebih menjauh dan terbuka dari bodi kontur, mampu pulih kembali menjadi *attachment line* bertemu dengan *curl flow* sehingga membentuk *backward saddle point*. Hal ini tidak dijumpai pada  $\alpha$  antara  $0^\circ$  dan  $4^\circ$ , disebabkan pada  $\alpha$  tersebut aliran *attachment line* dari luar formasi *horseshoe vortex* lebih dominan dibandingkan dengan pemulihan *3D separation line*. *Attachment line* di luar formasi *horseshoe vortex* semakin lemah seiring peningkatan  $\alpha$ . Hal ini disebabkan daerah *adverse pressure* setelah ketebalan maksimum bodi kontur semakin divergen sehingga hambatan aliran semakin kuat tampak pada  $\alpha$   $8^\circ$ ,  $12^\circ$  dan  $16^\circ$ .

d. *Attachment line* bergerak lebih berimpit dan mendekati kontur sayap.

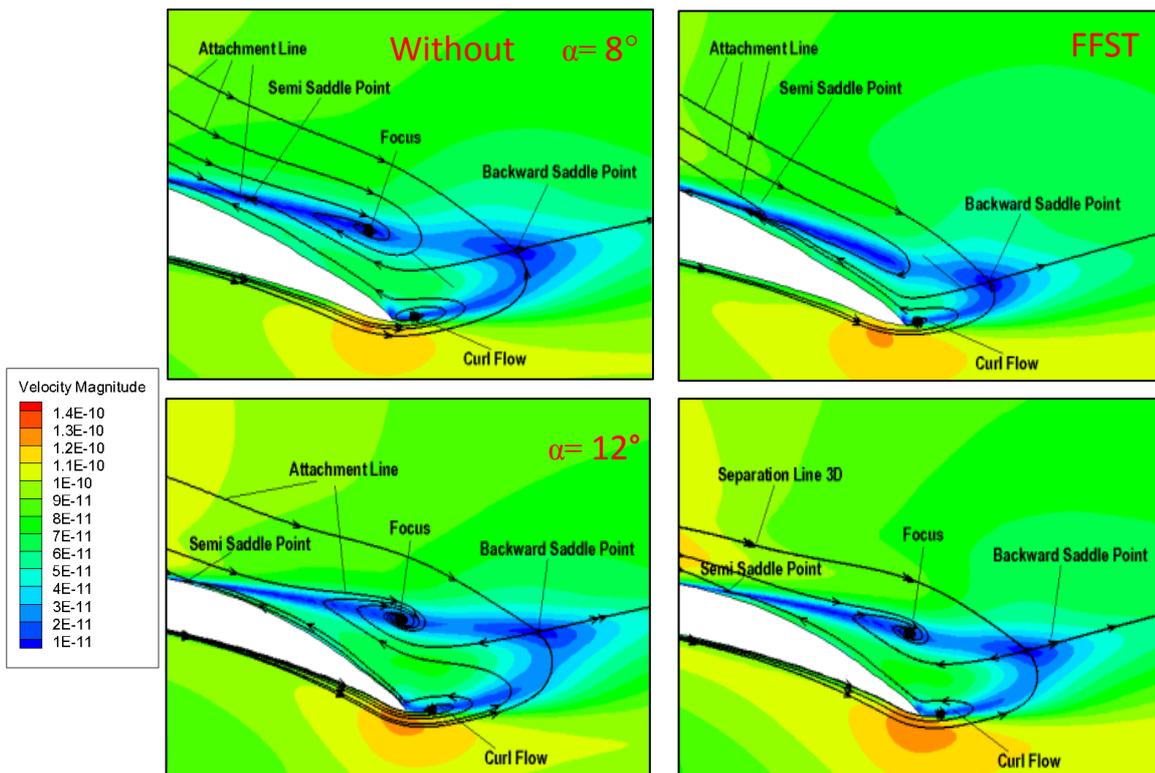


Gambar 4-31 Topologi aliran pada *upper side* hasil eksperimen akibat peningkatan  $\alpha$ .

*Attachment line* yang berasal dari ESP daerah *free stream* menuju bidang tumpu semakin melimpah, aliran tersebut semakin diperkuat oleh kandungan intensitas yang tinggi akibat penambahan FFST. Oleh karena itu beberapa

indikator menjelaskan bahwa *attachment line lower side* dan *upper side* bergerak menuju *downstream* lebih berimpit dan tertutup dengan kontur bodi.

Pada gambar 4-32 dijelaskan bahwa daerah momentum maksimum tetap di *corner trailing edge lower side* semakin luas. Hal ini mengindikasikan bahwa *attachment line* melewati daerah *convergen* menyebabkan terjadi *acceleration flow*, selain *acceleration* semakin dan konservasi TKE yang tinggi menjadi momentum aliran ketika diberikan FFST pada bidang tumpu. Pada daerah dekat *trailing edge*, *attachment line lower side* lebih memiliki komponen arah aliran menuju *downstream* sehingga *curl flow* yang terbentuk semakin lemah. Seiring dengan peningkatan  $\alpha$  *attachment line* reduksi *curl flow* tidak mengalami perubahan, hal ini seperti fenomena yang terjadi pada posisi *end stagnation point*.



Gambar 4-32 Perbandingan topologi aliran pada *corner trailing edge* hasil eksperimen dan numerik akibat peningkatan  $\alpha$ .

e. *Curl flow* terjadi semakin melemah.

Peningkatan  $\alpha$  pada kontur sayap menyebabkan perubahan lintasan aliran di kedua sisi yaitu *lower side* dan *upper side*, sehingga menyebabkan perbedaan tekanan semakin hebat. Perbedaan tekanan yang semakin hebat memicu terjadi

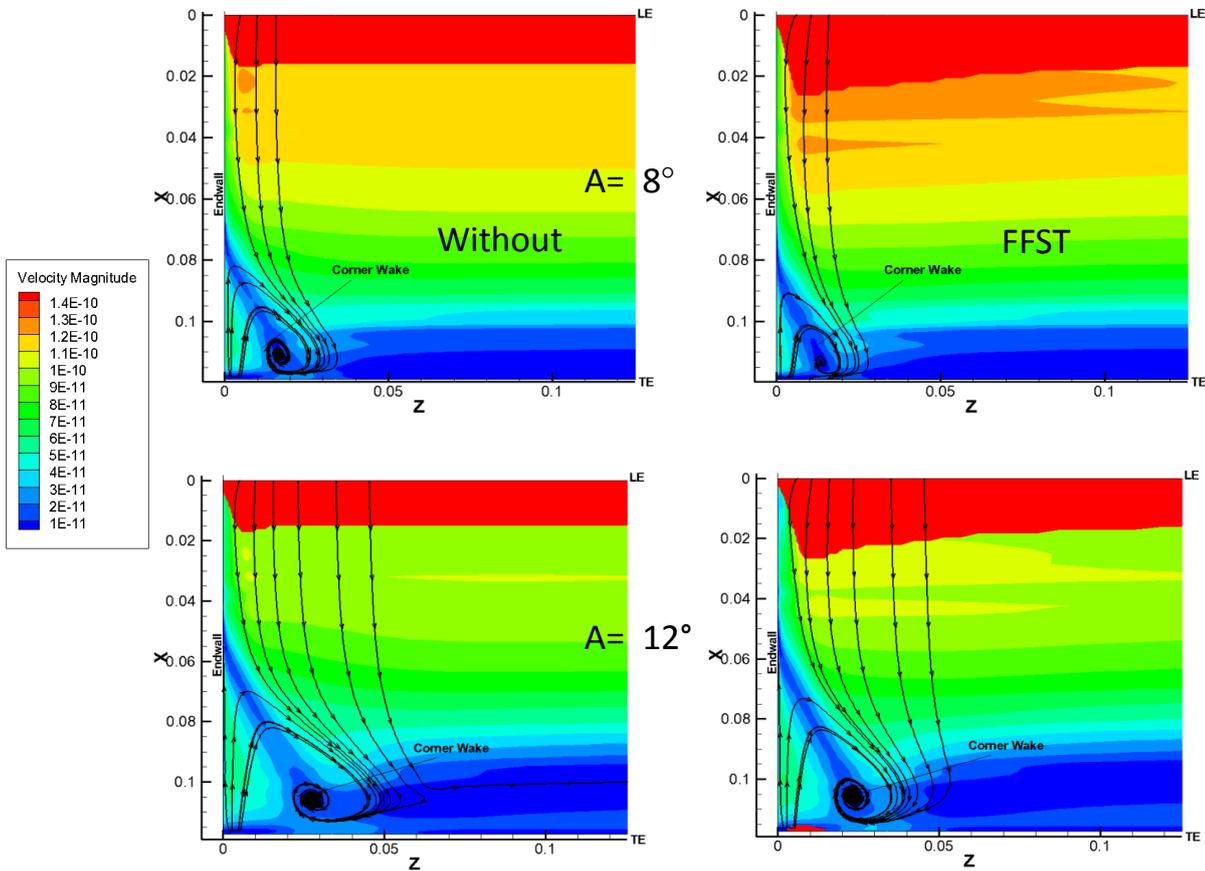
*curl flow* yang semakin kuat. Selain itu penambahan FFST menyebabkan *attachment line* yang bergerak menuju *lower side* dengan FFST lebih kuat dibandingkan tanpa FFST. Dampak propaganda dari beda tekanan sedikit mempengaruhi *attachment line* sehingga terjadinya *curl flow* lebih lemah dikarenakan aliran lebih memiliki bergerak ke *downstream*.

Peningkatan  $\alpha$  pada kontur sayap intensitas *curl flow* semakin kuat, sehingga dominasi aliran semakin terintimidasi oleh pusaran *curl flow*. Titik pertemuan dua aliran yaitu *attachment line* dari *free stream* dengan *curl flow* di dekat *trailing edge* yang disebut dengan *backward saddle point* semakin menjauhi *trailing edge* seiring dengan peningkatan *curl flow* terjadi pada  $\alpha = 0^\circ$  dan  $4^\circ$ . Namun seiring dengan peningkatan  $\alpha$  dominasi *attachment line* diluar formasi *horseshoe vortex* di *upper side* semakin lemah, hal ini disebabkan meningkatnya divergen aliran yang semakin besar. Pada  $\alpha = 8^\circ$  ke atas *backward saddle point* pada aliran dengan FFST disebabkan oleh pertemuan *attachment line* akibat pulihnya aliran *3D separation line* dengan *curl flow*. Dimana *curl flow* memiliki komponen yang lebih lemah bertemu dengan aliran *reattachment separation 3D* yang lemah pula. Hal ini menyebabkan aliran separasi hasil induksi *backward saddle point* semakin lemah sehingga lebih bergerak mendekat menuju bodi kontur.

f. *Separation Flow 3D* lebih tertunda pada *upper side*.

Ketidak mampuan aliran dekat menghadap *adverse pressure* akibat *divergen streamline flow* di daerah *upper side* semakin kuat seiring peningkatan  $\alpha$ . Hal ini merupakan indikasi terjadi separasi aliran 2D, namun adanya interaksi gabungan antara *adverse pressure* akibat kontur bodi dan gesekan bidang tumpu menyebabkan separasi aliran semakin awal terjadi sehingga dinyatakan dengan aliran separasi 3D. Pada gambar 4-33 diperlihatkan bahwa peningkatan  $\alpha$  berdampak gradasi warna setelah kecepatan maksimum semakin kuat, hal ini menyebabkan *deceleration flow* semakin kuat sehingga *adverse pressure* meningkat tajam. Pada daerah tersebut aliran tersebut sangat rawan terhadap terjadinya separasi aliran, sehingga penambahan FFST selalu mengindikasikan terjadi peningkatan kecepatan yang mempersempit daerah *gradasi* warna di daerah tersebut. Dampak gradasi kecepatan yang semakin kecil seiring meningkatkan  $\alpha$

semakin lemah. Selain itu separasi aliran semakin diperkuat adanya aliran *backflow* merupakan separasi aliran yang berasal dari *backward saddle point*.



Gambar 4-33 Perbandingan topologi aliran pada *upper side body* akibat peningkatan  $\alpha$ .

g. *Corner wake* lebih tereduksi.

Muara seluruh aliran di sekitar bidang tumpu bersatu menjadi *wake* di daerah *corner*, peningkatan  $\alpha$  menyebabkan semakin kuat *corner wake*. Namun peningkatan TKE yang berdampak terhadap pulih momentum aliran di daerah *downstream*, dapat mereduksi terjadi *cornerwake* di *corner* sehingga terjadinya *blockage* dapat reduksi.

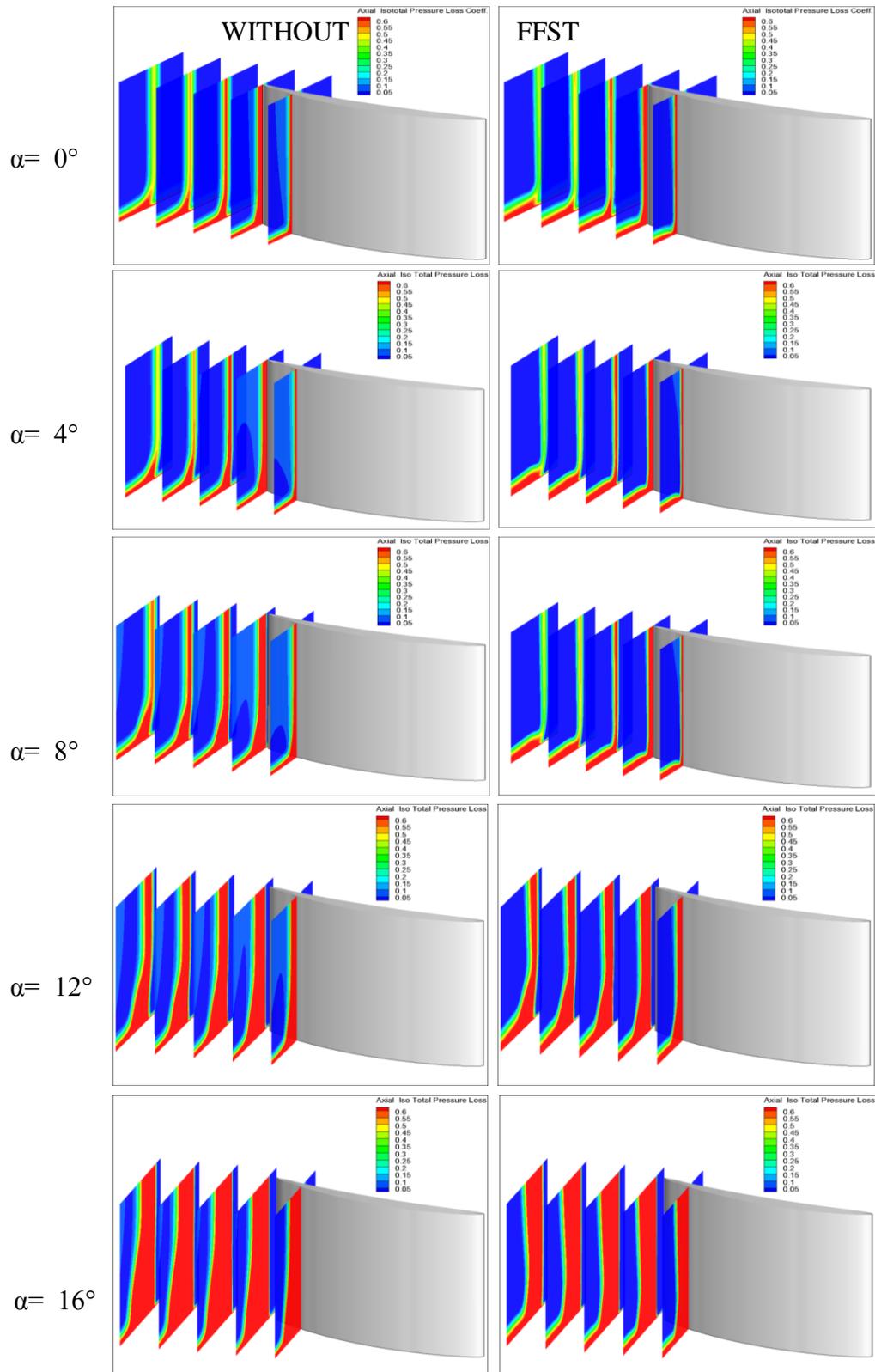
Penambahan FFST berdampak terhadap komponen aliran ke arah *downstream* semakin besar sehingga pergerakan aliran lebih mengarah *downstream* dibandingkan terdefleksi menuju *midspan* semakin kecil. Komponen aliran terseparasi semakin kecil menyebabkan terbentuknya *corner wake* disekitar

*body upper side* semakin mengecil sehingga penyumbatan di daerah *corner trailing edge* semakin lemah.

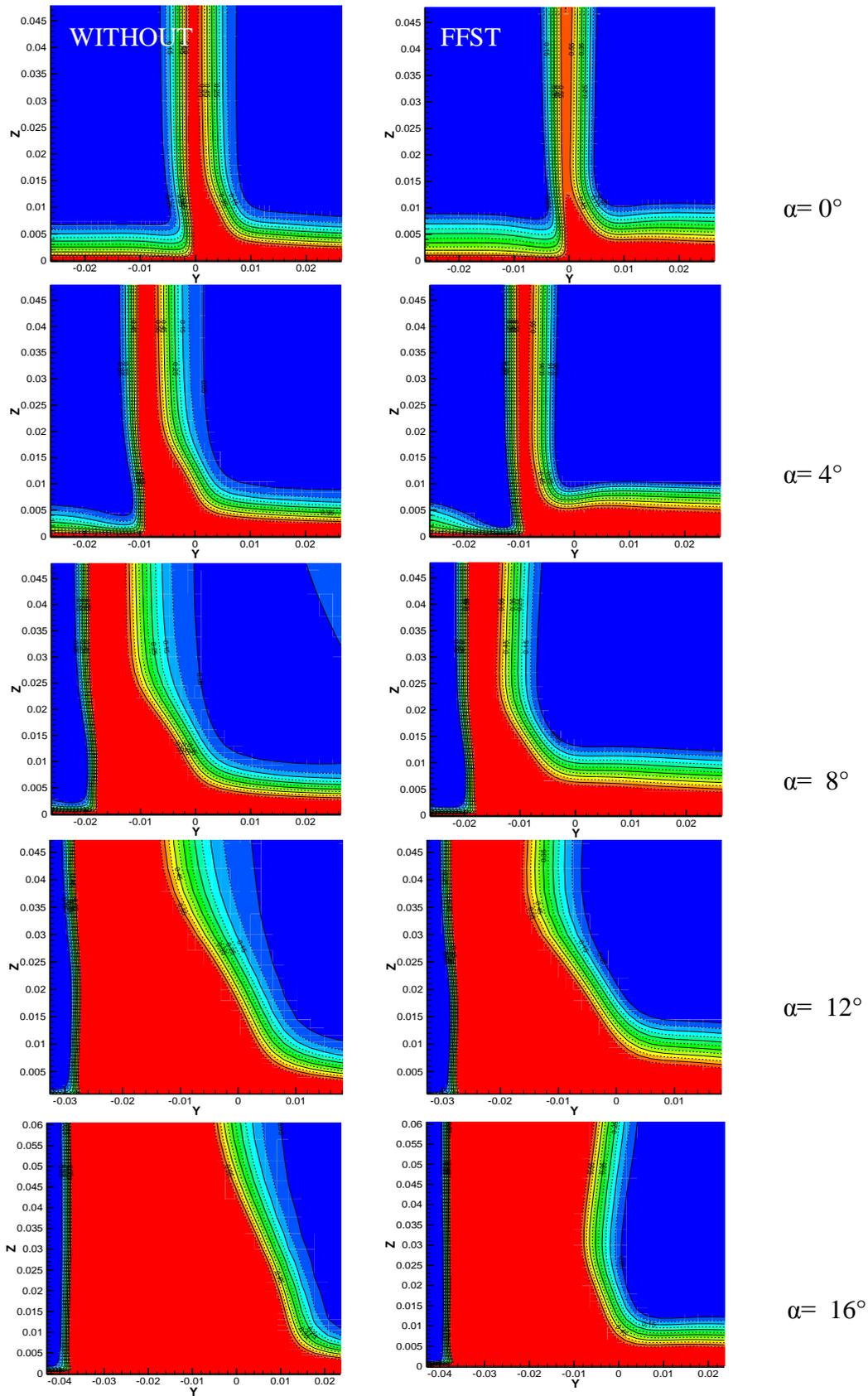
Fenomena tereduksinya *corner wake* melalui penambahan FFST pada bidang tumpu, menyebabkan efek terjadi *blockage* yang diidentifikasi dengan menurunnya kandungan energi di daerah *downstream*. Kandungan energi di dalam aliran dipaparkan dengan parameter koefisien penurunan tekanan total atau *total pressure loss coefficient*. Pada gambar 4-34 dipaparkan dampak peningkatan  $\alpha$  terhadap penurunan energi yang terjadi di daerah *downstream*. Penyumbatan aliran semakin hebat seiring dengan peningkatan  $\alpha$ , hal ini disebabkan dominasi terbentuk *corner wake* di daerah *downstream*. *3D separation line* yang semula dijadikan penentu terhadap besar daerah penyumbatan, tidak berperan terhadap terbentuk *blockage*. Hal ini dibuktikan dengan paparan kontur di daerah *lower side*, dimana semakin besar peningkatan  $\alpha$  terjadinya penyumbatan semakin kecil. *3D separation line* di daerah tersebut mengalami pemulihan yang signifikan sehingga *blockage* yang terjadi tidak tampak.

Sedangkan pada daerah *lower side blockage* yang terbesar terjadi tepat pada *trailing edge* secara berangsur-angsur perjalanan menuju *downstream* mengalami pemulihan momentum. Peningkatan  $\alpha$  semakin menyebabkan *blockage* yang semakin menguasai daerah *downstream*, selain itu membesar menuju arah *midspan*. *Blockage* yang terjadi semakin membesar seiring dengan peningkatan  $\alpha$ , hanya terjadi pada daerah *corner*.

Pada gambar 4-35 dipaparkan kontur terjadinya *blockage* pada posisi  $X/C=14/12$ . Penambahan FFST pada bidang tumpu menyebabkan terjadinya penyumbatan aliran khususnya di daerah *corner* yang sangat signifikan. Namun pada sisi dekat bidang tumpu terjadi peningkatan ketebalan kerugian energi sehingga energi total yang terkandung sulit terungkap dalam kajian kualitatif.



Gambar 4-34 Iso Total Pressure Loss Coefficient di daerah downstream.



Gambar 4-35 Koefisien penurunan tekanan di pada  $X/C=14/12$

Kajian tentang kerugian energi pada daerah *downstream* dilakukan dengan kajian kuantitatif dipaparkan pada tabel 4-4. Kajian ini mengungkap nilai tekanan total dan koefisien kerugian tekanan total secara integrasi *area weighted average* dan *facet average*. Hasil tekanan total yang menginformasikan kandungan energi menunjukkan rata-rata kenaikan energi sebesar 2%. Sedangkan kerugian energi pada arah aksial menunjukkan reduksi yang sangat besar menyamai kurang lebih 50% dalam integrasi *area weight average* dan kurang lebih 18% dalam integrasi *facet average*. Efektivitas penambahan FFST pada bidang tumpu semakin meningkat seiring dengan kenaikan  $\alpha$ , namun pada  $\alpha = 16^\circ$  efektivitas FFST menurun tajam. Penurunan kinerja FFST disebabkan oleh *massive separation* yang kerumitan struktur aliran sangat besar, sehingga sulit untuk dikaji secara fundamental.

Tabel 4-4 Reduksi kerugian energi pada daerah *downstream*.

Model	Axial Isototal Pressure Loss Coeff.			
	Area Weighted Average		Facet Average	
		%		%
Plat Datar AoA 0°	0.0376	0.00%	0.228	0.00%
FFST AoA 0°	0.0160	57.46%	0.192	15.46%
Plat Datar AoA 4°	0.0414	0.00%	0.223	0.00%
<b>FFST AoA 4°</b>	<b>0.0179</b>	<b>56.64%</b>	<b>0.174</b>	<b>21.90%</b>
Plat Datar AoA 8°	0.0507	0.00%	0.238	0.00%
FFST AoA 8°	0.0296	41.71%	0.203	14.57%
Plat Datar AoA 12°	0.0674	0.00%	0.276	0.00%
FFST AoA 12°	0.0467	30.66%	0.243	11.88%
Plat Datar AoA 16°	0.0990	0.00%	0.350	0.00%
<b>FFST AoA 16°</b>	<b>0.0741</b>	<b>25.18%</b>	<b>0.343</b>	<b>2.10%</b>

#### 4.5 Aplikasi FFST pada bodi simetris tunggal (NACA 0015).

Hasil struktur aliran di dekat bidang tumpu dengan penggunaan FFST di bidang tumpu menunjukkan bahwa posisi *end stagnation point* pada leading edge menjadi semakin jauh terhadap bidang tumpu, hal ini disebabkan oleh 3D-

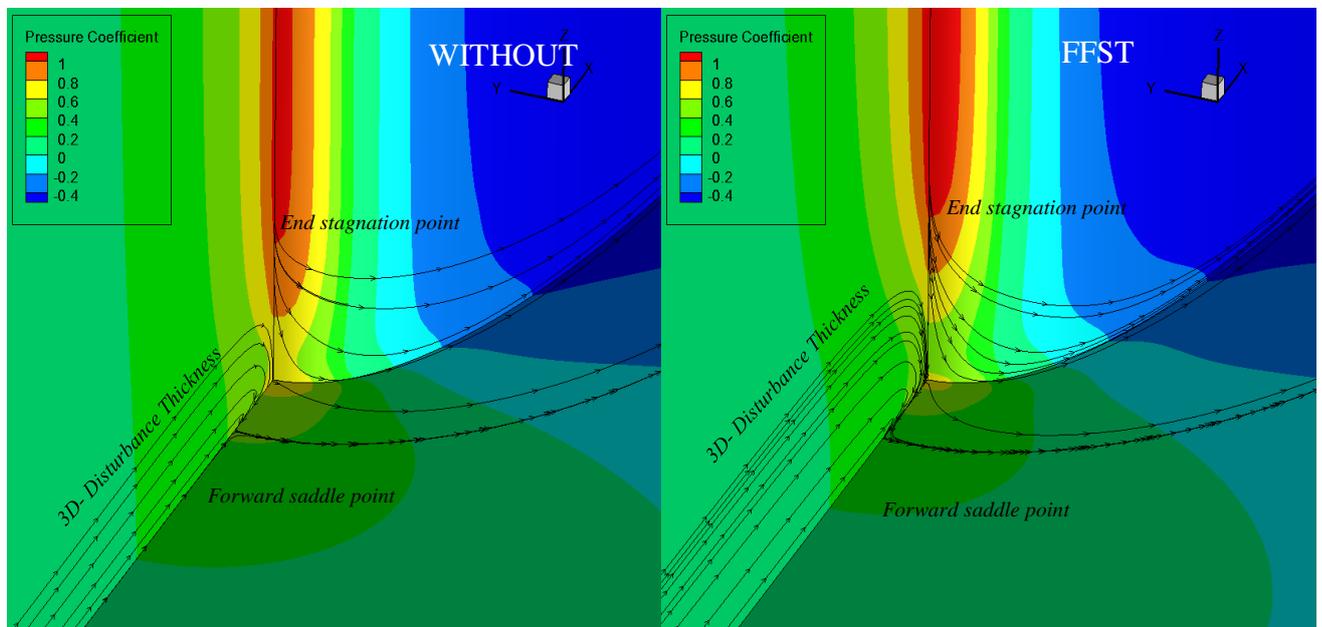
*disturbance thickness* yang lebih tebal. Selain itu penggunaan FFST dapat menghasilkan *attachment line* yang lebih kuat TKEnya pada daerah *end stagnation point* sehingga aliran yang lebih turbulen menguasai di dalam formasi *horseshoe vortex*. Akibat kejadian itu *3D separation line* yang terjadi lebih terdesak terbuka sehingga lebih menjauhi kontur bodi. Ilustrasi tersebut dipaparkan gambar 4-36. Fenomena perbedaan antara aliran dengan dan tanpa FFST menunjukkan hal yang konsisten ketika *end stagnation point* semakin menjauhi bidang tumpu maka *3D-disturbance thickness* semakin tebal, hal ini berbeda ketika posisi FFST digeser menjauhi bodi yang telah dibahas sebelumnya.

Aliran dengan TKE yang tinggi dihasilkan fenomena yang menarik untuk dikaji menjadi teori baru. Sebab pada penelitian sebelumnya dinyatakan bahwa *secondary flow* atau *horseshoe vortex size* sangat dipengaruhi oleh terbentuk *forward saddle point* (FSP). Semakin dekat *forward saddle point* pada *leading edge* selalu dihasilkan *3D separation line* yang semakin berimpit dengan bodi, sehingga *horseshoe vortex size* yang terjadi pada *corner wake* lebih kecil. *Corner wake* yang kecil selalu dihasilkan penyumbatan aliran yang lebih kecil sehingga kerugian energi juga semakin kecil menurut Mirmanto dan Sasongko [4]. Namun pada aliran yang memiliki *turbulent intensity* tinggi memiliki struktur *secondary flow* yang berbeda. *Secondary flow* yang terbentuk memiliki *3D separation line* lebih menjauhi bodi namun *corner wake* yang terjadi lebih kecil. Hal ini merupakan teori baru dari *secondary flow structure*, sebab *turbulent intensity* pada aliran secara berangsur-angsur berubah menjadi peningkatan kecepatan. Oleh karena itu dibutuhkan eksplorasi yang lebih mendalam tentang konversi energi *Turbulent Kinetic Energy* (TKE) menjadi momentum energi di dalam *boundary layer*.

Pemberian *angle of attack* ( $\alpha$ ) pada sebuah bodi di bidang tumpu, selalu meningkatkan beda tekanan di *lower side* dan *upper side* sehingga dihasilkan *lift force* yang lebih besar. Pada struktur aliran peningkatan  $\alpha$  selalu mendesak *saddle point* bergerak ke arah *lower side*. Selain itu berdampak pada panjang lintasan atau beban yang dialami di daerah *lower side* dan *upper side* semakin signifikan. Pada *lower side* terjadi beban yang lebih ringan sehingga aliran

diperlambat yang menyebabkan peningkatan tekanan. Sedangkan pada daerah *upper side* beban aliran lebih berat sehingga aliran dipercepat yang berdampak pada penurunan tekanan.

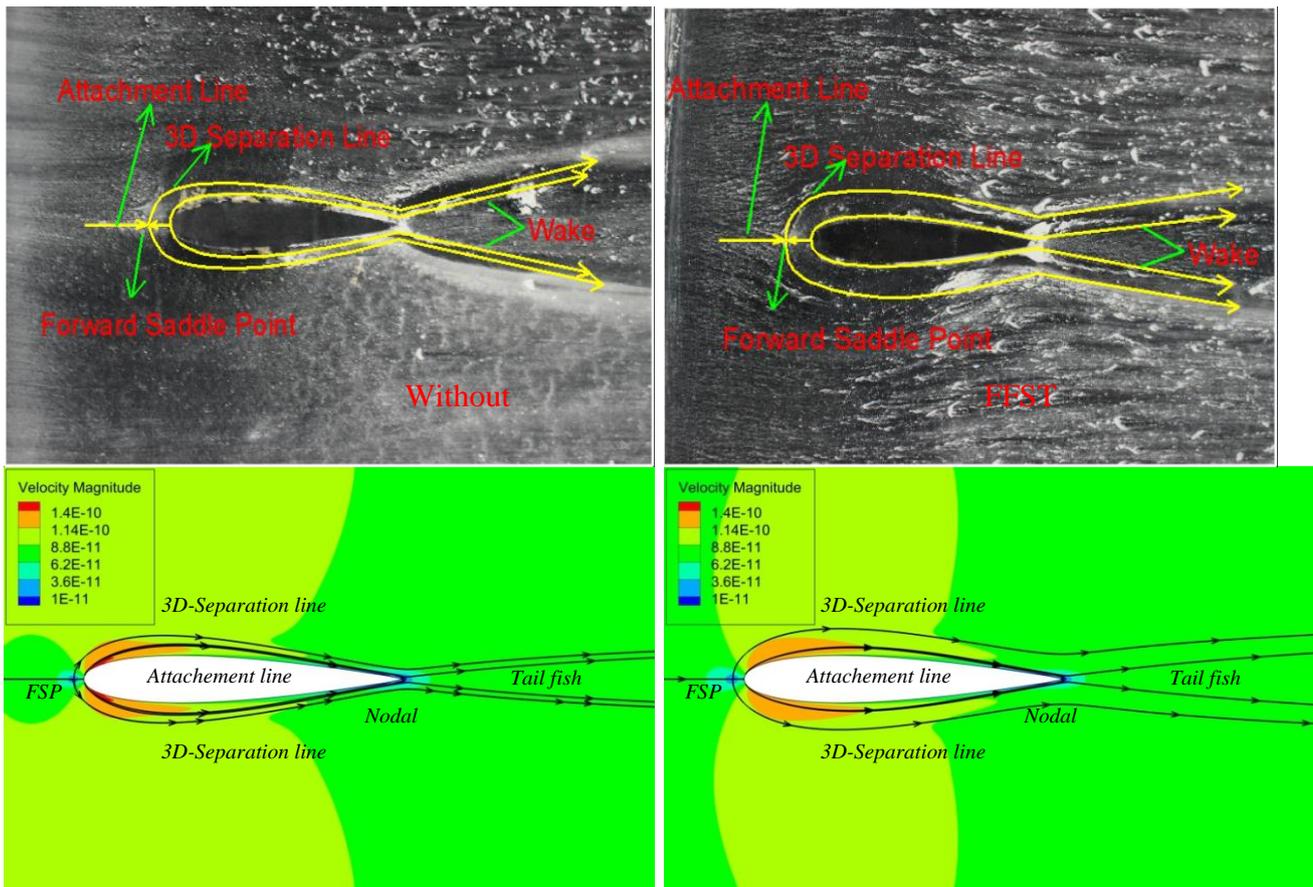
Pada aliran dengan FFST dibandingkan dengan tanpa FFST, *Forward saddle point* lebih terdesak ke arah *lower side* semakin besar  $\alpha$  maka bergerak ke arah *lower side*. Hal ini disebabkan oleh aliran yang lebih turbulen lebih menguasai di dalam formasi *horseshoe vortex*. Dampak hal tersebut dihasilkan *3D separation line* menuju arah *lower side* lebih membuka dan menjauhi kontur bodi. *3D separation line* tersebut tidak berkontribusi terhadap terbentuknya *corner wake* di daerah *corner upper side*.



Gambar 4-36 Struktur aliran melintasi *leading edge*.

*Curl flow* terjadi akibat adanya perbedaan tekanan antara *upper side* dan *lower side* di daerah *trailing edge*, dampak dari pemberian  $\alpha$ . *Curl flow* berasal dari ketidak mampuan *attachment line* dari *end stagnation pressure* menghadapi beda tekanan antara *lower side* dan *upper side*. Pada bodi simetris tanpa  $\alpha$  tidak ditemukan *curl flow* namun terbentuk *nodal* yang menghasilkan garis *tail fish* di daerah *downstream*. Indikasi diantara *attachment line* yaitu luasan *tail fish* terkandung aliran *vortex* yang besar sehingga rentang terhadap terjadinya *blockage*.

Pada aliran yang lebih turbulents lebih tangguh sehingga lebih mampu bergerak menuju arah *downstream*, hal ini menyebabkan terjadi *tail fish* lebih kecil. Hal ini dipaparkan pada gambar 4-38 Karakteristik aliran yang lebih turbulents dikonversikan menjadi momentum yang lebih besar terjadi tepat di daerah trailing edge sehingga aliran lebih mampu bergerak ke *downstream* dibanding terintimidasi menuju arah *upside* akibat dari beban  $\alpha$ .

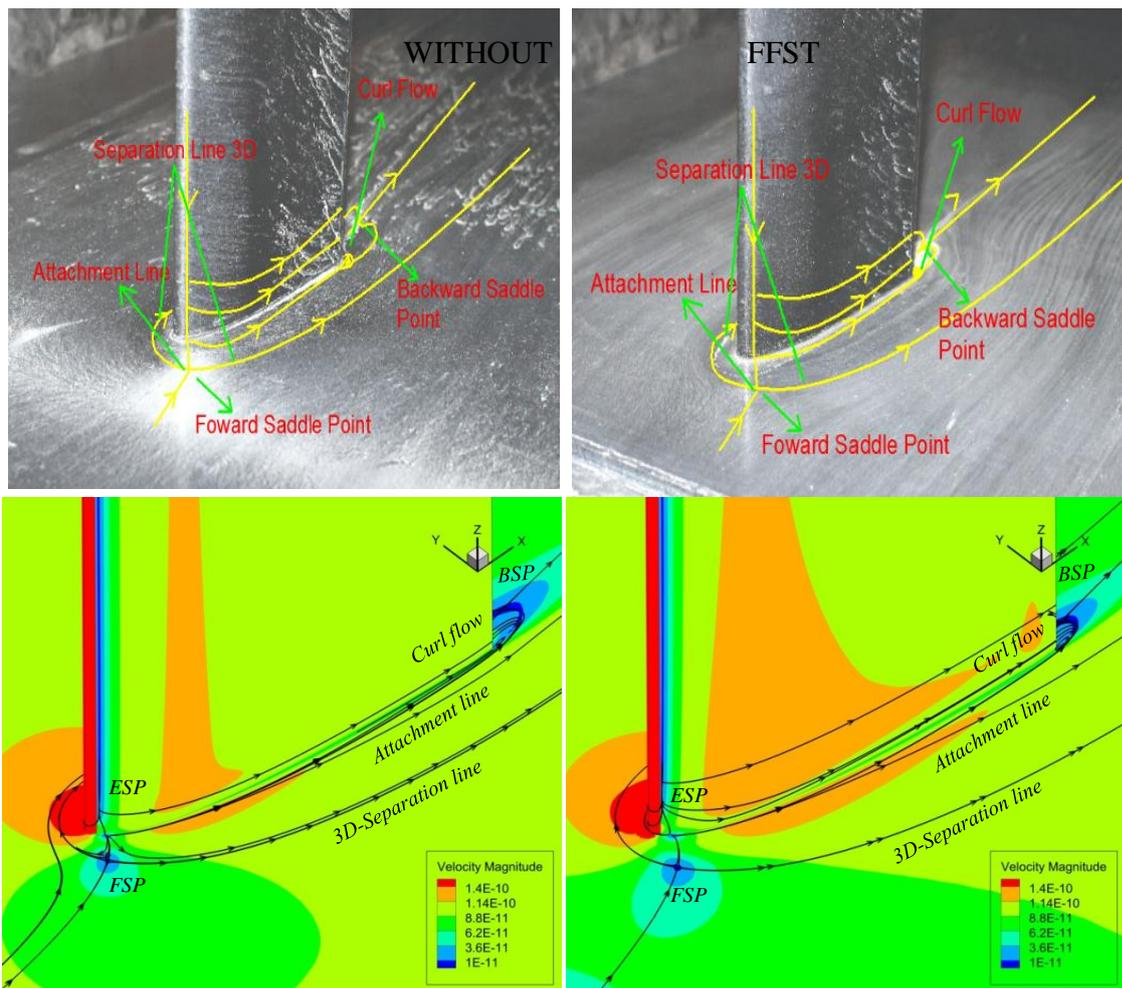


Gambar 4-37 Struktur aliran sekunder pada simetris airfoil tanpa  $\alpha$ .

Akibat penambahan  $\alpha$  menyebabkan terjadi *curl flow* di daerah *downstream* semakin kuat. *Curl flow* yang kecil dihasilkan oleh penggunaan FFST apabila dibandingkan dengan pelat datar sangat jelas ditunjukkan pada  $\alpha = 12^\circ$  di daerah *lower side*, yang dipaparkan pada gambar 4-39. Pada bidang tumpu tanpa FFST *3D separation line* yang terjadi lebih berimpit dengan bodi kontur. Namun ketika bertemu dengan dengan aliran *free stream*, *3D separation line* tersebut mengalami *reattachment* kemudian bergerak menuju *downstream* dan bertemu dengan *curl flow* yang berasal dari *lower side*. Pertemuan itu disebut sebagai

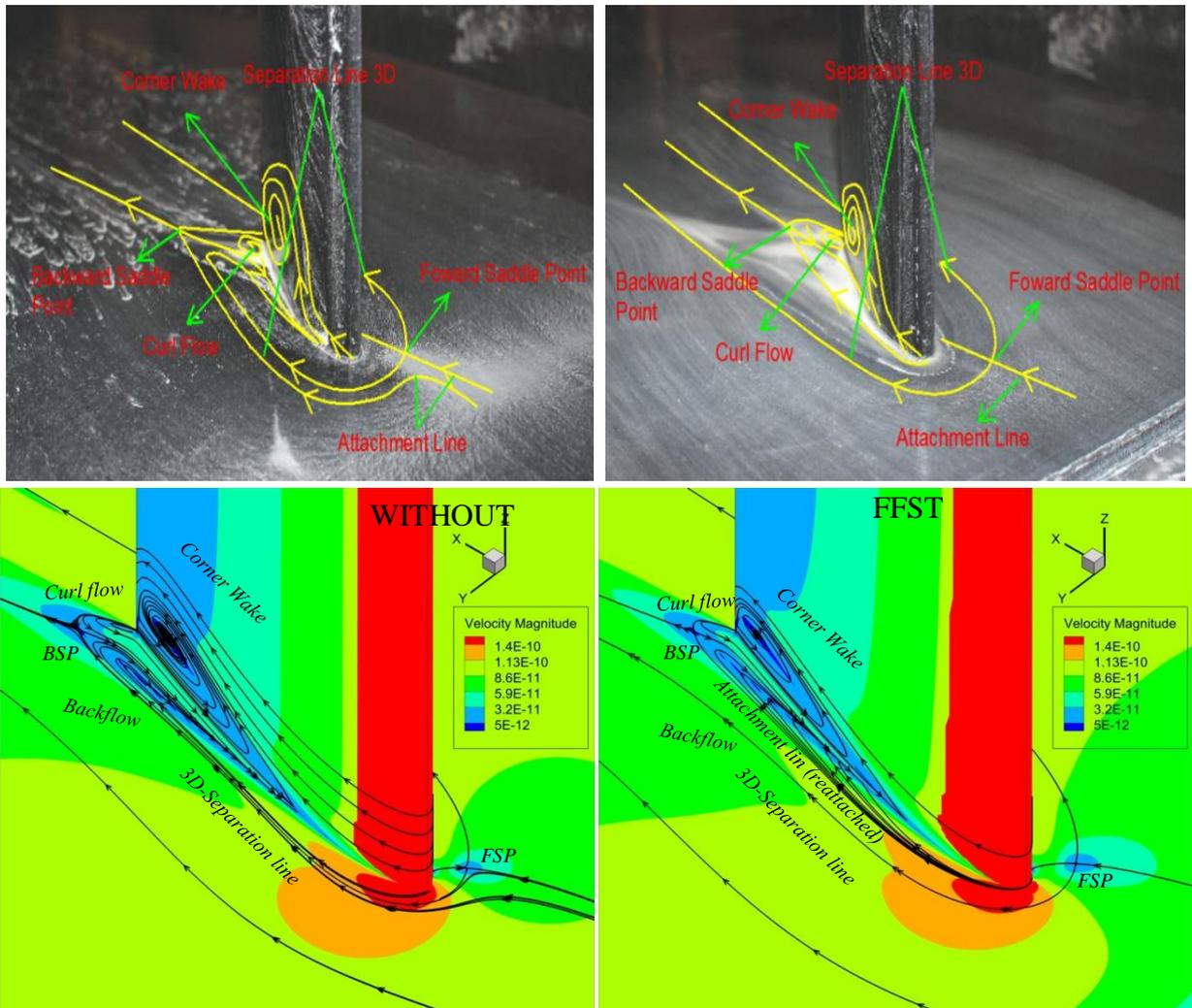
*backward saddle point*, yang menimbulkan dua *separation line* salah satunya bergerak menuju *downstream* sedangkan yang lainnya menyebabkan terjadinya *back flow* di dekat *corner upper side*. *Back flow* tersebut berdampak terjadinya penambahan *adverse pressure* di daerah *upper side*, sehingga *separation flow* semakin hebat. Pertemuan *back flow* dengan aliran *free stream* mendesak aliran bergerak menuju arah *midspan* dan bermuara di dekat bidang tumpu dekat *trailing edge*. Muara aliran tersebut disebut dengan *corner wake*, yang menyebabkan terjadinya *blade stall* atau *corner stall*. Pada aliran dengan bidang tumpu dengan FFST, *3D separation line* yang melintasi *upper side* lebih terbuka sehingga tidak dapat terkontaminasi oleh *curl flow* dari *upper side*. Perbedaan ini merupakan teori baru tentang terbentuk *backward saddle point*, akibat *TKE* yang kuat pada *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex* maka tidak mudah terinduksi oleh *3D separation line*. *Attachment line* tersebut lebih mampu bergerak independen menelusuri bodi dibanding bergabung dengan *3D separation line* seperti aliran pada bidang tumpu pelat datar. *Attachment line* yang bergerak menelusuri bodi bertemu dengan *curl flow*, pertemuan itu disebut sebagai *backward saddle point*. Pada gambar 4-40 dipaparkan dengan jelas bahwa perbandingan antara analisa numerik dan eksperimen di daerah *upper side* tidak terlalu besar perbedaannya.

*Attachment line* memiliki energi yang kuat dibandingkan dengan *separation line* merupakan aliran yang tidak mampu menghadapi beban aliran. *Attachment line* yang bertemu dengan *curl flow* lebih bergerak menuju upstream sehingga daerah lingkup terjadinya *backflow* lebih kecil. Fenomena ini menyebabkan *corner wake* yang terjadi juga lebih kecil.



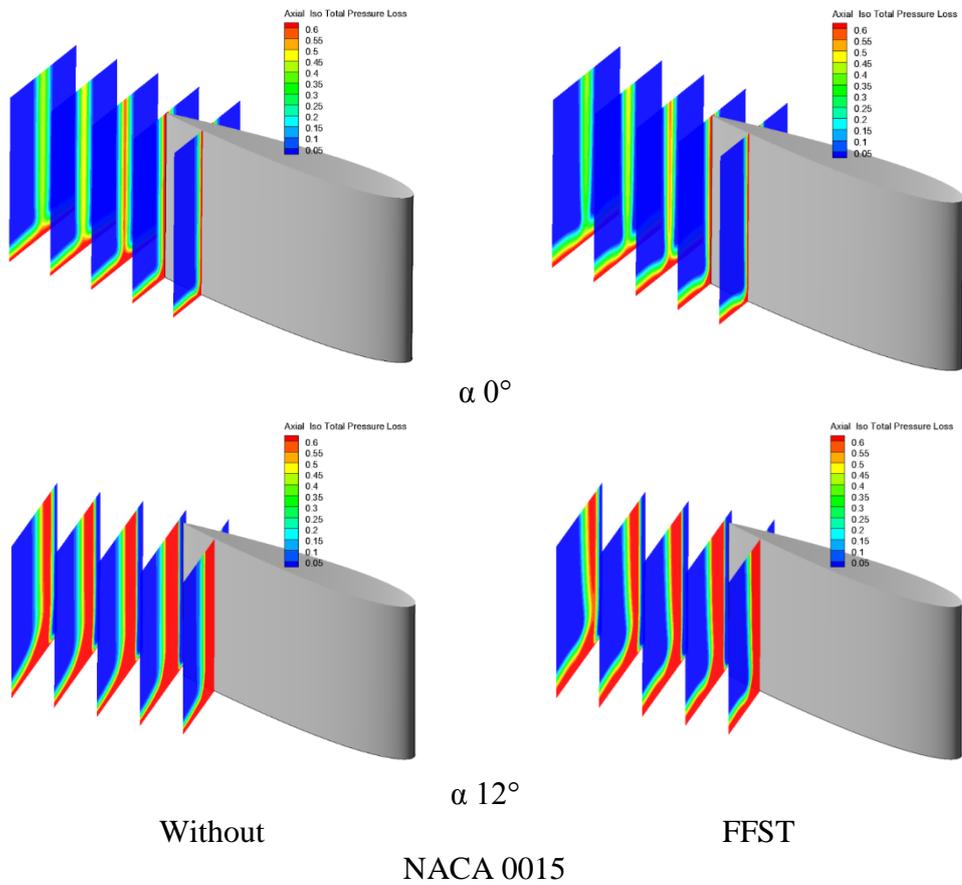
Gambar 4-38 Topologi aliran sekunder NACA0015  $\alpha = 12^\circ$  pada *lower side*.

*Blockage* menyebabkan terjadinya *energy loss* berwujud penurunan tekanan dan kecepatan khususnya *axial direction* sehingga dapat diinformasikan menjadi perubahan *axial total pressure*. Perubahan tekanan tersebut diinformasikan menjadi *axial pressure total loss coefficient* di daerah downstream. Pada gambar 4-41 dipaparkan perbedaan antara tanpa dan dengan FFST *energy loss* terlihat lebih didominasi di daerah *bidang tumpu*. Semakin besar  $\alpha$  dampak *energy loss reduction* semakin berkurang dibandingkan dengan FFST.



Gambar 4-39 Topologi aliran sekunder NACA0015  $\alpha= 12^\circ$  pada *upper side*.

Analisa dipaparkan berdasarkan *integral average outside flows* yang dipaparkan di tabel 4-5. Penggunaan FFST pada bidang tumpu untuk efektif mereduksi *energy loss* pada  $\alpha=0^\circ$  sampai dengan  $16^\circ$ , namun seiring dengan meningkatnya  $\alpha$  efektifitas FFST semakin menurun. Nilai tabel ini memiliki perbedaan dengan tabel 4-5 posisi evaluasi pada  $X/C=14/12$ , sedangkan pada tabel ini berapa pada saluran keluar *boundary condition*.



Gambar 4-40 Kontur kerugian energi pada daerah *downstream* NACA 0015.

Tabel 4-5 *Energy Loss Reduction* pada airfoil simetris.

Endwall	$\alpha$ (degrees)	Total Pressure Loss Coefficient	
		Pa	%
Without	0	0.2502	14.78
FFST	0	0.2132	
Without	4	0.2511	15.25
FFST	4	0.2128	
Without	8	0.2680	15.42
FFST	8	0.2267	
Without	12	0.3103	11.35
FFST	12	0.2751	
Without	16	0.3164	10.62
FFST	16	0.2828	

#### 4.5.1 Pengaruh peningkatan $\alpha$ pada bodi simetris.

Peningkatan  $\alpha$  pada bodi simetris dipaparkan pada gambar 4.38 tanpa dan dengan FFST. Hasil simulasi ini disesuaikan telah sesuai dengan hasil eksperimen yang telah dipaparkan oleh Fitra [55]. Penelitian ini menjelaskan bagaimana pengaruh peningkatan  $\alpha$  terhadap terbentuknya aliran sekunder pada bodi simetris. Bodi simetris merupakan bodi yang dirancang tanpa melibatkan *vortex* sehingga *gaya lift* yang dihasilkan sangatlah kecil. Selain itu bodi NACA 0015 memiliki ketebalan maksimum pada 15 % panjang chord sehingga bodi tidak menyukai  $\alpha$  yang kuat. Hal ini disebabkan  $\alpha$  yang kuat selalu dihasilkan pergeseran *end stagnation point* di *lower side* oleh karena itu aliran yang menuju *upper side* memiliki beban yang sangat besar. Hal ini menyebabkan aliran tersebut dipaksa terjadi akselerasi yang sangat singkat dan bertemu dengan *adverse pressure* yang kuat. Hal ini menyebabkan aliran pada bodi simetris cenderung mudah terpecah pada  $\alpha$  yang kuat.

Fenomena ini berdampak besar pada aliran sekunder, dimana peningkatan  $\alpha$  dapat memperluas daerah kecepatan maksimum dan minimum. Peningkatan kecepatan sangat besar terjadi pada *nose leading edge upper side* dan keseluruhan *lower side*. Sedangkan daerah minimum semakin luas terjadi pada daerah *trailing edge upper side* tempat bermuaranya *blockage*. Hasil ini dipaparkan pada gambar 4-41. Selain itu perubahan struktur aliran sekunder akibat penambahan FFST antar lain :

a) Bergesernya FSP semakin menuju *lower side*.

Posisi *end stagnation point* (ESP) semakin jauh dari bidang tumpu dihasilkan *attachment line* yang semakin kuat. Salah satunya *attachment line* yang menuju arah berlawanan dengan *free stream*. Hal ini berdampak terhadap bergesernya posisi FSP semakin menuju *upstream*, posisi ini menunjukkan semakin bergerak menuju *lower side*.

b) Aliran di dalam *horseshoe vortex* semakin kuat.

Akibat fenomena bergesernya posisi FSP semakin *lower side* dan desakan dari *attachment line* yang semakin kuat akibat posisi ESP semakin jauh dari

bidang tumpu, menyebabkan TKE di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin kuat dan tangguh terhadap hambatan aliran.

c) *Curl flow* semakin lemah.

*Attachment line lower side* yang semakin kuat akibat ESP yang semakin jauh dari bidang tumpu, menyebabkan *attachment line* tersebut tidak mudah terinduksi oleh perbedaan tekanan antara daerah *upper* dan *lower side*. Sehingga komposisi aliran di dalam formasi *horseshoe vortex lower side* lebih mudah mengalir menuju *downstream*. Fenomena ini berdampak terhadap semakin melemahnya aliran melintasi daerah *lower* menuju *upper side* yang disebut sebagai *curl flow*.

d) Aliran di dalam *horseshoe vortex upperside* semakin kuat.

Penambahan FFST yang meningkatkan energi dalam formasi *horseshoe vortex* melalui ESP secara langsung memperkuat aliran di dalam formasi *horseshoe vortex upperside*, sehingga *attached flow* yaitu aliran *attached* dari luar formasi *horseshoe vortex* tidak mampu bertumbukan dengan *curl flow*. Hal ini diperlihatkan pada semua  $\alpha$  bahwa dominasi aliran di dalam formasi sangatlah besar. Pada aliran tanpa FFST pada sudut  $12^\circ$  *attached flow* yang berasal dari luar formasi di daerah *upper side* semakin lemah sehingga berimpit dengan 3D separation line, hal ini disebabkan bahwa peningkatan  $\alpha$  berdampak terhadap semakin kuat *adverse pressure* akibat divergensi *streamline*.

e) *Backward saddle point* semakin mendekati *trailing edge*.

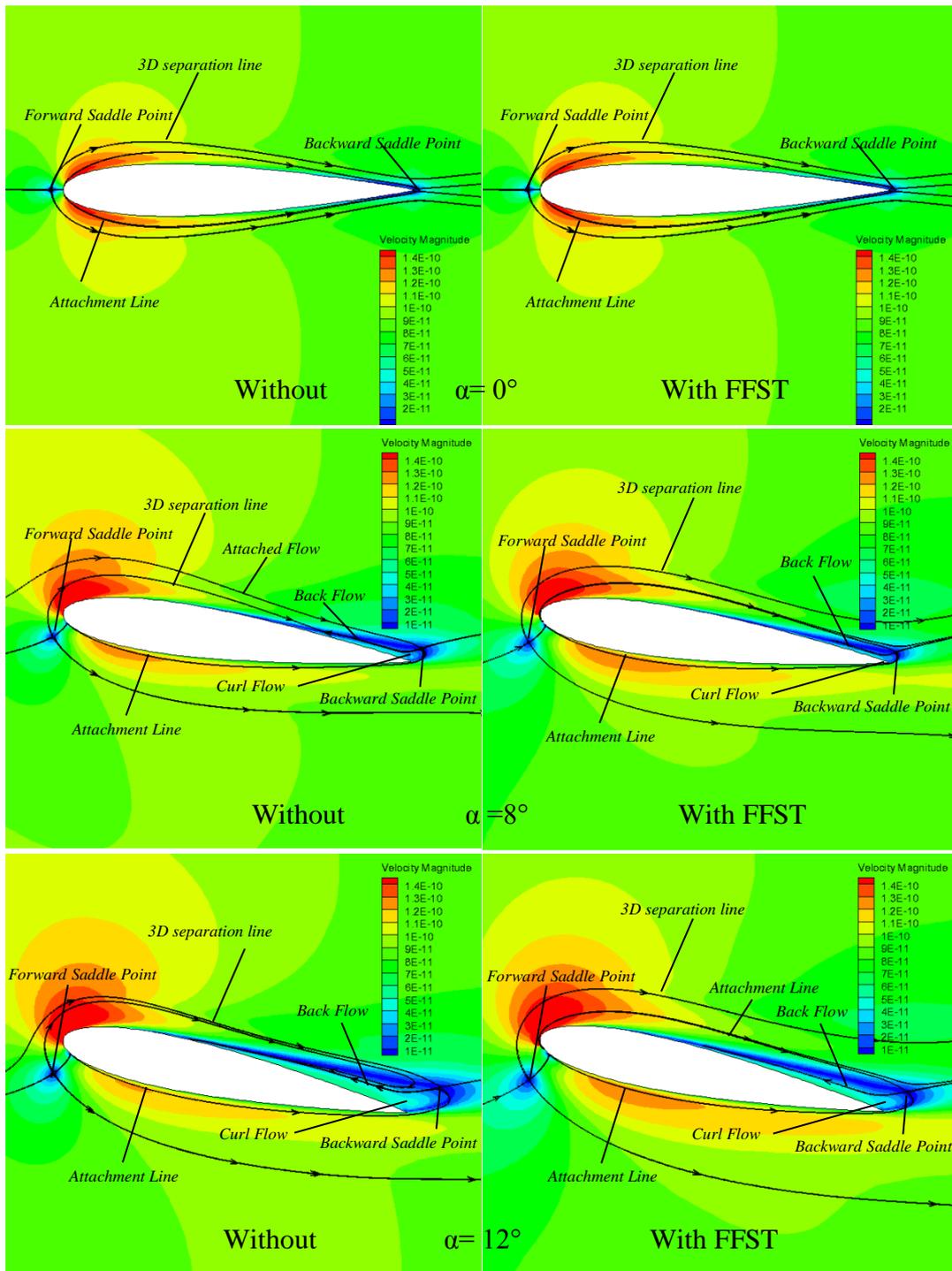
Dampak pertemuan *curl flow* yang lemah dan aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* menyebabkan posisi *backward saddle point* (BSP) semakin mendekati daerah *trailing edge*. Fenomena ini disebabkan oleh momentum tumbukan yang terjadi sangat lemah.

f) *Backflow* dan *blockage* semakin lemah.

Akibat tumbukan semakin lemah pada BSP, *back flow* yang dihasilkan pada daerah *trailing edge* semakin melemah. Fenomena tumbukan aliran tersebut dengan komponen *attachment line* yang kuat berdampak terjadinya aliran yang terseparasi secara 3D semakin lemah sehingga daerah muara aliran terseparasi semakin kecil. Fenomena ini selalu mengindikasikan terjadinya *blockage* aliran semakin kecil dan lemah.

Fenomena ini diperkuat oleh paparan nilai dari reduksi energi yang terjadi dengan menggunakan parameter *total pressure loss coefficient*. Hasil tersebut dipaparkan pada tabel 4-5. Pada bodi NACA 0015 reduksi terbesar penggunaan FFST terjadi pada  $\alpha = 8^\circ$  sedangkan pada sudut  $\alpha = 16^\circ$  penggunaan FFST masih efektif digunakan. Hal ini sesuai penelitian sebelumnya bahwa penggunaan FFST lebih handal digunakan dengan  $\alpha$  tinggi dibandingkan dengan penggunaan *fairing*.

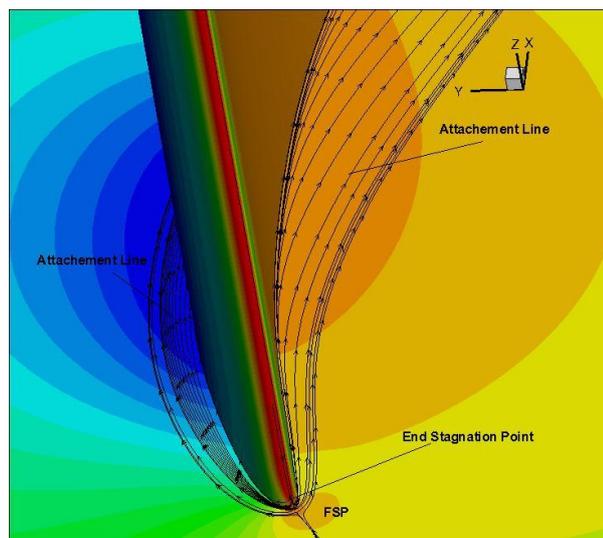
**Sengaja dikosongkan**



Gambar 4-41 Perbandingan struktur aliran sekunder antara tanpa dan dengan FSST seiring dengan peningkatan  $\alpha$ .

#### 4.6 Aplikasi FFST Pada Bodi Tunggal dengan Kelengkungan Kuat (9C7/42.5C50).

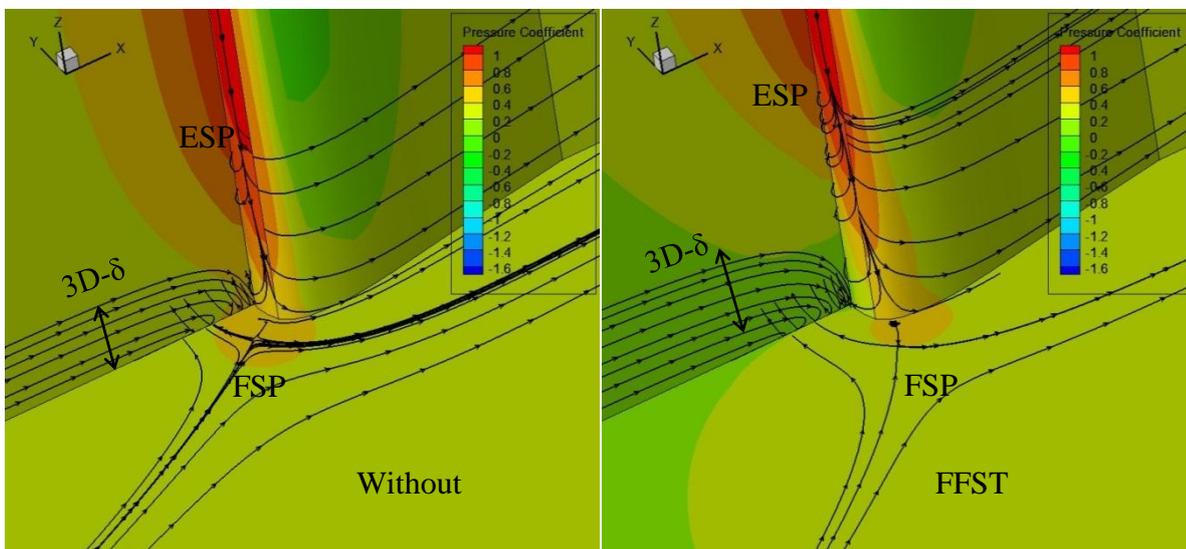
ESP merupakan pusat berawalnya *attach flow* di dalam formasi *horseshoe vortex*, diperlihatkan pada gambar 4-42. Oleh karena posisi *end stagnation point* dapat menentukan karakteristik aliran di dalam formasi, sehingga posisi tersebut sangat penting di analisa terlebih dahulu sebelum melakukan eksplorasi tentang aliran sekunder. Pada penelitian sebelumnya Mirmanto dan Sasongko [4] serta peneliti terdahulu selalu dimulai dari *forward saddle point* (FSP) kemudian dieksplorasi di daerah *downstream*. Menurut Tobak dan Peake [2] selalu dijelaskan bahwa FSP terbentuk dari dua *attachment line* yang saling bertumbukkan. Salah satu *attachment line* tersebut pada penelitian ini dipaparkan berasal dari titik akhir stagnasi merupakan salah satu faktor penentu dari terbentuk FSP.



Gambar 4-42 Topologi aliran 3D pada daerah *upstream*.

Pada gambar 4-43 diperlihatkan bahwa posisi *end stagnation point* dengan aliran yang lebih turbulen semakin menjauh dari bidang tumpu. Posisi tersebut mendekat pada posisi aliran viscous menyebabkan aliran tersebut memiliki momentum dan TKE yang kuat. Kondisi tersebut menyebabkan *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin kuat. Sehingga fenomena tersebut berdampak terhadap momentum dan TKE yang terdapat didalam formasi *horseshoe vortex* memiliki energi yang lebih kuat. Oleh karena itu dengan

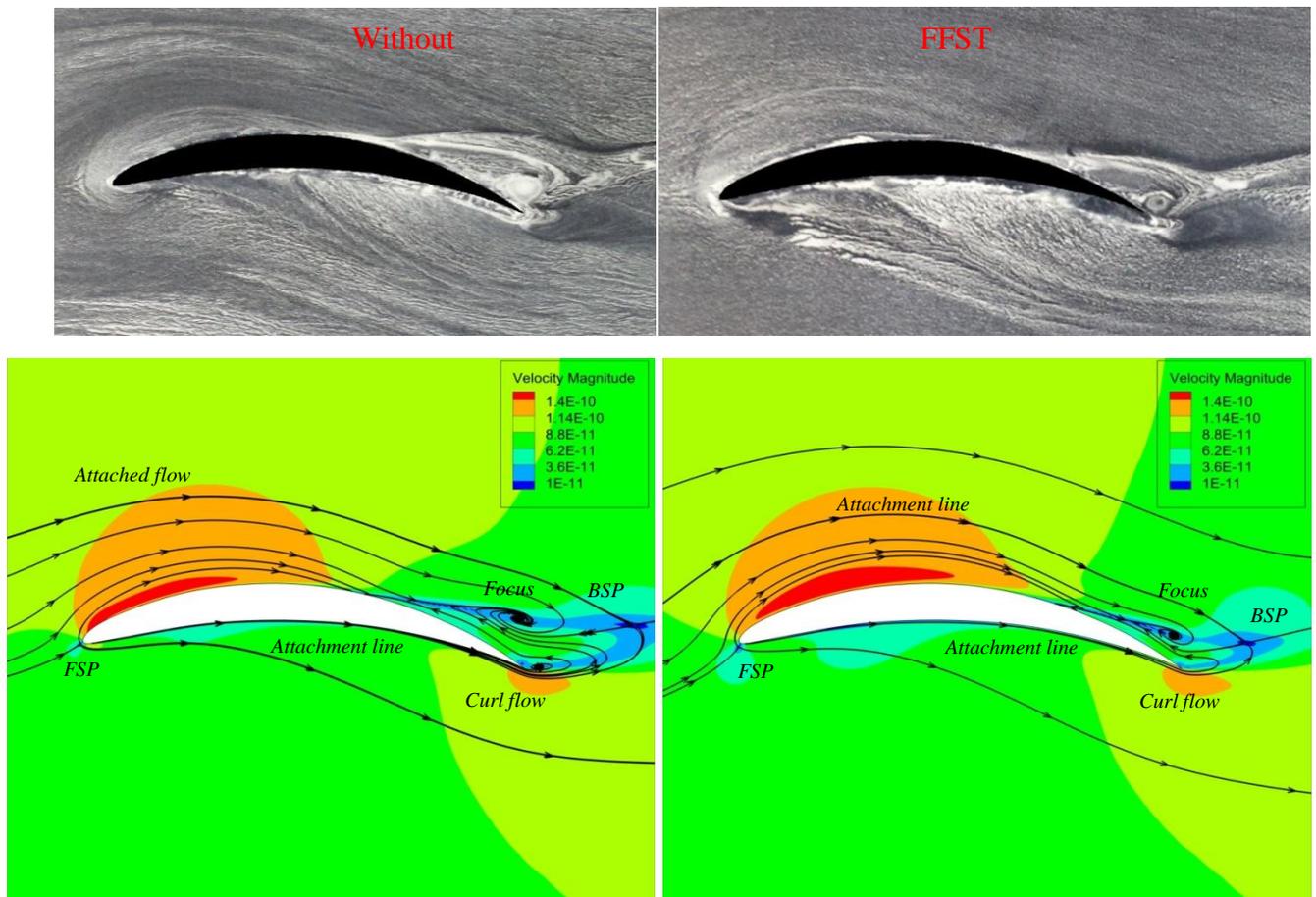
penambahan FFST pada bidang tumpu yang memperkuat intensitas turbulensi aliran selalu membentuk aliran di dalam formasi semakin kuat. Selain itu pengaruh dari  $3D-\delta$  merupakan parameter elemen fluida dari *upstream* masuk dalam formasi *horse shoe vortex*. Batasan nilai dari  $3D-\delta$  ditentukan kemampuan aliran *upstream* menyentuh *leading edge*. Peran dari  $3D-\delta$  merupakan aliran pada bodi dengan  $\alpha$  tertentu mengalir pada *3D separation line upperside*, sedangkan ESP merupakan muara *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex*. Penambahan FFST menyebabkan ESP dan  $3D-\delta$  semakin menjauhi bidang tumpu, sehingga elemen fluida yang masuk di dalam formasi semakin kuat.



Gambar 4-43 End Stagnation Point dan 3D Disturbance thickness pada permukaan bodi kelengkungan kuat dengan  $\alpha= 4^\circ$ .

Penambahan FFST pada bodi asimetris dengan kelengkungan (*camber*) kuat dibuktikan bahwa perubahan struktur aliran sekunder antara dengan dan tanpa semakin tampak perbedaannya dibandingkan dengan kelengkungan standard. Pada gambar 4-44 diperlihatkan bahwa penambahan FFST pada bidang tumpu secara konsisten terhadap posisi FSP selalu semakin menjauhi *leading edge*, sehingga *3D separation line* selalu membuka dan menjauhi kontur bodi. Hal ini disebabkan secara konsisten oleh momentum lemah di awal *leading edge* dan desakan aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* yang kuat ketika digunakan

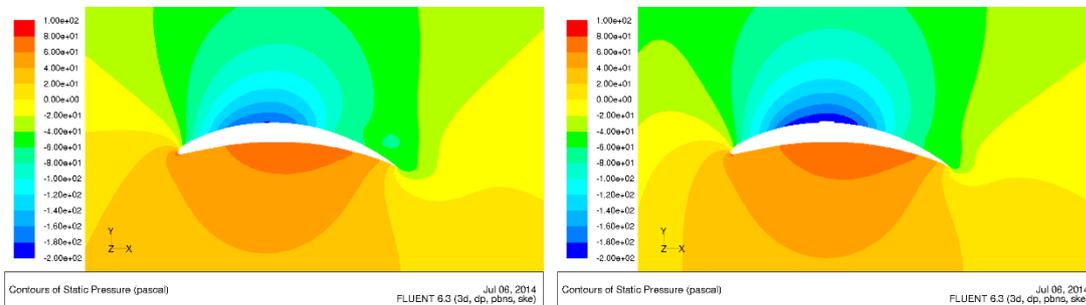
FFST pada bidang tumpu. Desakan aliran didalam formasi selalu berasal dari posisi *end stagnation point*.



Gambar 4-44 Perbandingan eksperimen dan numerik topologi aliran sekunder pada  $\alpha = 4^\circ$ .

Pada daerah *lower side* dihasilkan *3D separation line lower* yang semakin menuju *lower side* sehingga mudah *reattach* menuju *downstream*. Sedangkan aliran di dalam formasi memiliki komponen aliran *attached* yang selalu dimulai dari *end stagnation point* sebagai terindikasi oleh perbedaan tekanan antara *lower* dan *upper side* menjadi *curl flow*. Peningkatan kelengkungan bodi menyebabkan intensitas terbentuk *curl flow* semakin kuat pada ujung *trailing edge*. Hal ini disebabkan oleh peningkatan perbedaan tekanan antara *lower side* dan *upper side*, sehingga aliran yang bergerak di antara daerah semakin kuat. Peristiwa ini indentik dengan peningkatan  $\alpha$ . Peningkatan tekanan perbedaan antara dua daerah

tersebut diperlihatkan pada gambar 4-45. Namun intensitas *curl flow* lebih meningkat dibandingkan dengan kenaikan  $\alpha$ .

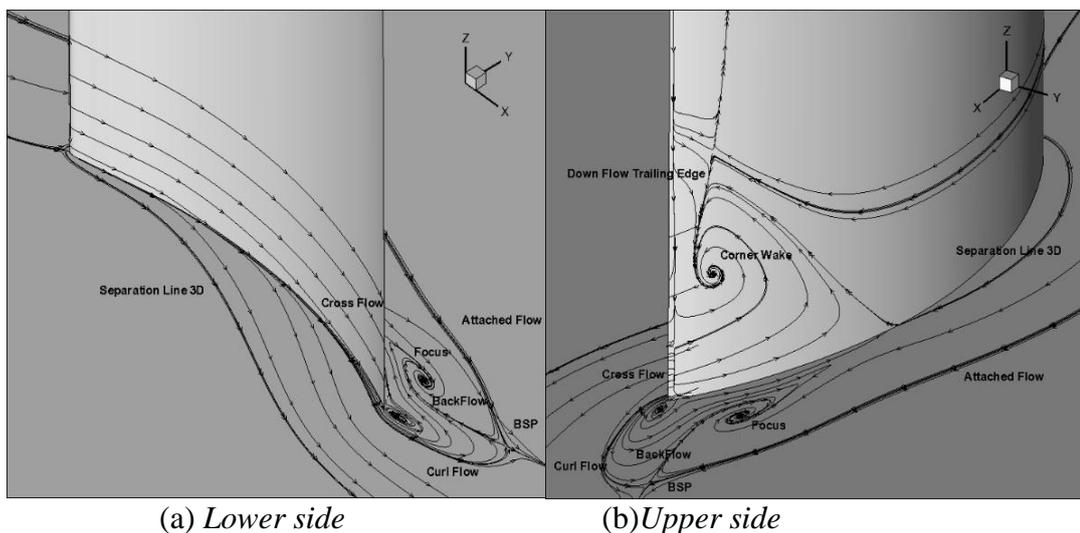


Without FFST  
 Gambar 4-45 Distribusi tekanan statis pada bodi kelengkungan kuat dengan  $\alpha=4^\circ$ .

Karakteristik aliran sekunder sangat kompleks, oleh karena itu perlu dilakukan analisa fundamental pada setiap sisi antara *lower* dan *upper side*. Pada gambar 4-46 diperlihatkan struktur aliran sekunder 3D melalui pandangan downstream. Pada FSP dihasilkan *3D separation line* menuju *lower* dan *upper side*, dimana pada *3D separation line lower side* aliran menuju *down stream* kemudian mampu *attach* sehingga aliran pulih kembali tidak mempengaruhi aliran di dalam formasi. Sedangkan pada aliran separasi 3D *upper side* tidak mampu bergerak menuju *downstream*, terseparasi semakin hebat bergabung membentuk *corner wake*. Pada sisi *lower side attached flow* di dalam formasi yang selalu berasal dari titik akhir stagnasi dekat bodi mudah terintimidasi membentuk *curl flow*. Dimana *curl flow* merupakan aliran yang *melintas* dari *lower side* menuju *upper side* akibat perbedaan tekanan. Selain itu aliran yang melintasi bodi *lower side* menjadi *cross flow* kemudian bergabung dengan *curl flow* sehingga intensitasnya semakin membesar.

Pada *upper side curl flow* menjadi *attached flow* sehingga bertumbukan dengan *attached flow* luar formasi *horseshoe vortex* pada *backward saddle point* (BSP). Titik *saddle point* dihasilkan dua *separation line*, salah satu bergerak menuju *downstream* dan kembali *attached* menjadi aliran sehat. Sedangkan *separation line* yang lain menjadi aliran *backflow* dimana aliran bergerak dari

BSP menuju *upstream* berlawanan dengan aliran primer. Desakan dari *backflow* menyebabkan bagian dalam *attached flow* yang bertumbukkan dengan *curl flow* membentuk *focus* di daerah *corner*. Dimana *focus* merupakan aliran vortex yang berpusar dengan tidak ada arah garis tangensial pada vector kecepatan menurut penjelasan Tobak dan Peake [2]. Pada daerah *downstream* didapatkan dua pusaran di bidang tumpu yaitu *focus* dan *curl flow*. Pusaran ini bergerak menuju *midspan* kemudian bermuara di *corner wake*. Selain itu *corner wake* semakin kuat akibat injeksi aliran lemah dari *separation 2D* bergerak menjadi *down flow* tepat pada *trailing edge*. Sehingga hasil fenomena ini memperkuat bahwa *separation 3D* besar dampak penyumbatan aliran dibandingkan dengan *separation 2D*.

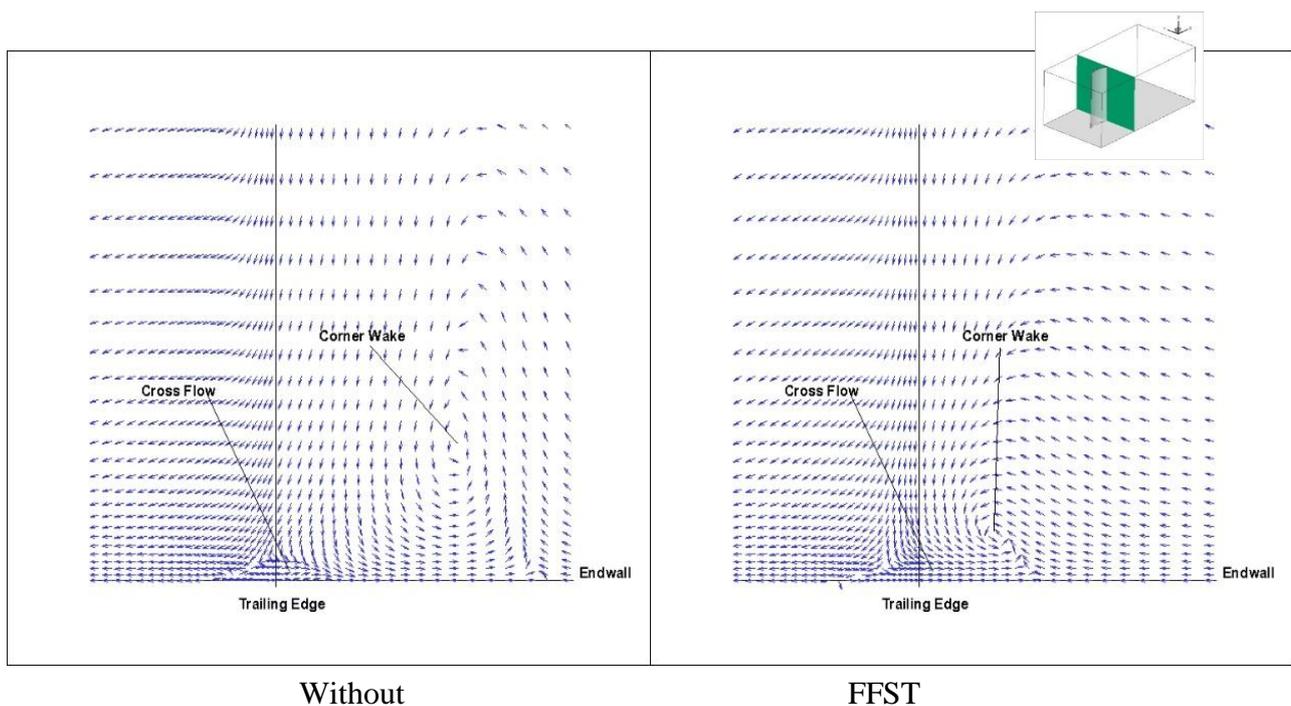


Gambar 4-46 Karakteristik aliran sekunder pada daerah *downstream*.

Pada gambar 4-47, diperlihatkan vektor kecepatan pada bidang mendatar arah aksial di daerah *downstream*. Aliran yang melintasi bodi di sisi *lower side* di atas bidang tumpu bergerak menuju *trailing edge* pada *upper* membentuk aliran *cross flow* di dekat *corner trailing edge*. Aliran ini berdampak terhadap intensitas *curl flow* semakin meningkat seiring dengan bergabung dengan *cross flow*. Setelah bergabung dengan *curl flow* aliran tersebut bergabung dengan *corner wake* dan membentuk *streamwise* menuju *downstream*. Pergerakan *streamwise* tersebut mengikuti bentuk teori *limiting streamline* yang dikemukakan oleh Tobak

dan Peake [2], bergerak menjauhi bidang tumpu kemudian kembali *attached* dan pih di daerah *downstream*.

Aliran tanpa FFST menyebabkan intensitas terjadi *cross flow* di daerah *downstream* semakin dasyat karena disebabkan oleh aliran dari *lower side* dan *down flow* pada daerah *upperside* bergabung pada *trailing edge lower side*. Sedangkan penambahan FFST menyebabkan aliran dari *down flow upperside* tidak mampu bergabung dengan aliran dari bodi *lower side* menjadi *curl flow*. Akibat desakan dari *cross flow* semakin kecil ditambah aliran *attached flow* yang kuat di dalam formasi melalui titik akhir stagnasi menyebabkan posisi *corner wake* semakin dekat dengan bodi dan menuju *corner*, perbandingan tersebut diperlihatkan pada gambar 4-48

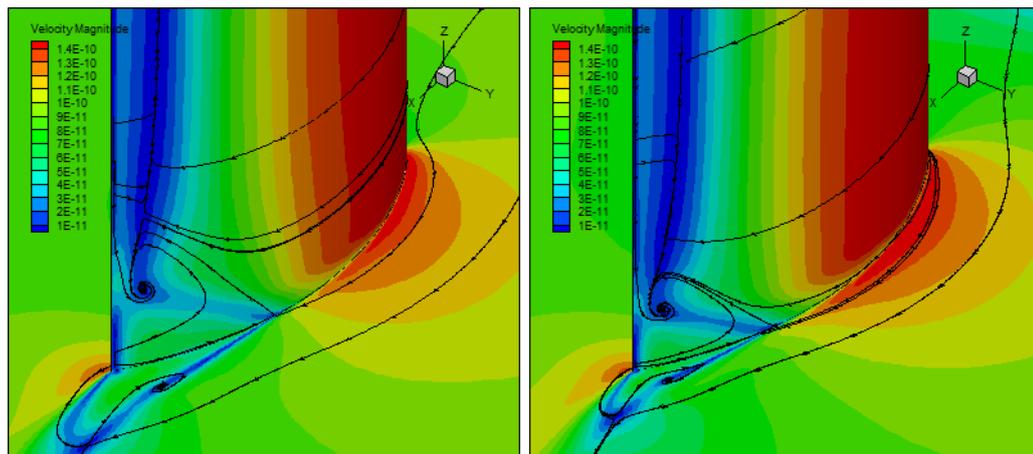


Gambar 4-47 Perbandingan Kontur vektor kecepatan pada daerah *downstream* tanpa dan dengan FFST.

Penambahan FFST menunjukkan bahwa terjadi *curl flow* tampak semakin lemah. Hal ini disebabkan oleh *attachment line* yang kuat di dalam formasi *horseshoe vortex*, sehingga aliran lebih cenderung bergerak menuju *downstream*

dibandingkan terintimidasi oleh perbedaan tekanan antara *lower* dan *upper side*. Selain itu Ketika *curl flow* semakin lemah bertemu dengan *attach flow* diluar formasi *horseshoe vortex* di *backward saddle point* dihasilkan *backflow* yang lemah kemudian. Hal ini berdampak terhadap melemahnya *focus* yang terjadi di *corner*. *Focus* tersebut terjadi akibat terperangkapnya *attach flow* oleh *back flow* sehingga aliran *focus* yang berbentuk vortex bergerak menuju *midspan* dan bergabung dengan *separasi aliran* menjadi *corner wake*.

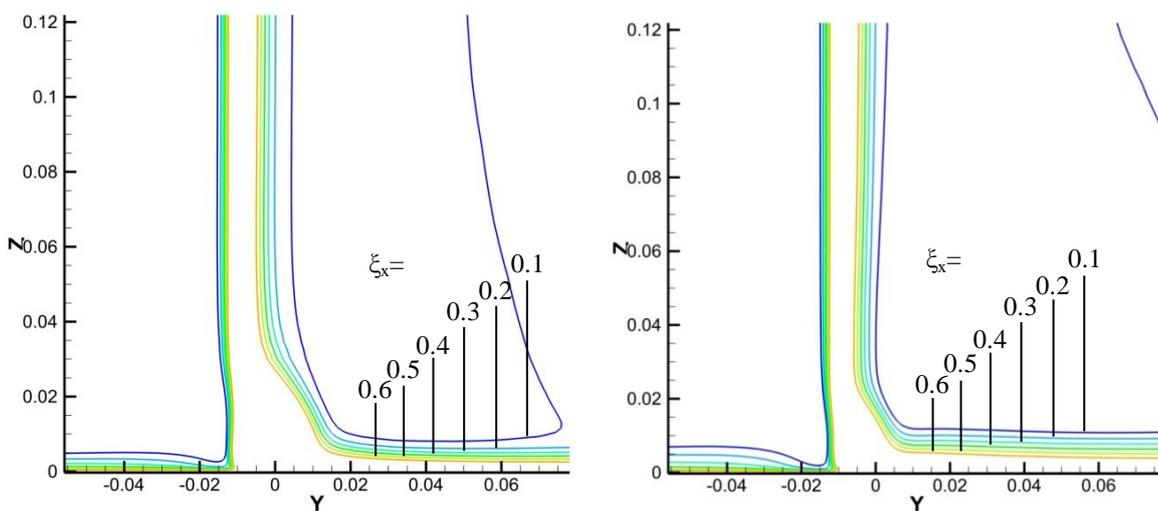
Tampak bahwa *corner wake* akibat penambahan FFST lebih kecil dibandingkan tanpa FFST. Hal ini menyebabkan *blockage* di daerah *corner* semakin tereduksi sehingga aliran memiliki komponen ke arah aksial semakin kuat sehingga daerah penyumbatan semakin kecil. Horclock dan Lakminarayana menyatakan bahwa dengan upaya mereduksi terjadi *blockage* berdampak langsung terhadap kerugian energi dalam saluran *blade* kompresor aksial.



Without FFST  
Gambar 4-48 *Corner wake* di daerah *downstream* pada  $\alpha=4^\circ$ .

Pada gambar 4-49 diperlihatkan distribusi kontur *axial pressure loss coefficient* di daerah *downstream*. Penambahan FFST menyebabkan konsentrasi kerugian energi di daerah *corner trailing edge* terlihat lebih menyempit dipaparkan dari nilai maksimum *axial total pressure loss coefficient* semakin sempit. Selain itu pada daerah *upper side* daerah minimum *axial pressure loss* semakin luas sehingga di indikasikan bahwa konsentrasi *blockage* di daerah tersebut semakin kecil apabila menggunakan FFST. Kerugian energi akibat

penambahan FFST sangat terlihat pada daerah *corner trailing edge*, dimana daerah tersebut merupakan daerah terjadi *corner wake* yaitu tempat muara semua vortex di dalam formasi *horseshoe vortex*. Namun kerugian pada daerah dekat bidang tumpu di *upper side* terlihat meningkat hal ini disebabkan bahwa ketebalan *boundary layer* dengan FFST mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Ketika *boundary layer* dibandingkan dengan *shape factor* perbandingan antara *disturbance thickness* dan *momentum thickness* memiliki nilai yang lebih besar, terbukti lebih mampu mereduksi terjadi *corner wake* di daerah *trailing edge*.



Without

FFST

Gambar 4-49 Axial Pressure Loss Coefficient di daerah *downstream* pada  $\alpha = 4^\circ$ .

#### 4.6.1 Dampak Peningkatan $\alpha$ Pada Bodi Kelengkungan Kuat.

Peningkatan  $\alpha$  tidak menyebabkan pergeseran posisi ESP dan  $3D-\delta$ . Namun faktor ini menyebabkan pergerakan *forward saddle point* semakin bergeser menuju *lower side* dan semakin menjauhi bodi kontur. Hal ini menyebabkan perbedaan lintasan antara *lower* dan *upper side*, sehingga pada *lower side* aliran mengalami perlambatan menyebabkan terjadinya kenaikan tekanan. Sedangkan pada *upper side* aliran mengalami beban yang sangat berat ketika melewati *noise bodi* sehingga dibutuhkan akselerasi yang tinggi

menyebabkan tekanan mengalami penurunan drastis. Hal ini menyebabkan kenaikan penurunan tekanan di *lower side*. Semakin besar peningkatan  $\alpha$  menyebabkan perbedaan tekanan semakin meningkat.

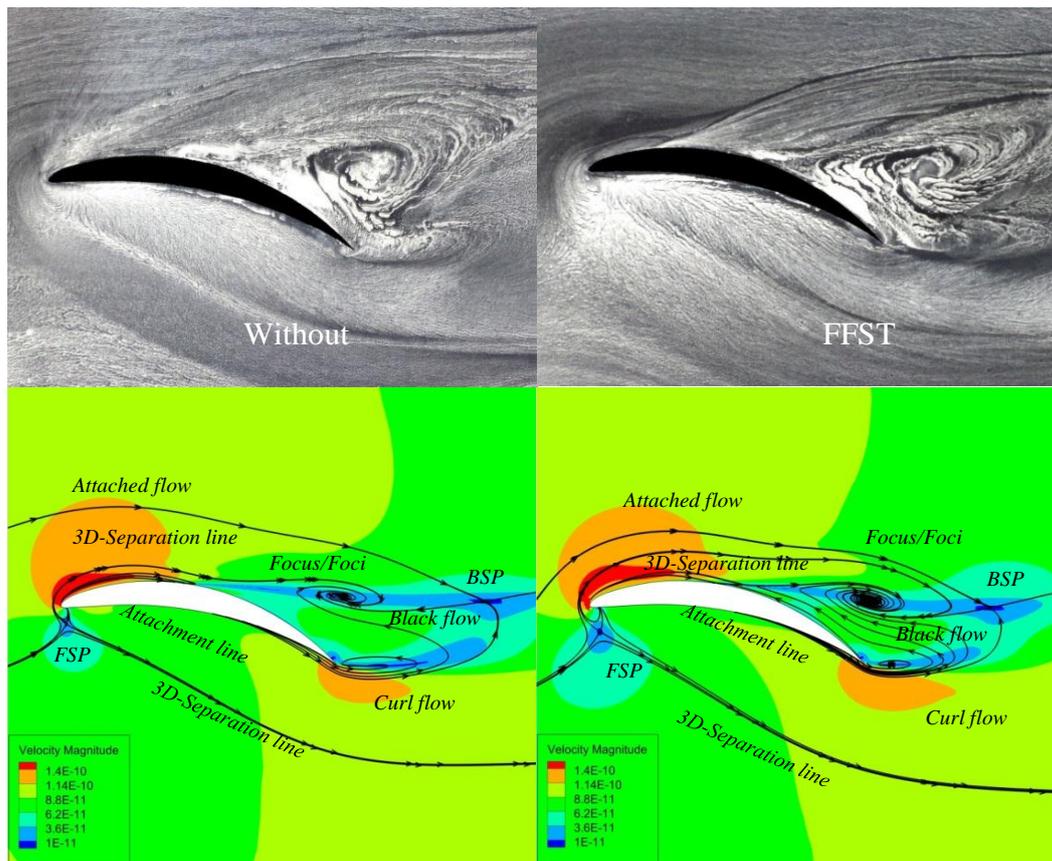
Peningkatan  $\alpha$  berdampak terhadap pembesarnya intensitas terjadi formasi *horseshoe vortex* sehingga *3D separation line* semakin membuka dan menjauh dari kontur bodi. Fenomena semakin kuat intensitas formasi *horseshoe vortex* berdampak terhadap *blockage* yang terjadi semakin kuat sehingga kerugian energi semakin besar.

Peningkatan perbedaan tekanan antara *lower* dan *upper side* berdampak terhadap semakin menguatnya *curl flow* yang disebabkan *attach flow* di dalam formasi lebih terdesak oleh beda tekanan dibandingkan menuju *downstream*. Peningkatan *curl flow* berdampak terhadap posisi terjadinya *backward saddle point* semakin menjauh dari kontur bodi menuju *downstream*. Hal ini menyebabkan daerah yang dilintasi *backflow* yang merupakan produk dari BSP semakin besar sehingga *focus* semakin kuat.

Pembuktian *curl flow* semakin kuat menyebabkan intensitas *backflow* semakin kuat sehingga terbentuk *focus* semakin hebat diperlihatkan pada gambar 4-50 dengan sudut  $12^\circ$ . Selain itu Mirmanto dan Sasongko [4] menyatakan peningkatan  $\alpha$  menyebabkan posisi FSP semakin menuju *lower side* sesuai dengan hasil eksperimen dan simulasi numerik pada gambar 4-50.

Penambahan FSST pada bidang tumpu menyebabkan posisi *end stagnation point* semakin menjauh dari bidang tumpu sehingga semakin menuju daerah *inviscid flow*. Fenomena ini diindikasikan bahwa aliran di daerah tersebut selalu memiliki energi yang lebih besar sebab tidak tereduksi oleh efek friksi. Oleh karena ini fenomena tersebut menyebabkan perubahan struktur aliran sekunder disekitar bidang tumpu terhadap kenaikan  $\alpha$ .

Penambahan FFST berdampak terhadap posisi FSP semakin menjauhi *leading edge* dan semakin menuju *lower side*. Selain itu *3D separation line* terlihat semakin membuka dan menjauhi kontur bodi, hal ini disebabkan desakan aliran di dalam *horseshoe vortex* lebih kuat pada penambahan FFST di bidang tumpu.



Gambar 4-50 Perbandingan eksperimen dan numerik struktur aliran sekunder pada  $\alpha 12^\circ$ .

Efektifitas penggunaan FFST pada kelengkungan dan  $\alpha$  yang semakin kuat dihasilkan perbedaan struktur aliran sekunder yang cukup signifikan. Hal ini membuktikan bahwa teori tentang aliran dengan intensitas turbulensi yang kuat menyebabkan perubahan perilaku struktur aliran sekunder. Sehingga prediksi awal penelitian ini tentang reduksi energi melalui peningkatan intensitas turbulensi telah terbukti melalui beberapa variasi bodi dalam bentuk perbedaan kelengkungan.

Perubahan struktur aliran sekunder tanpa dan dengan FFST seiring peningkatan  $\alpha$ , antara lain:

a) *Forward Saddle Point* semakin menjauh dan menuju *lower side*.

Peningkatan  $\alpha$  menyebabkan pergerakan posisi FSP semakin menuju *lower side*, ketika digunakan FFST dampak pergerakan tersebut semakin meningkat. *3D separation line* akibat FSP seiring dengan peningkatan  $\alpha$  bergerak semakin terbuka dan menjauhi kontur bodi, hal ini semakin kuat seiring peningkatan  $\alpha$ . Selain itu luasan frontal area seiring dengan peningkatan  $\alpha$  semakin besar sehingga daerah tekanan stagnasi semakin luar, sehingga desakan *attached flow* didalam formasi semakin kuat sehingga FSP semakin menjauh dan menuju *lower side*.

b) *3D separation line* semakin terbuka dan menjauhi kontur bodi.

Pergeseran posisi FSP dipertegas dengan semakin terbuka dan menjauh *3D separation line* kontur bodi. Pada sisi *lower side 3D separation line* lebih mudah bertemu dengan aliran di luar formasi sehingga lebih mudah *attached* menyebabkan semakin mudah bergerak menuju *downstream*. Sedangkan pada posisi *upper side 3D separation line* penambahan FFST berdampak terhadap penguatan *3D separation line* sehingga dampak dari luar formasi semakin terbandung.

c) Reduksi intensitas *curl flow*.

*Attachment line lower side* menuju *downstream* berdampak terhadap terjadinya *curl flow* akibat perbedaan tekanan antara *lower side* dan *upper side*. Peningkatan  $\alpha$  semakin memperkuat perbedaan tekanan tersebut sehingga *curlflow* semakin hebat, namun seiring penggunaan FFST maka terjadinya *curl flow* terinduksi akibat *attachment line* yang kuat akibat konvergi intensitas turbulensi secara berangsur-angsur menjadi momentum di daerah *downstream*. Dampak tersebut semakin kuat dikarena di daerah *lower convergence steam tube* semakin besar.

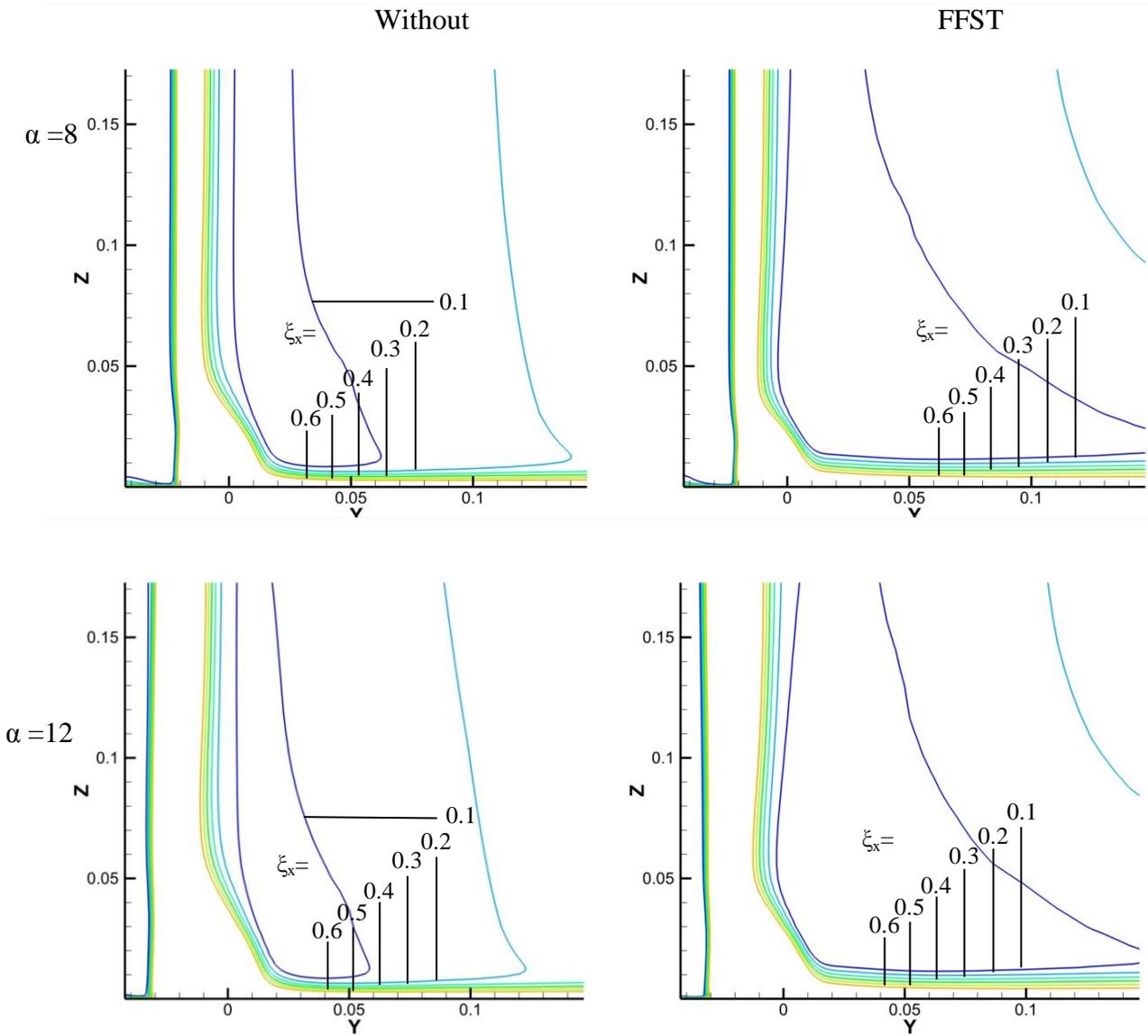
d) *Backward Saddle Point* semakin mendekati bodi kontur.

Akibat intensitas *curl flow* semakin kuat maka terjadinya *backward saddle point* semakin menuju *upstream* sehingga mendekati daerah sekitar bodi. Pergerakan *curl flow* ini mengintimidasi lebih mengarah bertemu dengan komponen aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* sehingga terjadi BSP. BSP pada bidang tumpu dengan FFST lebih mudah bertemu dengan komponen aliran lebih dekat kontur bodi yang memiliki momentum yang lebih lemah. Hal ini menyebabkan posisi BSP semakin bergerak mendekati kontur bodi, sehingga terjadi *backflow* semakin lemah yang berdampak terhadap terjadinya focus.

e) Reduksi intensitas *backflow* .

Peristiwa lemahnya intensitas *backflow* berdampak terhadap tertunda separasi aliran di sekitar bodi dan memperkecil terjadinya *corner wake*. Hal ini disebabkan bahwa *corner wake* merupakan tempat muara terjadi semua *vortex* didalam formasi *horseshoe vortex*. Fenomena *back flow* semakin melemah disebabkan oleh reduksi *curl flow* akibat komponen *attach flow* di dalam formasi semakin kuat yang diawali dari *end stagnasi point*.

Kerugian energi yang dihasilkan oleh FFST pada bidang tumpu secara konsisten terjadi pada bodi dengan kelengkungan kuat. Seiring dengan peningkatan  $\alpha$  efektifitas reduksi kerugian energi masih tampak, hal ini diperlihatkan pada distribusi *axial total pressure loss coefficient*  $\alpha = 8^\circ$  dan  $12^\circ$  yang dipaparkan pada gambar 4-51. Dimana kontur *axial total pressure loss coefficient* semakin kecil di daerah *corner* dan meluasnya daerah kontur minimum di daerah *upper side*. Hal ini mengindikasikan FFST masih mampu digunakan mereduksi kerugian energi pada  $\alpha = 12^\circ$  pada  $\alpha$  yang besar. Fenomena ini diindikasikan bahwa penurunan daerah maksimum di daerah *corner* semakin kecil seiring peningkatan  $\alpha$ , hal ini mengindikasikan bahwa dengan peningkatan  $\alpha$  efektifitas FFST semakin berkurang. Selain itu meskipun perubahan struktur aliran semakin kuat namun kerugian energi semakin kecil hal ini disebabkan semakin rumit aliran sekunder pada  $\alpha$  yang kuat.



Gambar 4-51 Distribusi axial total pressure loss coefficient

Pada tabel 4-6 diperlihatkan bahwa distribusi penggunaan FFST dalam mereduksi kerugian energi di daerah *downstream* maksimum pada sudut  $12^\circ$ , sedangkan untuk  $\alpha=16^\circ$  penggunaan FFST masih tidak efektif. Hal ini disebabkan bahwa *massive separation* terjadi pada sudut tersebut sehingga sulit diprediksi keberhasilan apabila menggunakan simulasi numerik dengan model *steady state*. Fenomena ini pada beberapa penelitian sebelumnya disarankan menggunakan model *large eddies simulation* yang sering digunakan pada kondisi *massive separation*. Selain itu efektifitas penggunaan FFST pada seiring dengan peningkatan  $\alpha$  semakin kecil. Sedangkan pada  $\alpha= 4^\circ$  dan  $8^\circ$  kinerja penggunaan FFST memiliki efektifitas yang sama, hal ini tidak terjadi pada kondisi kelengkungan standard.

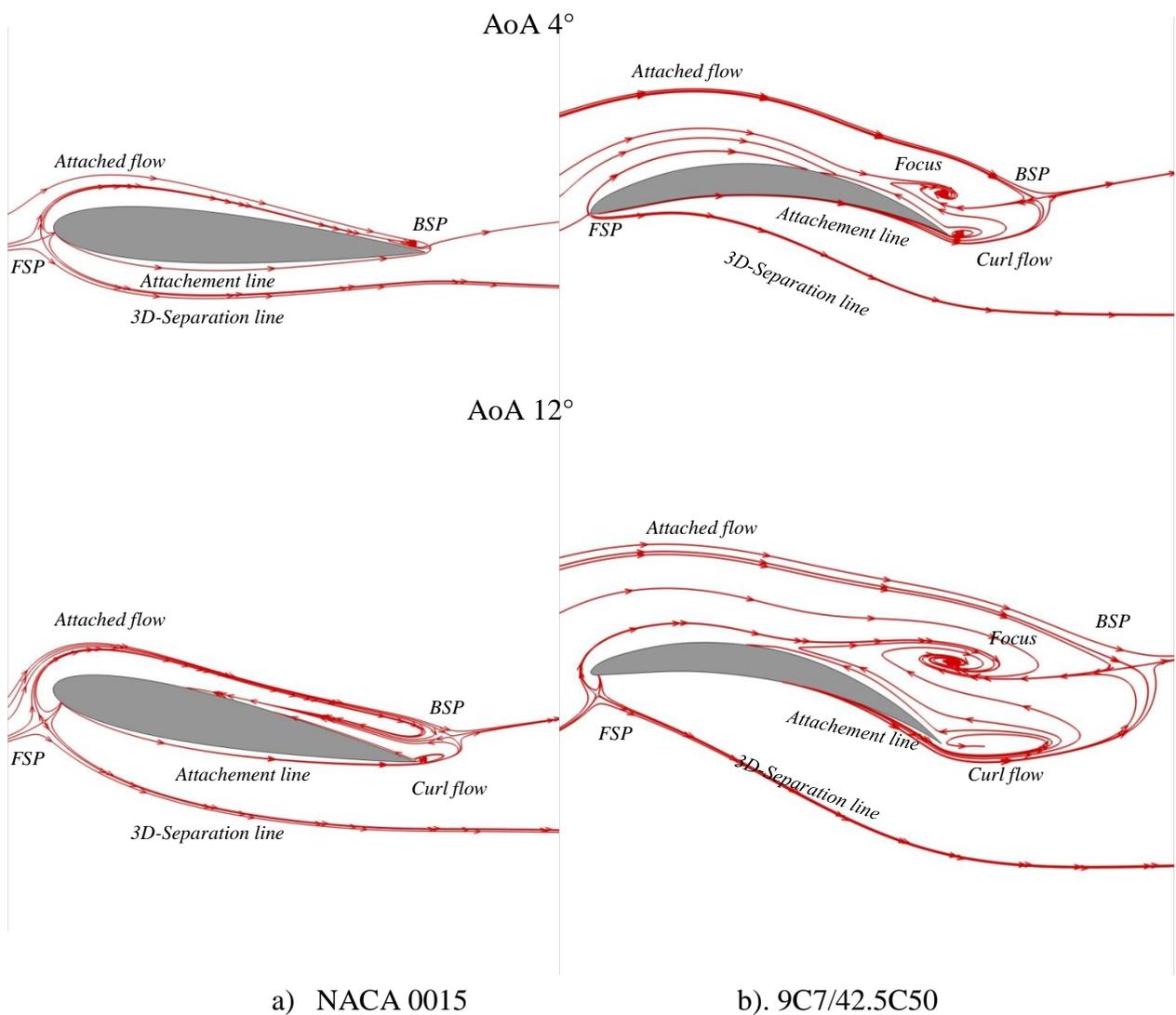
Tabel 4-6 *Axial total pressure loss coefficient* pada bodi kelengkungan kuat

Bidang Tumpu	$\alpha$	Axial Total Pressure Loss Coefficient	%
Without	$0^\circ$	0.27	
FFST	$0^\circ$	0.22	-18.52%
Without	$4^\circ$	0.23	
FFST	$4^\circ$	0.20	-13.04%
Without	$8^\circ$	0.23	
FFST	$8^\circ$	0.2	-13.04%
Without	$12^\circ$	0.26	
FFST	$12^\circ$	0.24	-7.69%
Without	$16^\circ$	0.28	
FFST	$16^\circ$	0.31	10.71%

#### 4.7 Pengaruh $\alpha$ (*angel of attack*) dan Kelengkungan Bodi (*camber*)

Pada aliran sekunder di dekat bidang tumpu memiliki dampak kuat oleh variasi  $\alpha$  dan kelengkungan bodi. Hal ini diperlukan analisa yang mendasar untuk mengetahui dampak secara langsung terhadap karakteristik aliran sekunder khusus pada daerah dekat bidang tumpu. Kedua faktor tersebut memiliki fungsi yang sama yaitu untuk meningkatkan *lift*, namun selalu diiringi terjadi peningkatan *drag* menurut teori airfoil 2D. Oleh karena itu analisa fundamental sangat

diperlukan untuk mengetahui faktor yang paling efektif menghasilkan *lift* yang besar dan *drag* yang kecil. Airfoil yang berada di dekat bidang tumpu lebih rentang terhadap terjadi penyumbatan aliran dibandingkan dengan daerah *midspan*. Sehingga pengaruh  $\alpha$  dan kelengkungan bodi sangat riskan terjadinya penyumbatan aliran fluida akibat aliran sekunder. Perbandingan karakteristik aliran sekunder akibat peningkatan  $\alpha$  dan *camber* diperlihatkan pada gambar 4-52.



Gambar 4-52 Perbandingan Karakteristik Aliran Sekunder Terhadap Peningkatan  $\alpha$  dan *camber*.

Variasi  $\alpha$  dibandingkan 4° dan 12°, sedangkan kelengkungan menggunakan bodi simetris NACA 0015 dan British 9C7/42.5C50 (*camber* kuat). Hasil ditunjukkan bahwa Peningkatan  $\alpha$  pada bodi simetris menunjukkan bahwa

posisi *forward saddle point* bergerak menuju *lower side* dan dihasilkan *3D separation line* semakin terbuka dan menjauh dari kontur bodi. Selain itu peningkatan  $\alpha$  berdampak terhadap perbedaan tekanan antara *lower* dan *upper side* semakin meningkat sehingga terbentuk *curl flow* di daerah buritani (*down stream*) kuat. Terbentuk *curl flow* selalu dihasilkan oleh *attachment line lower side*, dimana aliran selalu bergerak dari tekanan tinggi (*lower side*) menuju tekanan rendah (*upper side*). Pada  $\alpha$  kuat intensitas terjadi formasi *horseshoe vortex* semakin kuat sehingga berdampak terhadap *3D separation line* semakin menjauh dari kontur bodi.

Pada sisi *upperside 3D separation line* semakin mudah untuk *reattachment* pada bodi simetri. Hal ini disebabkan *separation line* yang menjauh dari kontur bodi mudah bertemu dengan *attached flow* di luar formasi, sehingga *3D separation line* memiliki kecenderungan lebih memiliki injeksi energi yang lebih besar. Pada bodi simetri ketika diberikan  $\alpha$  *curl flow* lebih memungkinkan bertemu dengan *3D separation line* yang kecenderungan mampu *attached* dibandingkan dengan aliran diluar formasi.

Karakteristik aliran sekunder selalu menunjukkan bahwa pertemuan aliran *curl flow* dengan aliran lain di *backward saddle point* selalu dihasilkan *back flow* yang menyebabkan penyumbatan di daerah aliran 3D. Pada bodi simetris  $\alpha$  yang besar terlihat bahwa *curl flow* bertemu dengan *3D separation line* yang kembali *attached*, peristiwa ini menjelaskan bahwa dominasi kekuatan dari dalam formasi lebih kuat. Peningkatan *curl flow* seiring dengan peningkatan  $\alpha$  menyebabkan bergesernya posisi *backward saddle point* bergerak semakin menjauh dari bodi dan menuju *downstream*, sehingga *back flow* yang dihasilkan semakin kuat yang berdampak langsung pada terbentuk *corner wake*.

Sedangkan pada bodi asimetri dengan kelengkungan kuat, diperlihatkan bahwa *curl flow* yang terjadi semakin menguasai daerah buritan. Hal ini mempertegas bahwa produk yang dihasilkan peningkatan kelengkungan memperkuat intensitas *curl flow*. Hasil semakin tampak seiring dengan peningkatan  $\alpha$ , antara bodi tanpa kelengkungan dan dengan kelengkungan kuat relatif sangat meningkatkan terjadi *curl flow*. Dominasi intensitas *curl flow* yang sangat kuat akibat peningkatan kelengkungan menyebabkan dominasi terjadi

*backflow* semakin kuat. Sedangkan aliran *attached flow* yang terperangkap oleh *back flow* berdampak terhadap munculnya peristiwa *focus*. Fenomena ini memperkuat terjadi *blockage* pada daerah buritan.

Penambahan FFST pada bidang tumpu selalu dihasil *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex* yang memiliki energi yang lebih besar. Hal ini disebabkan bahwa aliran yang masuk di dalam formasi berasal dari titik akhir stagnasi. Dimana memiliki intensitas turbulensi yang kuat kemudian secara berangsur-angsur dikonversikan menjadi kenaikan momentum tempat di daerah buritan. Hasil analisa selalu menunjukkan hasil yang konsisten dimana *3D separation line* selalu lebih terbuka dan menjauhi kontur bodi sehingga komponen di dalam formasi semakin kuat. Oleh karena itu terbentuk *curl flow* semakin kecil seiring meningkatnya momentum di dalam formasi.

*3D separation line* yang bergerak semakin terbuka dan menjauhi kontur bodi akibat menguatnya desakan aliran di dalam formasi, menyebabkan *attached flow* di luar formasi sulit bertemu dengan *curl flow*. Kemungkinan peluang aliran diluar formasi bertemu dengan *curl flow* semakin sulit apabila ditambahkan FFST pada bidang tumpu. Namun pada bodi kelengkungan kuat tidak berlaku karena *3D separation line* tidak mampu bergerak menuju buritan. Ketidakmampuan *3D separation line* menuju *downstream* berdampak aliran tersebut menyebabkan aliran terseparasi dan bermuara di *corner wake*. Akibat ketidakmampuan *3D separation line* menyebabkan *attached flow* pada bodi dengan kelengkungan kuat mengisi daerah kosong di dekat *trailing edge* sehingga bertumbukan dengan *curl flow* di posisi *backward saddle point*. Pertemuan *attached flow* dan *curl flow* yang kuat menyebabkan terjadi *back flow* semakin kuat sehingga dihasil *focus* yang cukup kuat.

Penambahan FFST pada bidang tumpu dapat mereduksi terjadi *attached flow* dan *curl flow*. Dimana *attached flow* melemah disebabkan oleh profil kecepatan dekat dengan bidang tumpu tidak cukup kuat di daerah *upstream*. Sedangkan *curl flow* semakin lemah disebabkan oleh *attachment line* yang berasal dari ESP yang memiliki intensitas turbulensi lebih kuat sehingga dikonversikan menjadi momentum di daerah *downstream*, sehingga aliran memiliki momentum

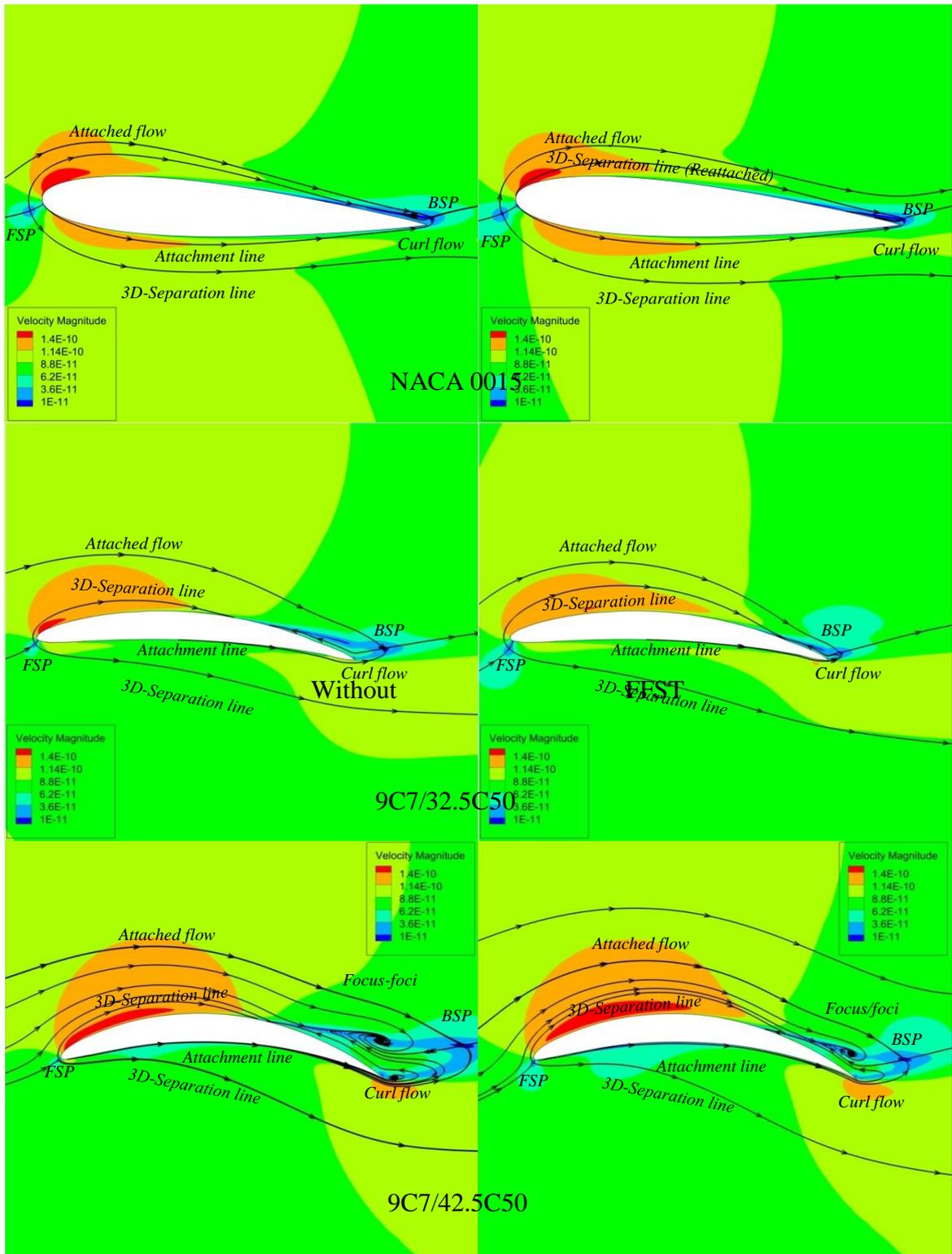
menuju arah aksial semakin besar. BSP dihasilkan aliran *backflow* yang lebih lemah sehingga intensitas terjadinya *focus* semakin kecil.

Peningkatan kelengkungan bodi seperti yang dipaparkan gambar 4-53. perbandingan struktur aliran sekunder. Dimana penambahan FFST pada bidang tumpu menyebabkan kecepatan di daerah *upstream* semakin lemah, namun intensitas turbulensi yang terdalem didalam aliran terkonversi menjadi kecepatan meningkat pada daerah *downstream*.

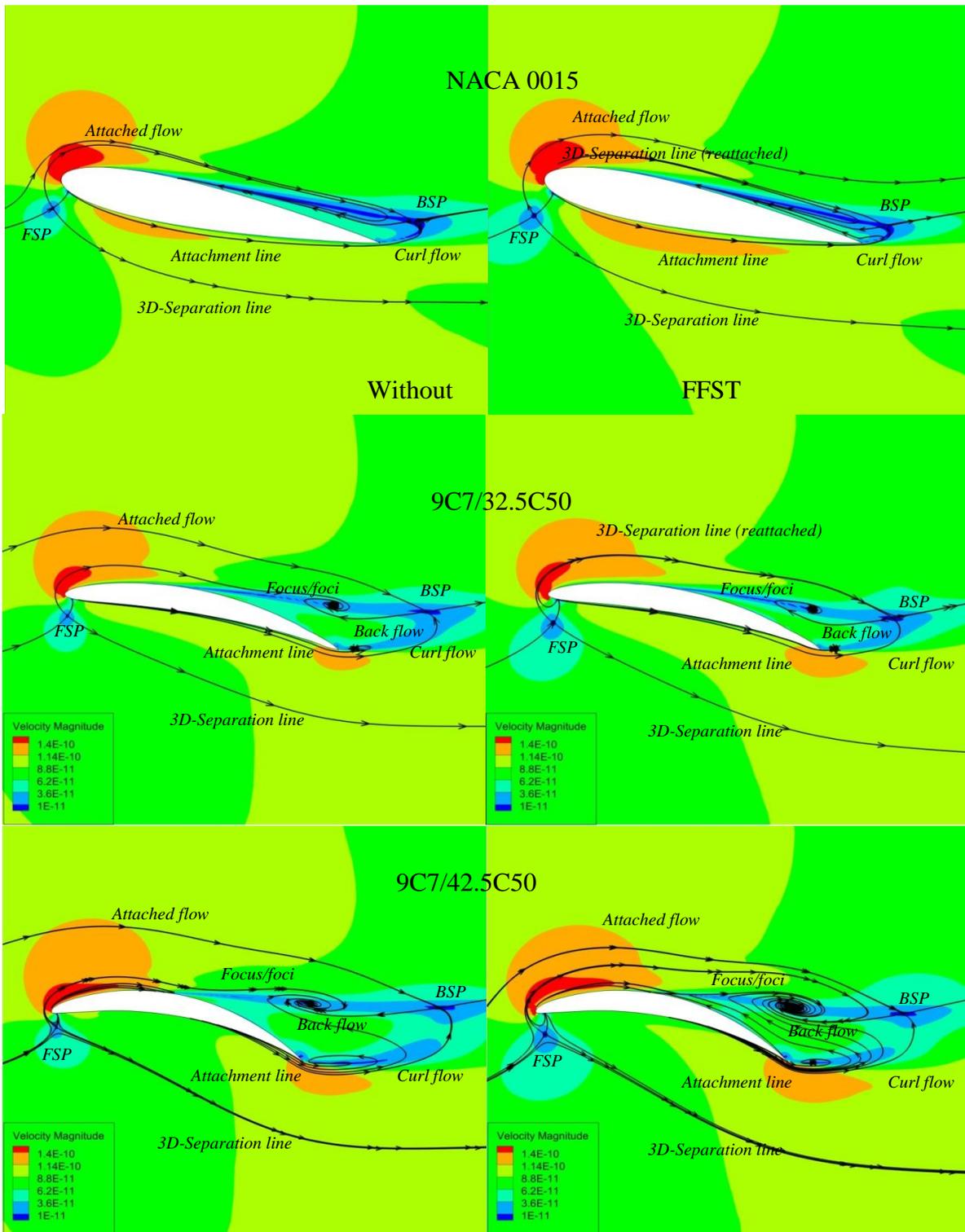
Kecepatan yang rendah pada *upstream* dan semakin kuat *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex* menyebabkan pergerakan *3D separation line* semakin terbuka dan menjauhi bodi. Seiring dengan peningkatan kelengkungan bodi *3D separation line* terlihat semakin terbuka. Selain itu *curl flow* yang semakin kuat seiring dengan peningkatan kelengkungan dapat direduksi melalui penambahan FFST.

Hal ini membuktikan bahwa *attachment line lower side* semakin kuat ketika digunakan FFST. Fenomena ini semakin besar apabila  $\alpha$  diperbesar, hal ini diperlihatkan pada gambar 4-54. Pada bodi asimetris dengan kelengkungan normal *3D separation line upper side* mampu *reattachment*, sedangkan pada kelengkungan kuat *3D separation line* tidak mampu *reattached*. Hal ini ditunjukkan pada tabel 4-7 koefisien aksial kerugian tekanan dimana paling efektif penggunaan FFST mampu mereduksi koefisien paling besar 22% dibandingkan kelengkungan bodi lain. Sedangkan pada  $\alpha = 12^\circ$  efektifitas FFST semakin rendah, hal ini didukung tidak ditemukannya *3D separation line* pada *upper side* yang mampu *reattachment*.

Pada bodi tanpa kelengkungan pada  $\alpha$  besar ditunjukkan peningkatan efektifitas FFST. Peristiwa ini intensitas terjadi *curl flow* sangat kecil dibandingkan dengan bodi yang lainnya. Efektif penggunaan FFST semakin kecil seiring peningkatan kelengkungan secara keseluruhan. Namun peristiwa peningkatan intensitas turbulensi selalu menunjukkan hal yang konsisten, dimana FSP semakin menjauh dari *leading edge* dan *3D separation line* semakin terbuka dan menjauh dari kontur bodi. Sedangkan *corner wake* yang terjadi semakin kecil akibat *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin kuat. Hal ini akibat pengkonversian intensitas turbulensi menjadi kecepatan sepanjang lintasan.



Gambar 4-53 Perbandingan numerik struktur aliran sekunder pada  $\alpha 4^\circ$  pada variasi kelengkungan.



Gambar 4-54 Perbandingan numerik struktur aliran sekunder pada  $\alpha 12^\circ$  pada variasi kelengkungan.

Pada tabel 4-7 diperlihatkan terbentuk *backward saddle point* akibat penambahan  $\alpha$  dan kelengkungan bodi. Pada bodi sedang peningkatan kelengkungan menyebabkan terbentuknya *focus* semakin dampak dan kuat. Bodi dengan tanpa kelengkungan sangat rentang terhadap terjadi separasi apabila  $\alpha$  ditingkatkan. Hal ini disebabkan bodi dengan *camber* lemah memiliki *nose* (bentuk *leading edge*) sejajar dengan panjang *chord*, ketika diberikan  $\alpha$  *3D separation line lower side* menghadap beban yang sangat berat. Peristiwa ini seperti bentuk *leading edge* yang runcing. Sedangkan pada *camber* kuat lebih tangguh terhadap penggunaan  $\alpha$  kuat, disebabkan arah *nose leading edge* semakin menuju arah aliran *free stream*.

Penambahan FFST menyebabkan dominasi aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin kuat, sehingga *curl flow* kemungkinan besar bertemu dengan aliran tersebut membentuk *backward saddle point*. Intensitas terbentuk *backflow* hasil dari *backward saddle point* sangat kuat dihasilkan pertemuan *curl flow* dengan *attached flow*. Tingkatan aliran yang kuat selalu dimulai dengan *attached flow*, *3D separation line* dan *attachment line*. *Attached flow* merupakan aliran diluar *horseshoe vortex* memiliki momentum yang kuat, apabila bertemu dengan *curl flow* di *backward saddle point* menghasilkan *backflow* yang kuat. *Attachment line* merupakan aliran yang berasal dari *end stagnation point* yang berada di dalam formasi *horseshoe vortex*.

Apabila *curl flow* bertemu dengan aliran di luar formasi *horseshoe vortex* berdampak terhadap terjebak semua unsur di dalam formasi menjadi *cornerwake*. Ketika *curl flow* bertemu dengan aliran di dalam *horseshoe vortex* selalu diprediksi menghasilkan *back flow* semakin lemah sehingga *corner wake* semakin kecil. Aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* terdiri dari *3D separation line* dan *attachment line*. Apabila *curl flow* bertemu dengan *attachment line* yang berada di posisi lebih dekat kontur bodi memungkinkan terjadi *3D separation line* mampu *reattachment*, sehingga terjadi *corner wake* semakin lemah.

Penambahan FFST pada kelengkungan yang lebih lemah menyebabkan aliran di dalam formasi lebih kuat dibandingkan dengan kelengkungan kuat. Hal ini disebabkan intensitas *curl flow* semakin kuat seiring semakin kuatnya kelengkungan bodi. *Curl flow* yang semakin kuat mendesak aliran di dalam

formasi *horseshoe vortex* sehingga kemungkinan bertemunya dengan *curl flow* semakin besar.

Tabel 4-7 Terbentuk *backward saddle point*.

AoA	Bodi							
	NACA 0015		9C7/22.5C50		9C7/32.5C50		9C7/42.5C50	
	Without	FFST	Without	FFST	Without	FFST	Without	FFST
0°	AF	AL	AF	AL	AF/F	AF	AF/F	AF/F
4°	AF	AL			AF/F	AF	AF/F	AF/F
8°	AF	AL	AF	AL	AF/F	AF	AF/F	SL3D/F
10°	-	-	-	-	-	-	AF/F	SL3D/F
12°	SL3D	AL	SL3D	AL	AF/F	SL3D/F	AF/F	SL3D/F
14°	-	-	SL3D	AL	-	-	-	-
16°	AF/F	AL/F	AF/F	SL3D/F	AF/F	AL/F	-	-

AF= Attached Flow, AL=Attachment Line, SL=Separation Line, F=Focus.

Dampak reduksi kerugian energi akibat penambahan FFST dipaparkan pada tabel 4-8. Penambahan FFST pada berdampak terhadap reduksi terjadi *corner wake* secara langsung dapat mereduksi kerugian energi di sisi *downstream*. Pada bodi simetris penambahan FFST terlihat efektif akibat penambahan  $\alpha$ , sedangkan bodi dengan 9C7/32.5C50 merupakan reduksi terbaik pada  $\alpha= 4^\circ$ . Pada kelengkungan kuat dan  $\alpha= 16^\circ$  penggunaan FFST tidak mampu mereduksi terjadi kerugian energi sehingga tidak disarankan untuk digunakan pada daerah tersebut.

Tabel 4-8 koefisien *axial total pressure loss*

$\alpha$	$\xi_{axial}(\%)$			
	Bodi			
	NACA 0015	9C7/22.5C50	9C7/32.5C50	9C7/42.5C50
0°	14.78	14.5	15.46	18.52
4°	15.25	11.18	21.9	13.04
8°	15.42	9.35	14.57	13.04
12°	11.35	6.98	11.88	7.69
16°	10.62	5.45	2.1	-10.71

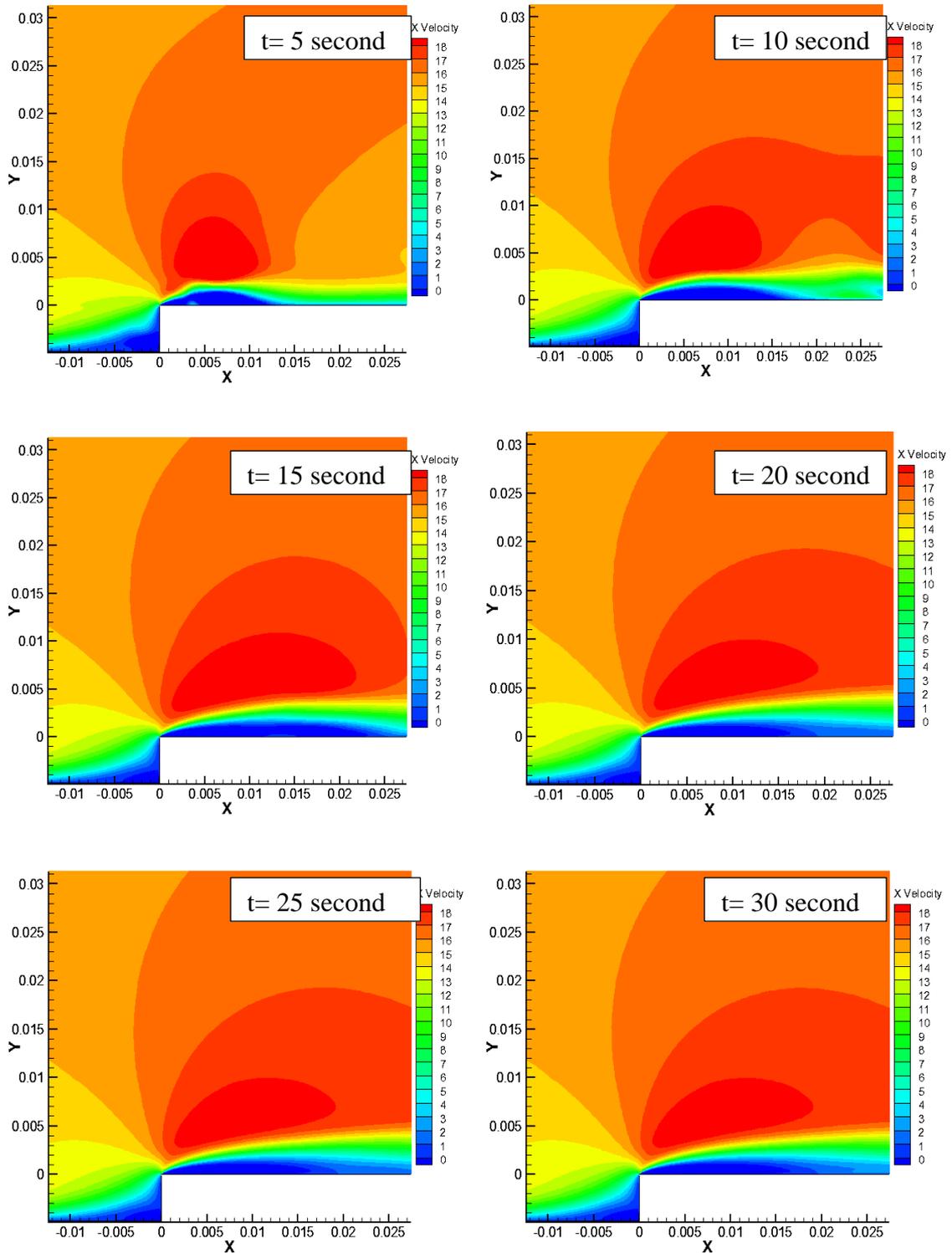
#### 4.8 Evaluasi Simulasi Numerik dengan Model Unsteady state.

Fenomena *bubble separation* hasil dari penambahan FFST menyebabkan *flapping of dividing streamline (low frequency unsteadiness)*, sehingga fenomena ini diperlukan simulasi numerik dengan menggunakan metode *Unsteady state*. Peristiwa tersebut tidak dapat dievaluasi dengan detail apabila hanya menggunakan analisa kondisi *steady state*. Pada analisa sebelumnya dijelaskan peristiwa peningkatan kecepatan setelah aliran mengalami *bubble separation*, padahal ketika aliran mengalami *bubble separation* kecepatan secara dratis mengalami defisit yang sangat besar. Efek lain dari fenomena tersebut terjadinya peningkatan Turbulence Kinetic Energy (TKE) yang merupakan produk dari fluktuasi kecepatan atau intensitas turbulensi yang sangat besar. Kedua hal tersebut merupakan faktor yang sangat erat hubungan namun pada analisa belumlah masih belum memberikan teori tentang fenomena tersebut. Oleh karena itu pada penelitian ini sangat dibutuhkan analisa *unsteady state*, sebab peristiwa *bubble separation* sangat dinamis dan sangat tergantung dari fungsi waktu.

Penelitian ini membandingkan hasil simulasi numerik antara metode *Unsteady Reynolds Average Navier Stoke (U-RANS)* dan *Large Eddies Simulation (LES)*. Pada model viscous RANS digunakan pada kondisi temporal (*time dependent behavior*) dan nilai Reynolds yang tinggi dan geometri yang kompleks. Apabila model ini digunakan pada aliran dengan skala intensitas turbulensi yang kecil, maka model ini tidak dapat digunakan secara langsung namun diperlukan mekanisme penyaringan data. Sedangkan model LES merupakan simulasi dengan *time dependent* menggunakan filter persamaan *Navier Stoke* sehingga tidak membutuhkan proses penyaringan data. Metode ini telah memindahkan filter penyelesaian matematika *Navier Stoke* pada persamaan *eddies*(kumpulan) sehingga persamaan ini disesuaikan dengan ukuran meshing pada simulasi. Oleh karena itu model LES dibutuhkan *meshing* yang sangat banyak khususnya di daerah kritis tanpa mempertimbangkan kualitas *meshing*. Hal ini sangat berbeda dengan metode U-RANS dimana kualitas *mesh* sangat diperlukan untuk diperhatikan dalam proses simulasi.

Hasil simulasi U-RANS dengan menggunakan Reynolds Stress Method (RSM) ditunjukkan pada gambar 4-55. Time step yang digunakan 0.2 detik dan pengambilan datanya dengan internal waktu 5 detik. Fenomena *bubble separation* yang dialami oleh fluida memiliki karakteristik sama dengan Von Karman Vortex. Dimana aliran yang telah terseparasi menggulung (*roll*) semakin lama semakin membesar kemudian terlepas dan bergerak menuju hilir (*downstream*). Hasil simulasi U-RANS tidak mampu mempresentasikan fenomena tersebut, dimana hasilnya hanya memperlihatkan panjang *bubble separation*. Dimana panjang *bubble separation* yang terjadi selalu berubah-ubah sesuai dengan waktu yang digunakan sebagai pengamatan.

Hasil pada periode waktu 5 detik panjang *bubble separation* yang terjadi 0.015 m kemudian seiring bertambahnya waktu mendekati panjang 0.02m. Pada waktu lebih dari 20 detik perubahan panjang *bubble separation* tidak terlalu signifikan. Peristiwa ini menjelaskan bahwa kondisi *steady state* terjadi pada saat waktu lebih dari 20 detik. Hasil simulasi dengan menggunakan U-RANS belum mampu menunjukkan terjadinya fenomena *Von Karman Vortex*. Hasil simulasi U-RANS mendekati hasil simulasi RANS sehingga lebih disarankan untuk digunakan pada kondisi *steady state*. Fenomena aliran sekunder eksperimen *oil flow visualization* dapat dibandingkan hanya dengan menggunakan simulasi *steady state*, sebab kondisi eksperimen memvisualisasikan kondisi *time independent*.



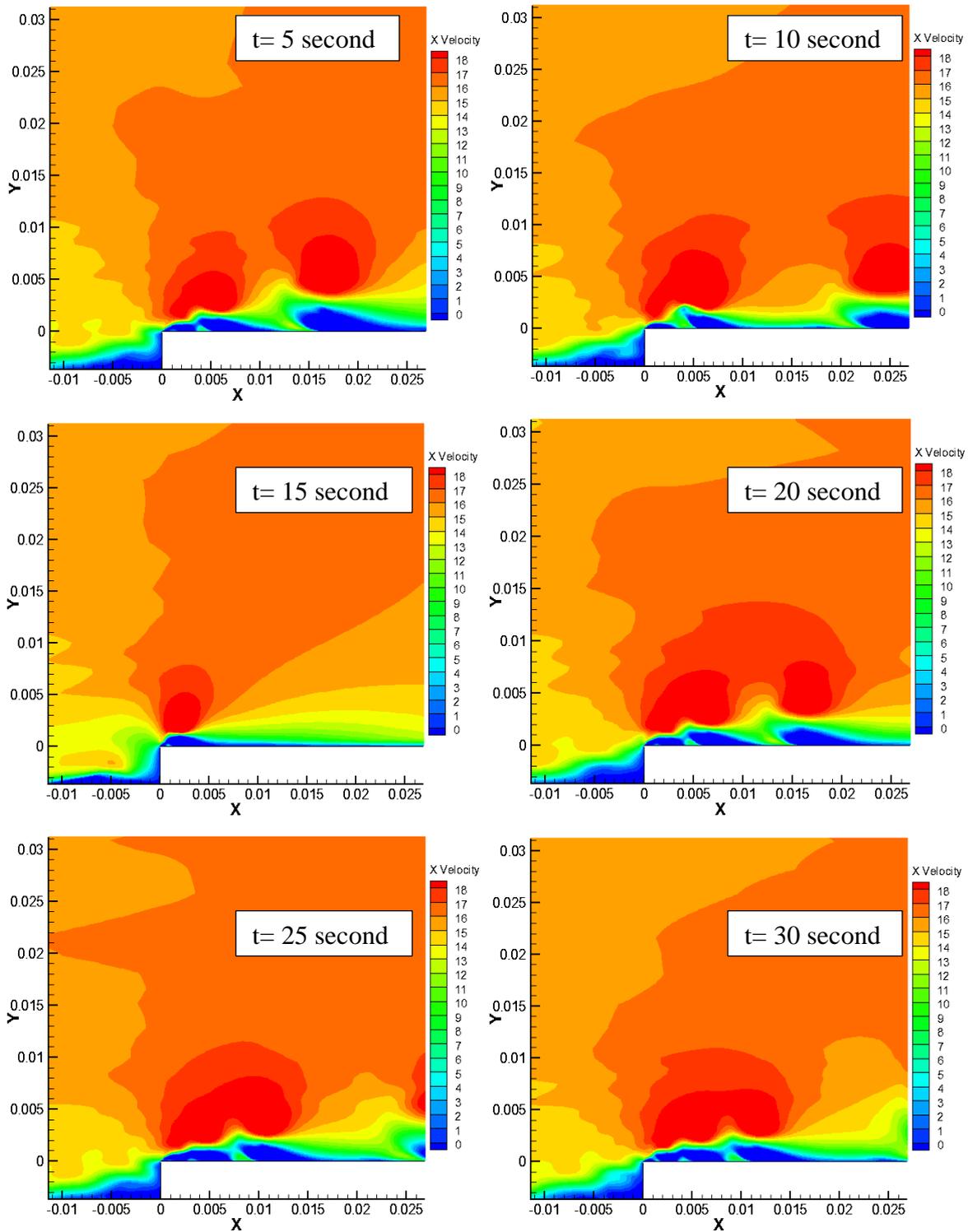
Gambar 4-55 Hasil simulasi URANS-RSM

Hasil simulasi dengan menggunakan model *Large Eddies Simulation* (LES) dipaparkan pada gambar 4-56. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa fenomena *Von Karman Vortex* dapat dipresentasi dengan menggunakan model LES. Durasi waktu (*time step*) yang mempresentasikan gumpalan atau *eddies* yang terjadi sangat kecil, dimana pada waktu 5 detik pergerakan gumpalan tersebut tidak terekam dengan baik sehingga dibutuhkan *time step* yang lebih kecil lagi. Peristiwa terjadi *eddies* ini mempresentasikan bahwa aliran yang terseparasi membentuk sebuah vortex kemudian dimensi *vortex* semakin membesar. Ketika energi yang berpusar tersebut telah mampu melawan efek friksi maka sebagian intensitas pusaran vortex melepaskan diri dari pusaran inti bergerak menuju *downstream*. Peristiwa ini selalu terjadi berulang-ulang, oleh karena itu untuk mengamati peristiwa ini dibutuhkan *time step* simulasi yang sangat kecil. Hal ini membutuhkan *resource* alat komputasi yang memiliki kecepatan yang sangat tinggi dan penyimpanan data yang besar. Sedangkan untuk kajian tentang *axial compressor performance* kondisi yang dievaluasi selalu dikaitkan dengan kondisi operasi kompresor yang selalu terjadi pada kondisi *steady state*. Kemudian hasil eksplorasi eksperimen dengan *oil flow visualization* selalu mempresentasikan kondisi yang *steady state*, sebab mengamati kondisi *unsteady state* membutuhkan eksperimen dengan alat *particle image velocity* (PIV) yang harga sangat mahal dan belum dimiliki oleh laboratorium penelitian ini.

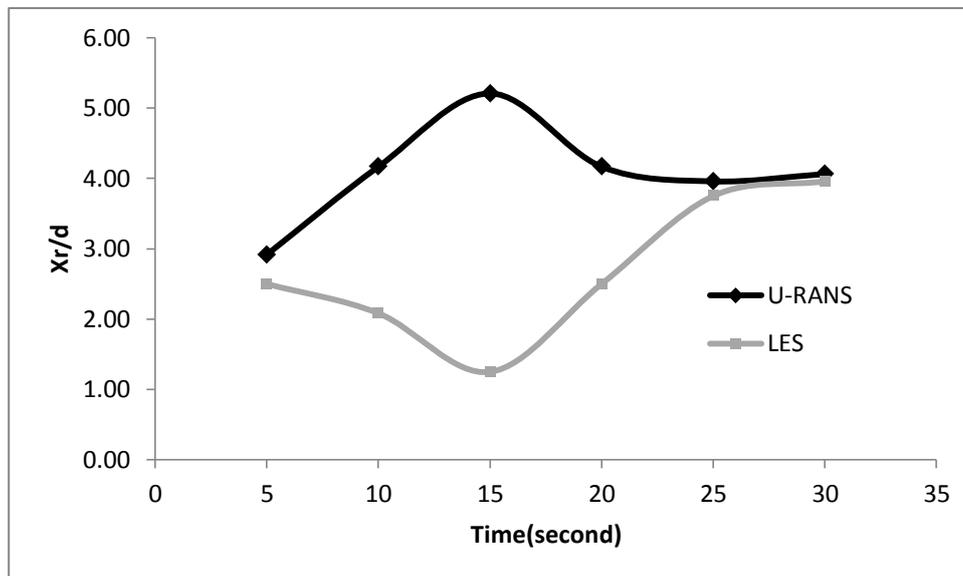
Hasil penggunaan FFST menyebabkan aliran terlihat tidak stabil karena separasi aliran membutuhkan interaksi dengan streamline yang memiliki momentum lebih kuat. Interaksi ini menyebabkan pusaran vortex, seiring dengan bertambahnya waktu pusaran tersebut terlihat semakin membesar dan melepaskan diri dari inti pusaran menuju *downstream*. Fenomena ini hanya terlihat ketika digunakan model viscous LES sedang menggunakan U-RANS tidak tampak. Ketidak stabilan ini biasanya dievaluasi dengan *Pressure spectra* seperti yang dilakukan oleh Yang dan Abdalla [52], dimana penelitian tersebut sangat inten membahas *reattach flow*. Sedangkan penelitian ini hanya lebih inten terhadap perubahan formasi aliran sekunder akibat penambahan FFST, yang diprediksi menghasilkan *reattach flow* yang sangat kuat.

Perbedaan panjang *bubble separation* yang terjadi antara model viscous yang digunakan antara U-RANS dan LES diperlihatkan pada gambar 4-57. Pada awal simulasi sebelum 25 detik hasil U-RANS selalu cenderung mempresentasikan terjadinya *bubble separation* yang selalu *over prediction* sedangkan pada LES selalu *under prediction*. Hal ini menunjukkan metode U-RANS selalu menghasilkan *bubble separation* yang lebih stabil namun tidak sensitif terhadap perubahan dinamika vortex. Fenomena membelahnya vortex pada *bubble separation* tidak tampak ketika menggunakan model viscous URANS, sedangkan pada LES terlihat sangat jelas. Sensitifitas model LES terhadap kejadian vortex lebih tinggi dibandingkan dengan model URANS, sehingga model LES sangat cocok untuk mengamati kejadian perkembangan terbentuknya *bubble separation*. Namun setelah melewati waktu 25 detik, hasil kedua model tersebut menunjukkan mendekati sama. hal ini dipaparkan pada gambar 4-61. Oleh karena itu penggunaan model viscous dengan metode LES hanya digunakan pada kondisi *unsteady state*, sedangkan untuk penelitian ini yang mayoritasnya dilakukan pada kondisi *steady state* masih dapat menggunakan model RANS.

**Sengaja dikosongkan**



Gambar 4-56 Hasil simulasi menggunakan model LES.



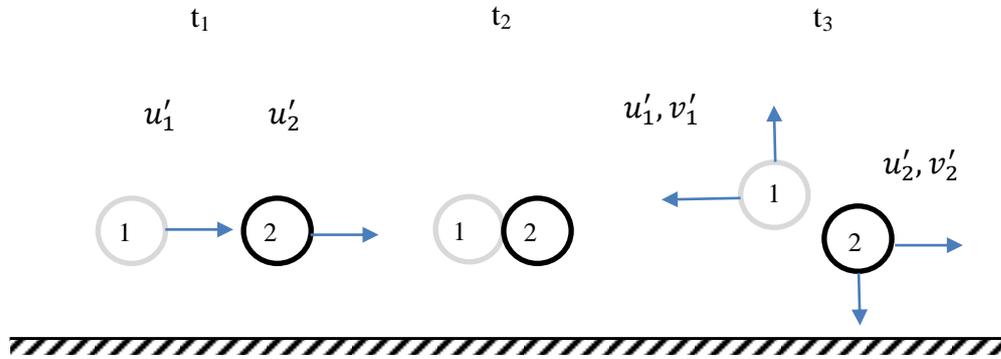
Gambar 4-57 Perbandingan *bubble separation* dengan URANS dan LES.

#### 4.9 Teori konversi energi Turbulent Kinetik Energi menjadi Momentum

Peristiwa turbulensi aliran ketika pada lintasan datar selalu dimulai dari intensitas turbulensi pada aliran *free stream*, di mana aliran tersebut cenderung memiliki kecepatan rata-rata konstan ke arah x (U), seperti ditunjukkan pada gambar 4-58. Intensitas turbulensi selalu diindikasikan terjadinya fluktuasi kecepatan hanya menuju arah x dalam fungsi waktu ( $t_1$ ). Fluktuasi tersebut terbentuk akibat konstruksi komponen *honeycom* dan difuser lorong angin. Berdasarkan eksperimen lorong angina di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Kritis Petra memiliki intensitas turbulensi 5%, hal ini sesuai dengan batasan kelayakan lorong angin yang dapat digunakan untuk penelitian memiliki syarat kurang dari 10%.

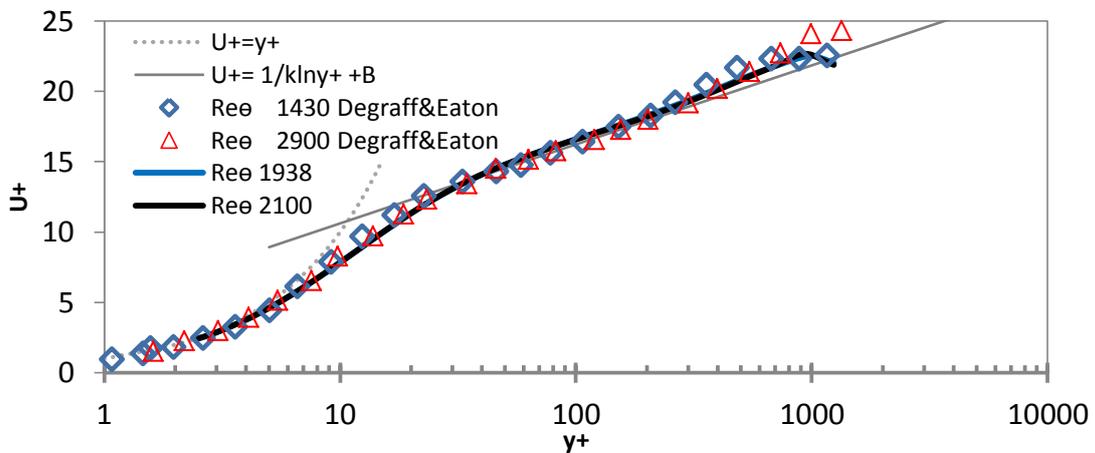
Fluktuasi kecepatan antara elemen menyebabkan terjadinya tumbukan antar elemen pada aliran fluida turbulen seperti ilustrasi waktu ( $t_2$ ), sehingga fluktuasi kecepatan dapat bernilai negatif dan positif dampaknya dari viscous flow. Apabila terjadi tumbukan antara elemen 1 dan 2 maka berdampak terhadap pembangkitan fluktuasi kecepatan aliran khususnya di daerah *buffer* dan *turbulen layer*. Ilustrasi ini diperlihatkan pada waktu ( $t_3$ ), fenomena ini menyebabkan terjadi pembangkitan kecepatan arah y (V), yang cenderung

menuju daerah *inviscid flow*. Hal ini disebabkan oleh hambatan aliran yang lebih kecil di daerah *inviscid flow*, namun sebagian kecil elemen fluida bergerak menuju bidang gesek.



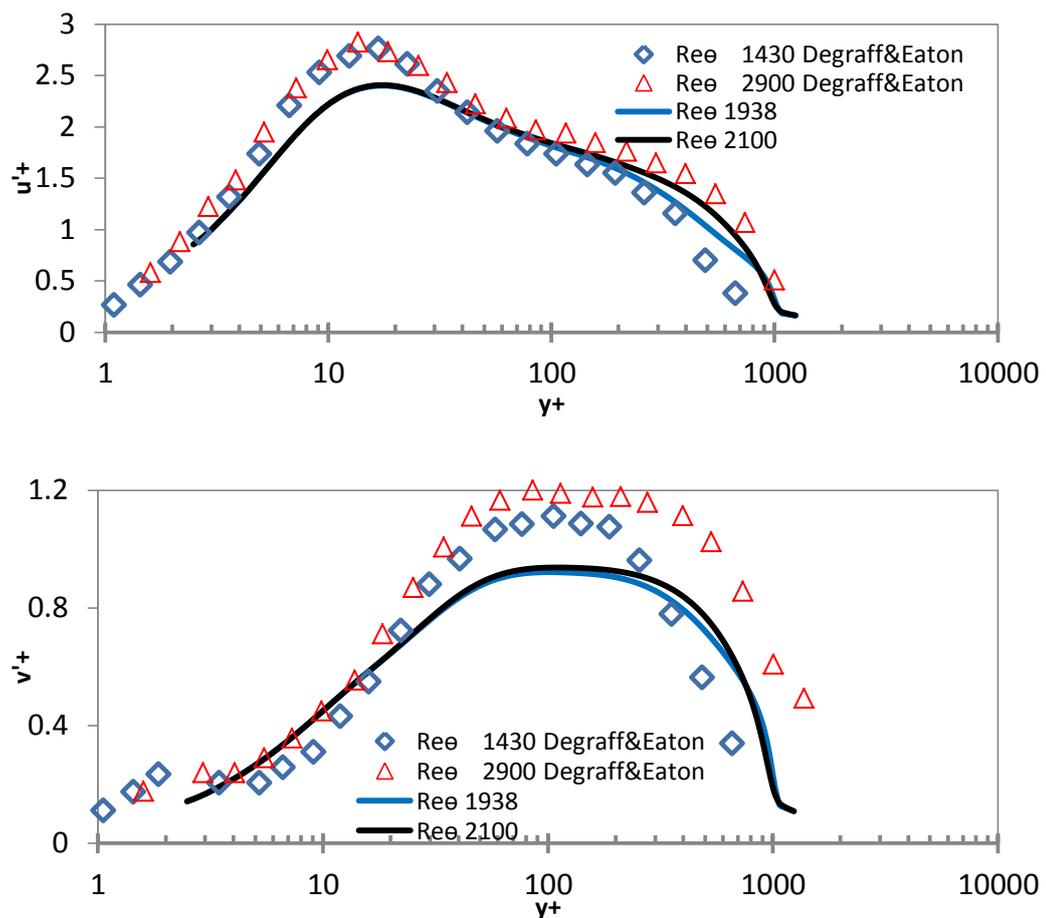
Gambar 4.58 Fenomena tumbukan antara elemen pada aliran turbulen.

Bentuk profil kecepatan arah x seperti yang diungkap oleh Degraaff dan Eaton [53], dipaparkan pada gambar 4-59. Parameter Reynolds number menggunakan dasar momentum thickness. Degraaff dan Eaton [53] memaparkan profil kecepatan pada  $Re_\theta=1430$  dan  $2900$ , sedangkan simulasi numerik memiliki nilai  $Re_\theta=1938$  dan  $2100$ . Profil kecepatan pada daerah *laminar sublayer* dan *buffer layer* memiliki hasil yang identik dengan hasil simulasi numerik, namun profil kecepatan pada daerah *turbulent layer* memiliki nilai yang sedikit berbeda. Profil kecepatan aliran yang semakin turbulen memiliki profil  $U^+$  yang lebih runcing di daerah dekat luar boundary layer.



Gambar 4-59 profil kecepatan arah x ( $U^+ = \frac{U}{U_\tau}$ )

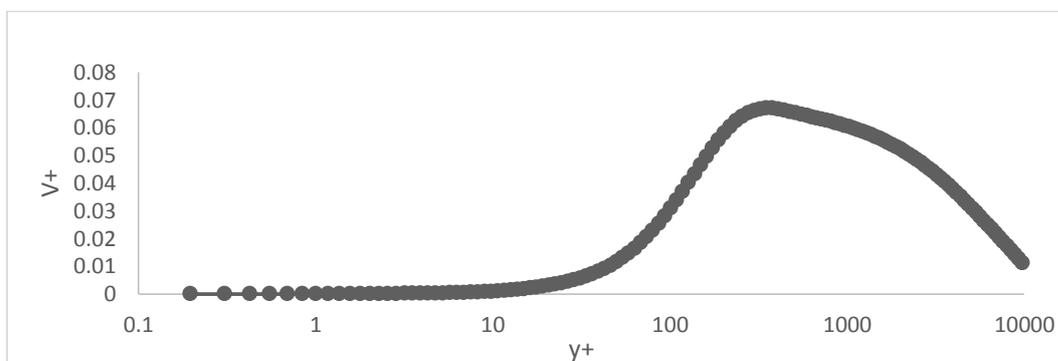
Fluktuasi kecepatan itu dipertegas oleh hasil eksperimen DeGraaff dan Eaton arah x dan y. Fenomena itu pada teori *boundary layer* disebut sebagai *Reynolds stress analysis*, di mana komponen ini merupakan nilai kuadrat komponen fluktuasi kecepatan. Pada gambar 4-60 diperlihatkan bahwa *Reynolds stress  $u'u'$*  di daerah *laminar sublayer* dan *buffer layer* mengalami peningkatan yang sangat kuat, sedangkan pada turbulen layer Reynolds stres  $u'u'$  mengalami reduksi seperti pada kondisi *freestream*. Perbandingan hasil eksperimen dan numerik memiliki perbedaan di daerah *buffer layer* dan *turbulent layer*. Oleh karena itu model viscous yang digunakan RSM (Reynolds Stress Method) memiliki prediksi yang lebih kecil, namun model ini memiliki fasilitas untuk mengeksplorasi fluktuasi kecepatan pada semua arah (x,y,z).



Gambar 4-60 Reynolds stress (Fluktuasi Kecepatan) pada setiap arah x dan y.

Reynolds stress  $u'u'$  menurut ilustrasi tersebut merupakan memicu terjadinya Reynolds stress  $v'v'$ . Produk ini merupakan akibat terjadinya tumbukan antara elemen yang memiliki perbedaan getaran antara elemen. Hal ini ditunjukkan bahwa Reynolds stress  $u'u'$  terjadi lebih dekat dengan bidang gesek, sehingga peristiwa ini selalu diindikasikan sebagai produksi dari Reynolds stress  $v'v'$  (arah  $y$ ). Terjadinya Reynolds stress  $v'v'$  berdampak terhadap fluktuasi kecepatan arah  $y$ , di mana secara tidak langsung fluktuasi tersebut membangkitkan kecepatan arah  $y$ . kecepatan  $V$  yang terjadi relatif kecil dibandingkan dengan kecepatan arah  $x$  ( $U$ ).

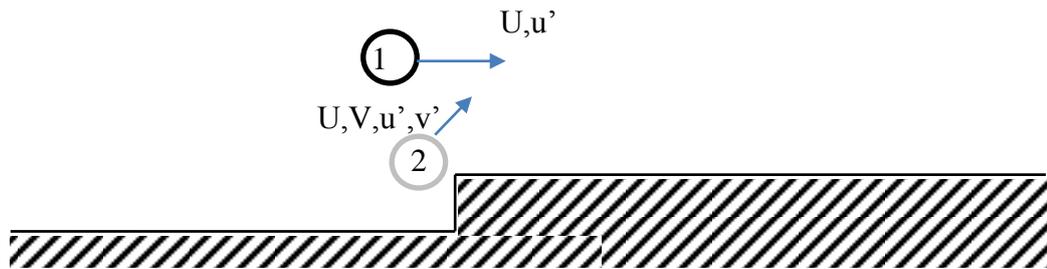
Peningkatan  $V^+$  ditunjukkan pada gambar 4-61, di mana peningkatan kecepatan terjadi pada buffer layer dan turbulen layer. Hal ini mengindikasikan bahwa produk dari Reynolds stress  $v'v'$  selalu menghasilkan kecepatan  $V$  yang sangat kecil. Maksimum  $V^+$  yang terjadi sebesar 0.06 yang relatif sangat kecil, di mana hal ini dampak dari getaran elemen. Kecepatan arah  $y$  antara eksperimen dan numerik memiliki nilai yang identik, walaupun nilai fluktuasi kecepatan komponen  $v'v'$  sedikit berbeda.



Gambar 4-61 Profil  $V^+$

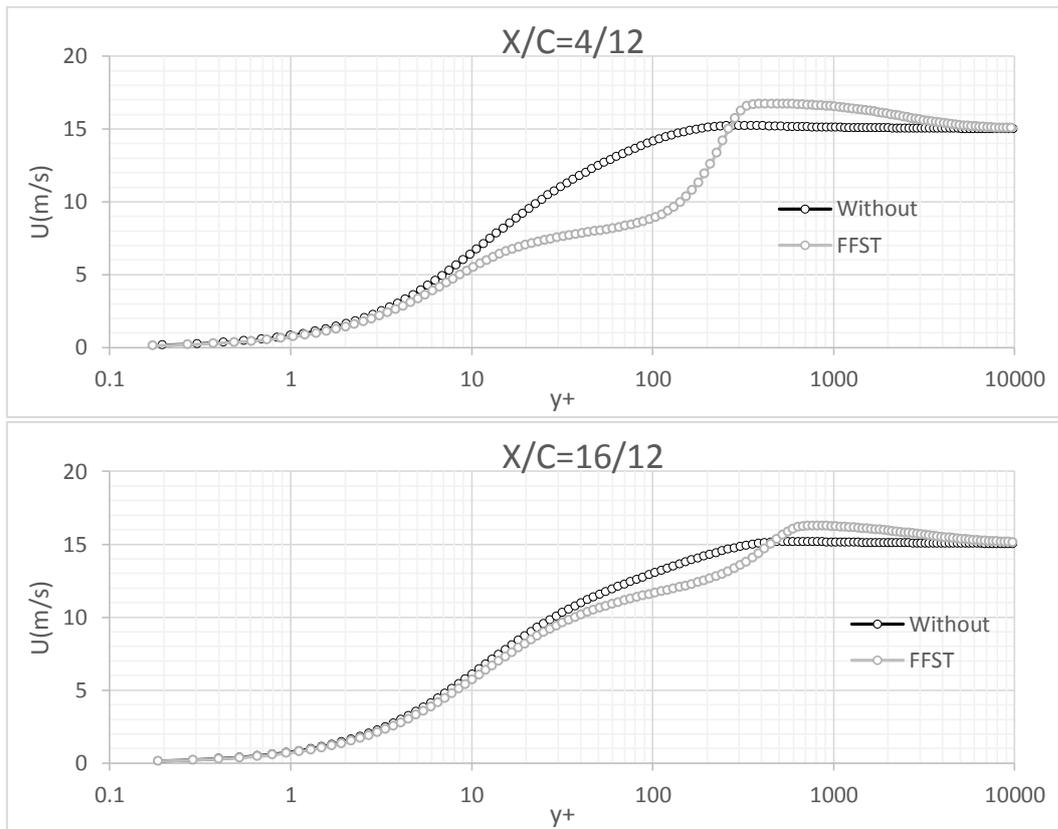
Fenomena yang terjadi pada *Forward Facing Step* memiliki peristiwa yang berbeda. Pada elemen sebelum *stepper*, awalnya memiliki komponen  $U$  dan  $u'$  saja seperti pada kondisi aliran *freestream*, kemudian elemen tersebut bertemu dengan *stepper* membangkitkan kecepatan  $U$  dan  $V$  dan fluktuasi kecepatan  $u'$  dan  $v'$ . Aliran tersebut terseparasi (2) dan bertemu dengan aliran *freestream* (1) kemudian pertemuan tersebut dihasilkan tumbukan elemen yang sangat kuat.

Aliran yang terseparasi tersebut terinjeksi oleh energi aliran dari *free stream* sehingga mampu *reattachment* membentuk bubble separation. Tumbukan yang sangat kuat ini mereduksi kecepatan U, sehingga kecepatan V meningkat tajam. Hal ini seperti yang dipaparkan pada gambar 4-62.



Gambar 4-62 Elemen pada *forward facing step* turbulator.

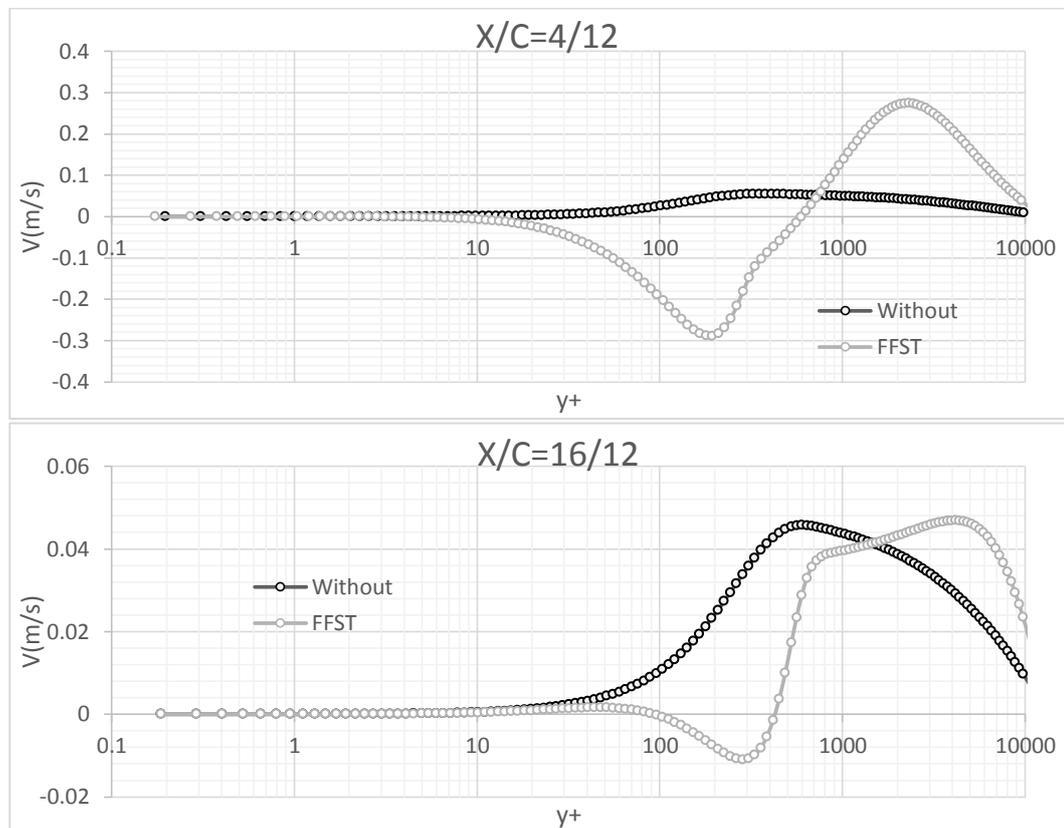
Peristiwa *reattachment* merupakan fenomena peleburan energi aliran separasi dengan aliran *free stream*. Profil kecepatan U ketika awal terjadinya tumbukan secara *orthogonal* menyebabkan terjadinya reduksi kecepatan U di daerah *buffer layer* yang sangat kuat, namun saat mendekati pertengahan *turbulent layer* kecepatan U cenderung meningkat tajam. Hal ini membuktikan bahwa elemen yang berasal dari *upstream* yang bertumbukan mengalami percepatan, sedangkan elemen dari bidang friksi di daerah *buffer layer* kecepatan U mengalami perlambatan. Seiring dengan panjang lintasan aliran kecepatan U fluida khusus di daerah *buffer layer* kembali pulih. Hal ini merupakan peristiwa yang perlu dievaluasi secara fundamental bagaimana energi momentum tersebut tereduksi kemudian kembali pulih. Evaluasi ini semakin mendasar dimana peran dari Reynolds stress untuk memulih momentum U di daerah *buffer layer*. Hal ini dipaparkan pada gambar 4-63.



Gambar 4-63. Profil Kecepatan U without dan FFST.

Pengamatan kecepatan  $V$  atau energi momentum  $V$  diperlihatkan pada gambar 4-64. Penggunaan FFST berdampak terhadap peningkatan kecepatan  $V$ , khususnya daerah buffer layer elemen memiliki arah negatif sedangkan pada turbulen layer memiliki arah positif. Hal ini sesuai dengan perkiraan pergerakan elemen setelah tumbukan, elemen dekat dengan dinding cenderung membentuk *bubble separation*. Sedangkan pada sisi dekat *freestream* mengalami akselerasi. Seiring dengan panjang lintasan kecepatan  $V$  yang bernilai negatif semakin berkurang dan memperluas daerah dengan kecepatan  $V$  positif. Penggunaan FFST memiliki kecepatan  $V$  yang besar dibandingkan dengan tanpa khususnya pada posisi  $X/C=4/12$  dari *stepper*. Sedangkan pada jarak  $X/C=16/12$  nilai kecepatan  $V$  memiliki nilai mendekati sama tanpa FFST. Hal ini menandakan apabila terjadi tumbukan elemen dengan FFST selalu membangkitkan kecepatan  $V$  secara signifikan. Peningkatan kecepatan  $V$  selali diawali dengan terjadi

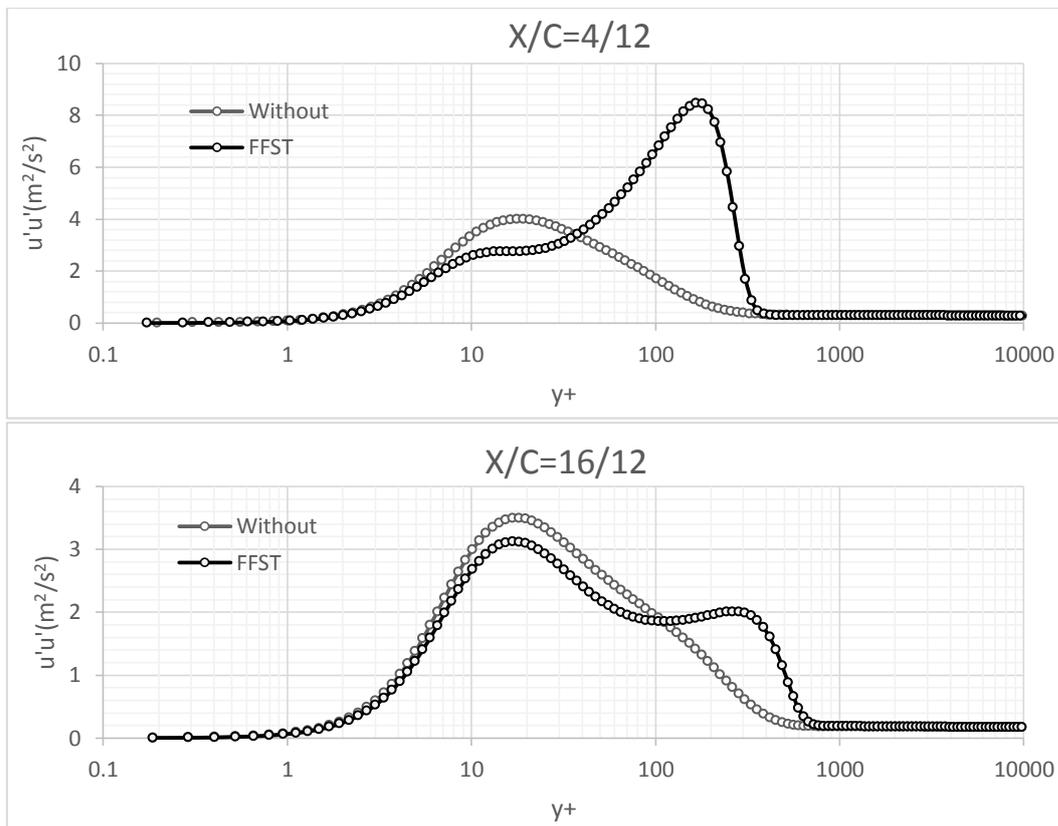
*bubble* separasi ( $V$  negatif) kemudian terjadi akselerasi ke arah  $y$ . Puncak kecepatan  $V$  semakin menjauhi bidang gesek ketika menggunakan FFST.



Gambar 4-64. Profil Kecepatan  $V$  without dan FFST.

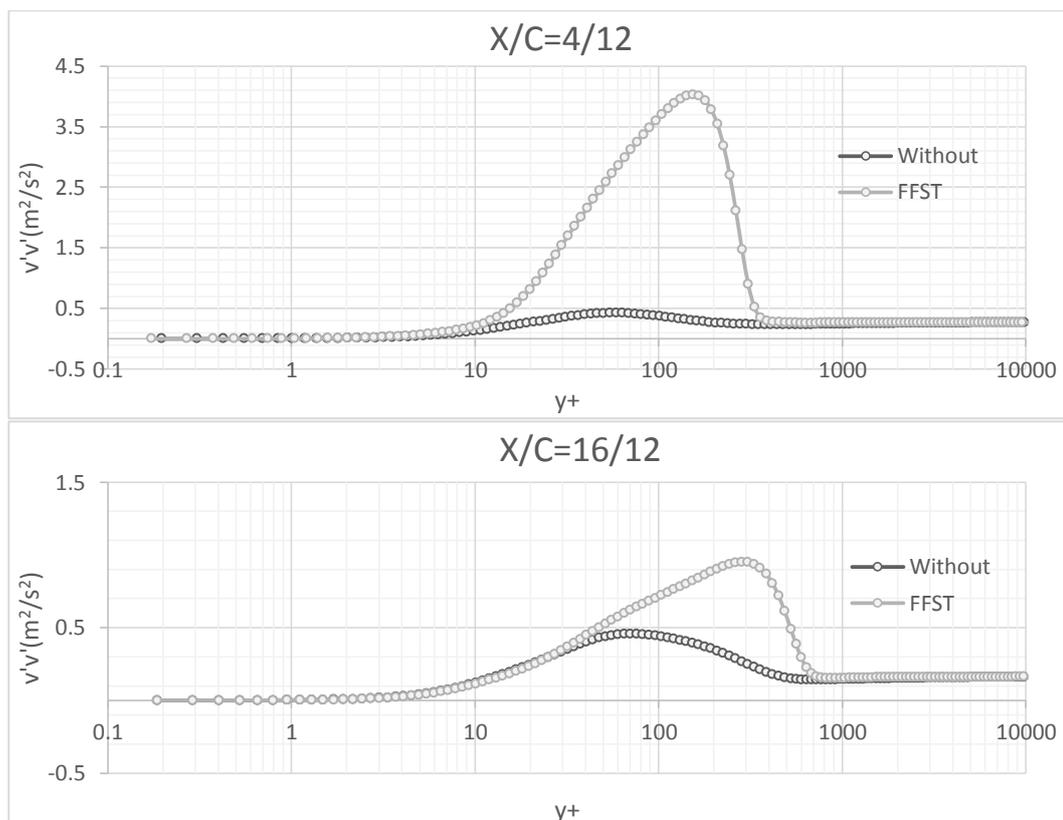
Peningkatan Reynolds stress merupakan indikasi terjadi getaran elemen yang sangat kuat yang terdiri dari beberapa komponen  $u'u'$ ,  $v'v'$  dan  $w'w'$ . Pada aliran turbulen Reynolds stress ini memiliki potensi aliran semakin tangguh terhadap *adverse pressure* dan beban friksi. Oleh karena itu penelitian saat selalu melakukan upaya membangkitkan turbulensi aliran dengan perangkat aktif maupun pasif turbulen generator. Upaya ini bertujuan untuk menghasilkan aliran yang semakin turbulen tanpa meningkatkan kecepatan freestream aliran. Hal ini upaya penghematan energi mendapatkan aliran dengan karakter lebih tangguh terhadap hambatan aliran.

Reduksi kecepatan  $U$  di daerah buffer layer berdampak terhadap peningkatan Reynolds stress  $u'u'$  sebesar 2 kali lipat pada jarak  $X=40\text{cm}$ . Peningkatan Reynolds stress ini merupakan indikasi perubahan dari reduksi kecepatan  $U$  serta peningkatan kecepatan  $V$ . Penggunaan FFST menggeser titik puncak Reynolds stress  $u'u'$  semakin menuju turbulen layer, selain itu daerah fluktuasi kecepatan semakin luas. Puncak Reynolds stress  $u'u'$  semakin turun seiring panjang lintasan aliran fluida. Puncak di daerah turbulen layer bergerak semakin turun menuju buffer layer, kemudian berkumpul pada daerah ini. Apabila dibandingkan tanpa FFST puncak Reynolds stress  $u'u'$  lebih kecil khususnya daerah  $X/C=16/12$ , namun daerah semakin luas. Fenomena ini dipaparkan pada gambar 4-65.



Gambar 4-65 Profil Reynolds stress  $u'u'$ .

Peningkatan Reynolds stress  $v'v'$  terjadi ketika digunakan FFST pada bidang friksi. Hal ini dipaparkan pada gambar 4-66 dimana peningkatan Reynolds stress  $v'v'$  terjadi pada daerah buffer layer seperti yang terjadi pada Reynolds stress  $u'u'$ . Perbedaan Reynolds stress  $v'v'$  antara dengan dan tanpa FFST terlihat pada nilai maksimumnya saja, sedangkan untuk profil memiliki hal yang serupa dengan tanpa FFST. Fenomena ini mempertegas reduksi yang dialami oleh kecepatan  $U$  berdampak terhadap peningkatan kecepatan  $V$  dan getaran pada elemen fluida. Getaran elemen fluida itu merupakan turbulence kinetic energy (TKE) berbentuk Reynolds stress  $u'u'$ ,  $v'v'$  dan  $w'w'$ . Dimana secara teori nilai Reynolds stress  $u'u'$  merupakan parameter mereduksi terjadi *shear stress* pada fluida sehingga dapat meningkatkan momentum aliran fluida. Perubahan itu membutuhkan waktu pemulihan hal ini dibuktikan bahwa momentum aliran semakin kuat seiring dengan terkonversi TKE menjadi energi kinetik fluida.



Gambar 4-66 profil Reynolds stress  $v'v'$ .

Kajian lanjut terhadap struktur aliran fluida, bahwa fenomena *bubble separation* dapat dievaluasi berdasarkan faktor *skewness* dan *flatness* pada *wall shear stress*. Faktor tersebut merupakan normalisasi *third* dan *fourth moments* dengan probabilitas massa jenis.

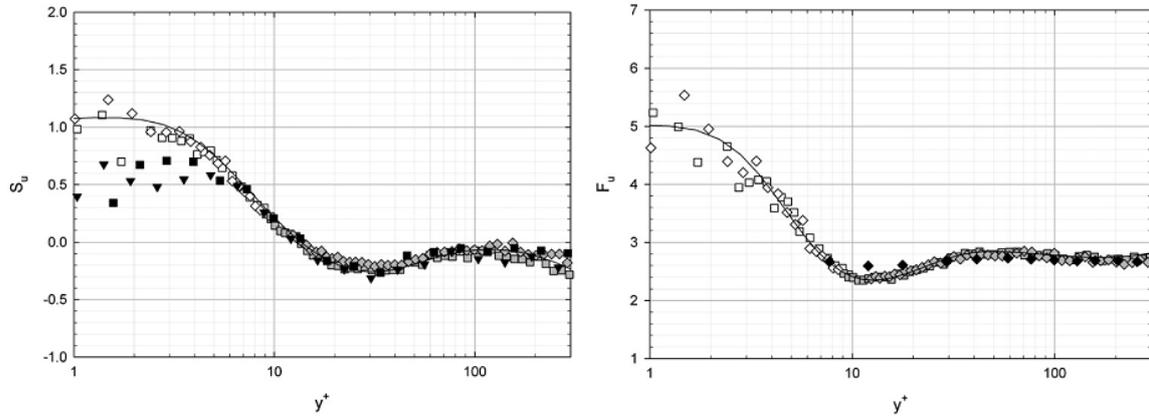
$$S_{\tau} = \frac{\overline{\tau'^3}}{(\overline{\tau'^2})^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{(\overline{\tau'^2})^{\frac{3}{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} \tau'^3 P(\tau) d\tau \dots \dots \dots (4-1)$$

$$F_{\tau} = \frac{\overline{\tau'^4}}{(\overline{\tau'^2})^2} = \frac{1}{(\overline{\tau'^2})^2} \int_{-\infty}^{\infty} \tau'^4 P(\tau) d\tau \dots \dots \dots (4-2)$$

Skewness bernilai negatif apabila banyak dijumpai *reverser flow* (aliran balik) dan terjadi akibat *low frequency unsteadiness* (ketidak stabilan frekuensi rendah). Setelah titik tengah fenomena *bubble separation* faktor *skewness* semakin tinggi *steadily* (negatif) dan membentuk nilai 0 apabila aliran telah *reattachment*, dimana terjadi pencampuran fluktuasi inten-*intermittent amplitude* besar *negative* dan *positif*. Setelah *reattachment*, aliran secara berkelanjutan semakin kaya sehingga meningkatkan *amplitude* yang besar.

Selain itu fenomena penggunaan FFST menyebabkan sebaran aliran jenis *bust* semakin luas terjadi pada semua lapisan *boundary layer*. Aliran *bust* pada *buffer layer* ( $y^+ = 10-100$ ) semakin tereduksi seiring dengan peningkatan lintasan aliran, namun fenomena itu diimbangi dengan meluasnya daerah aliran *bust* pada lapisan *laminar sub layer* ( $y^+ = 1-10$ ). Peningkatan *bust type flow* pada daerah tersebut jauh lebih kecil nilainya dibandingkan tanpa FFST, sehingga berdampak pada aliran yang semakin kuat yang indentik dengan aliran yang semakin turbulen. Aliran turbulen ditunjukkan dengan nilai *skewness* dan *flatness* yang semakin kecil. Khusus untuk *skewness* yang semakin besar menunjukkan bahwa dijumpai fluktuasi kecepatan yang bernilai positif lebih besar. FFST menyebabkan peningkatan turbulensi yang besar terjadi pada daerah *turbulent layer*. Fluktuasi kecepatan yang memiliki frekuensi tinggi dan amplitudo yang kecil memiliki faktor turbulensi yang sangat kuat sehingga aliran tersebut diprediksi lebih tangguh menghadapi hambatan aliran berupa *adverse pressure*

maupun *losses*. Semua fenomena ini ditunjukkan pada gambar 4-67. Hal ini diperkuat oleh hasil Keirbulck et al [56] tentang nilai *skewness* dan *flatness*.



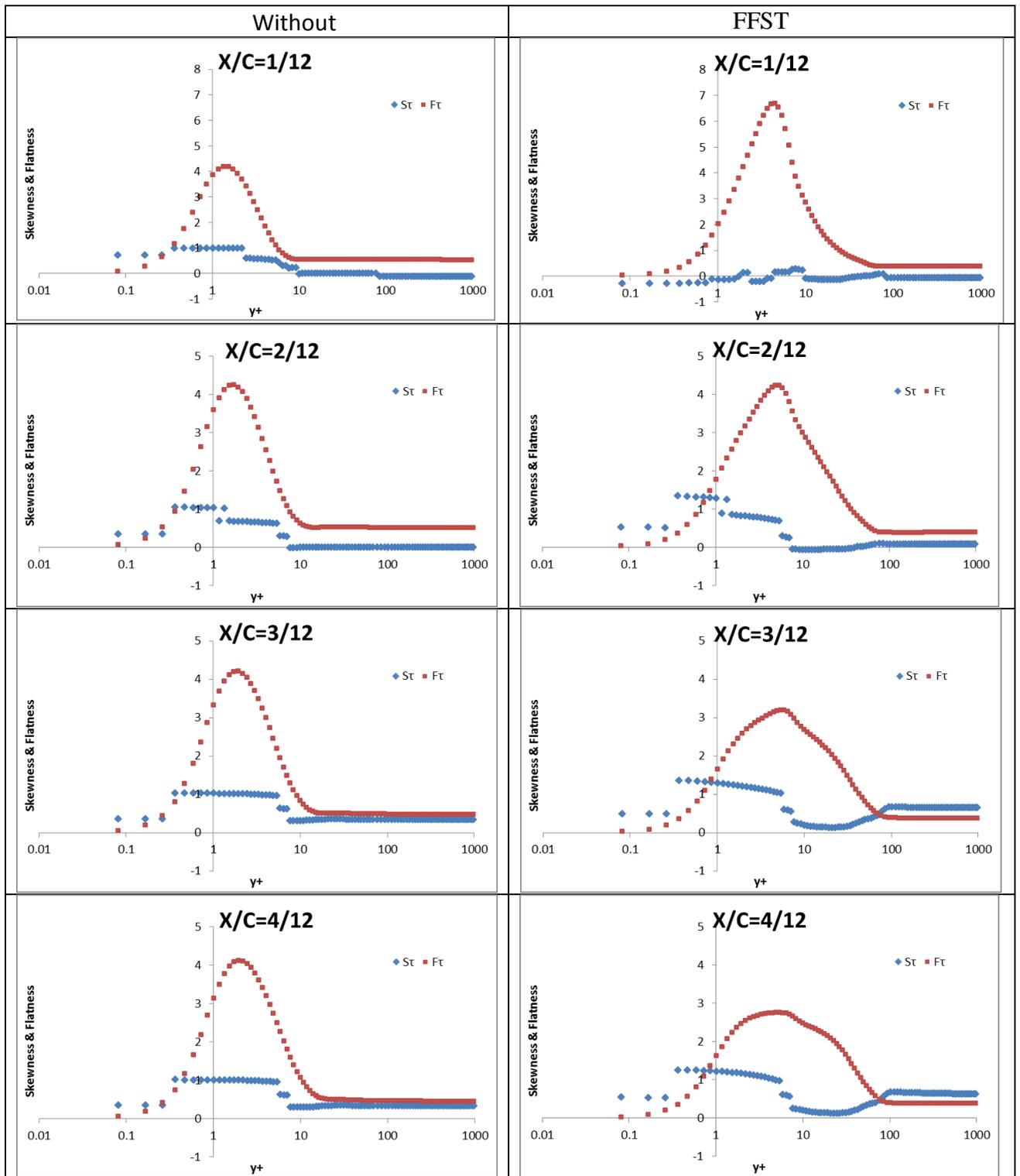
Gambar 4-67 *Skewness* dan *flatness* [56]

Evaluasi *Skewness* dan *Flatness* pada aliran tanpa dan dengan FFST dipaparkan pada gambar dibawah ini. Hasil profil *skewness* pada jarak 1cm ditemukan nilai negatif. Hal ini menunjukkan kondisi tersebut masih di dalam *bubble separation*. Nilai tersebut terjadi pada ketinggian  $y^+$  dari 0.1 sampai dengan 8 dekat daerah *laminar sublayer* dan *buffer layer*. Selain itu pada daerah *turbulent layer*, nilai *skewness* memiliki nilai yang sangat kecil sehingga cenderung terjadinya variasi fluktuasi kecepatan yang tinggi.

Sedangkan pada posisi 2 cm dan selebihnya merupakan daerah setelah terjadi *reattachment flow*, yang ditandai dengan nilai *skewness* positif. Pada dekat dinding nilai *skewness* mendekati 1 yang merupakan nilai terbesar pada aliran tanpa FFST. Pada daerah *laminar sublayer* selalu memiliki nilai fluktuasi kecepatan bernilai positif. Sedangkan nilai fluktuasi kecepatan di daerah *buffer layer* dan *turbulent layer* memiliki variasi antara negatif dan positif namun nilainya semakin kecil seperti yang terjadi pada jarak 1cm. Apabila dijumpai nilai *skewness* negatif maka pada daerah tersebut terdapat aliran balik atau *reverse flow*. Hal ini ditampilkan pada gambar 4-68 tentang perkembangan *skewness* dan *flatness* pada panjang lintasan.

*Flatness* merupakan orde empat pada analisa statistik memaparkan karakteristik fluktuasi kecepatan. Apabila semakin besar nilai *flatness* cenderung berjenis *bust flow* dimana memiliki frekuensi rendah dan amplitudo yang besar. Aliran ini merupakan aliran dengan ketidak stabilan yang tinggi sehingga dipastikan berada pada kondisi *bubble separation*. Penggunaan FFST pada di dekat dinding menyebabkan aliran semakin lemah ditandai dengan peningkatan nilai *flatness* semula bernilai 4 menjadi 7, ditunjukkan pada posisi 1cm. Namun adanya *bubble separation* berdampak terhadap terjadi akselerasi fenomena transformasi aliran dari laminar menuju turbulen. Penggunaan FFST menguntungkan apabila ditinjau pada jarak 3cm dimana puncak nilai *flatness* lebih rendah dari pada kondisi tanpa FFST.

**Sengaja dikosongkan**



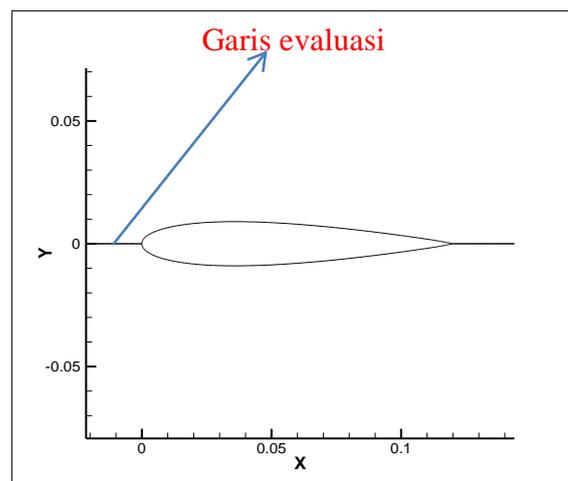
Gambar 4-68 Profil perkembangan *Skewness* dan *Flatness*.

#### 4.10 Revolusi elemen fluida dari *upstream* menuju *downstream*.

Analisa *boundary layer* melalui FFST dihasilkan karakteristik aliran di bidang tumpu, apabila bodi diletakkan dekat dengan daerah resirkulasi menghasilkan intensitas turbulensi yang tinggi namun momentum aliran lemah. Sedangkan posisi bodi semakin jauh dari FFST menghasilkan momentum aliran kuat dan intensitas yang rendah. Dua pernyataan ini menjelaskan bahwa energi yang hilang menjadi bentuk energi yang lain. Oleh karena itu dibutuhkan penelitian yang membandingkan dampak peningkatan momentum dan intensitas turbulensi.

Pembuktian ini dilakukan dengan cara mengevaluasi aliran yang melintasi *center line* bodi seperti gambar 4-69. Nilai garis untuk  $Y=0$  mm sedangkan untuk nilai  $Z=0.001$  m atau 1mm. Posisi tersebut selalu diharapkan berada pada daerah *laminar sub layer* berada di dalam aliran *viscous*, sebab apabila berada di daerah *inviscid flow* dampak FFST tidak tampak terhadap pengaruh *boundary layer*.

Pada gambar 4-70 dipaparkan distribusi kecepatan dan intensitas turbulensi sepanjang lintasan, namun kondisi ini tidak dapat mencerminkan perubahan fenomena di dalam formasi *horseshoe vortex*. Kondisi ini menjelaskan secara detail tentang perubahan kecepatan dan intensitas turbulensi yang sangat terkait erat dengan energi momentum aliran makro dan mikro aliran.

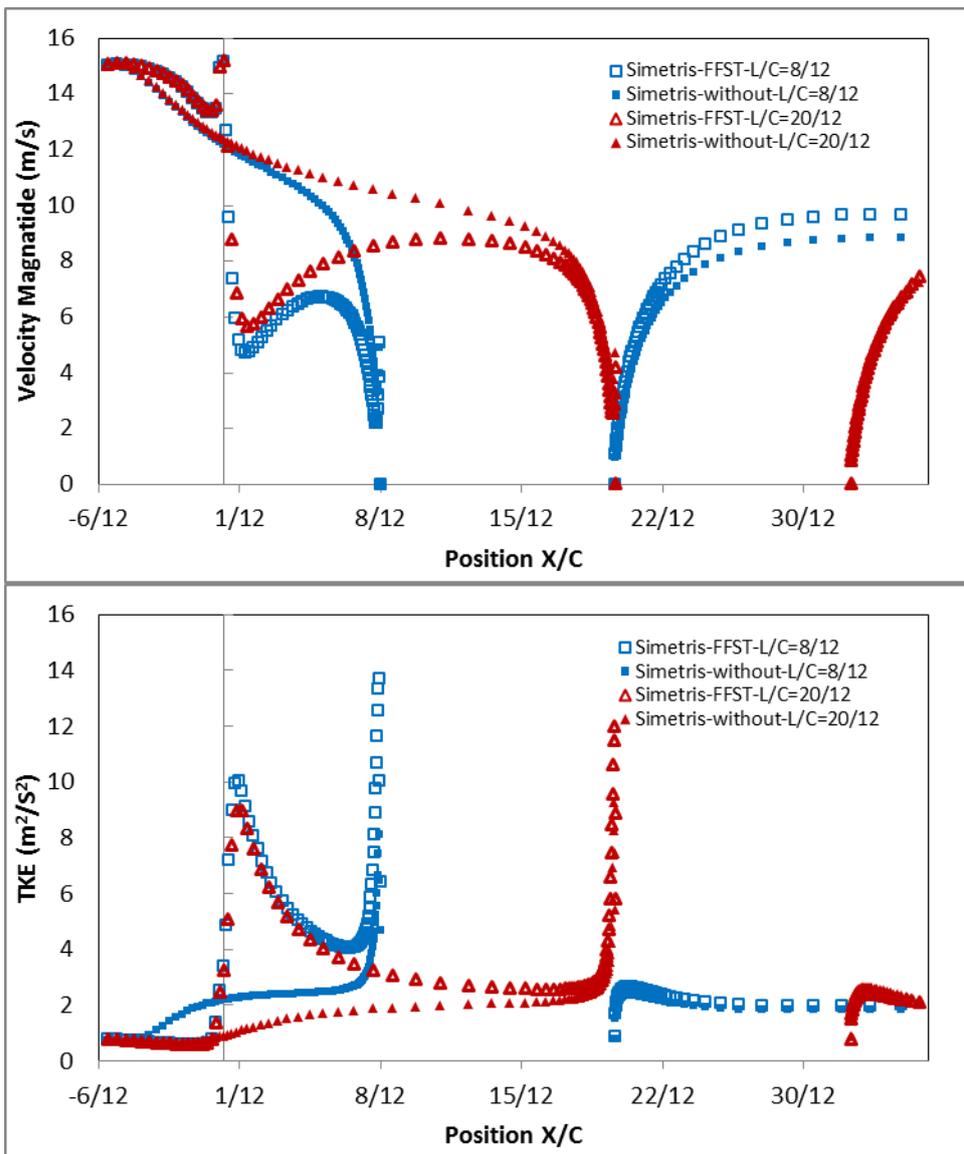
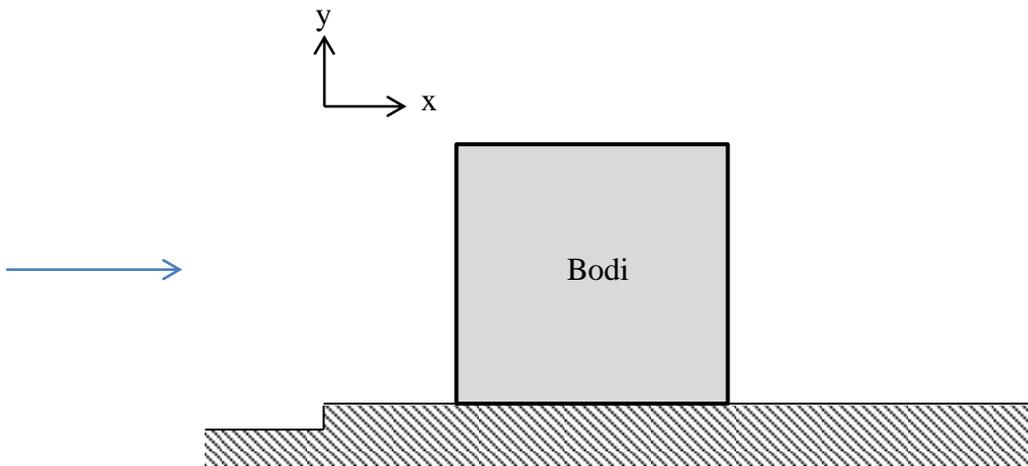


Gambar 4-69 *center line body*

Fenomena aliran melintasi dekat bidang gesek mengalami reduksi kecepatan yang berangsur-angsur. Reduksi kecepatan ini membangkitkan intensitas turbulensi sepanjang lintasan bidang gesek. Hal ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Reynolds khususnya aliran eksternal, dimana bilangan Reynolds semakin meningkat apabila lintasan aliran semakin panjang. Fenomena ini terjadi pada hasil simulasi penelitian ini khususnya tanpa FFST.

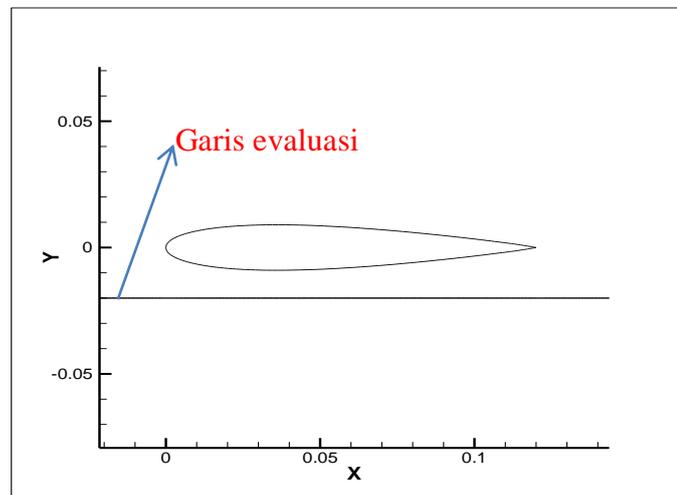
Penempatan FFST pada jarak yang berbeda antara  $L/C=8/12$  dan  $L/C=20/12$  memiliki karakteristik aliran yang berbeda. Hal ini diperlihatkan pada gambar 4-70, dimana pada jarak  $L/C=8/12$  menghasilkan peningkatan intensitas turbulensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan jarak  $L/C=20/12$ . Hal ini membuktikan bahwa aliran dengan peletakan FFST yang lebih dekat dengan bodi dihasilkan intensitas turbulensi yang lebih kuat.

Penambahan FFST menyebabkan reduksi kecepatan yang sangat drastis yang diimbangi dengan peningkatan intensitas turbulensi. Fenomena ini menyebabkan perubahan energi makro menjadi skala mikro akibat terjadinya *bubble separation*. Aliran saat mendekati *leading edge* penambahan FFST menyebabkan kecepatan semakin rendah. Hal ini berdampak terhadap salah satu faktor yang menyebabkan posisi *forward saddle point* semakin menjauh dari *leading edge*. Namun apabila dilanjutkan evaluasi pada daerah *trailing edge* penambahan FFST menyebabkan peningkatan kecepatan di daerah tersebut. Daerah ini merupakan tempat muara aliran sekunder secara 3D yang menimbulkan *corner wake*. Oleh karena itu perubahan energi dari makro menjadi mikro menyebabkan aliran memiliki cadangan energi yang diperlukan pada saat berada pada daerah *trailing edge*. Penjelasan diatas merujuk pada gambar 4.70.



Gambar 4-70. Distribusi kecepatan dan TKE pada *leading edge*.

Fenomena ini masih belum terungkap secara sempurna bagaimana fenomena aliran terjadi di dalam formasi *horseshoe vortex* sehingga digunakan garis evaluasi seperti pada gambar 4-71. Kondisi tersebut terdapat garis evaluasi pada posisi  $Z=3$  mm dan  $Y=20$ mm, posisi tersebut dilakukan hanya pada posisi *lower side* sebab bodi tidak diberikan  $\alpha$  sehingga fenomena *upper side* dan *upper side* memiliki karakteristik yang sama. Hal ini menjelaskan fenomena aliran setelah melintasi *leading edge* dan sebelum menyentuh *trailing edge*. Daerah tersebut merupakan daerah terbentuknya *end stagnation point*(ESP) menghasilkan *forward saddle point*(FSP).

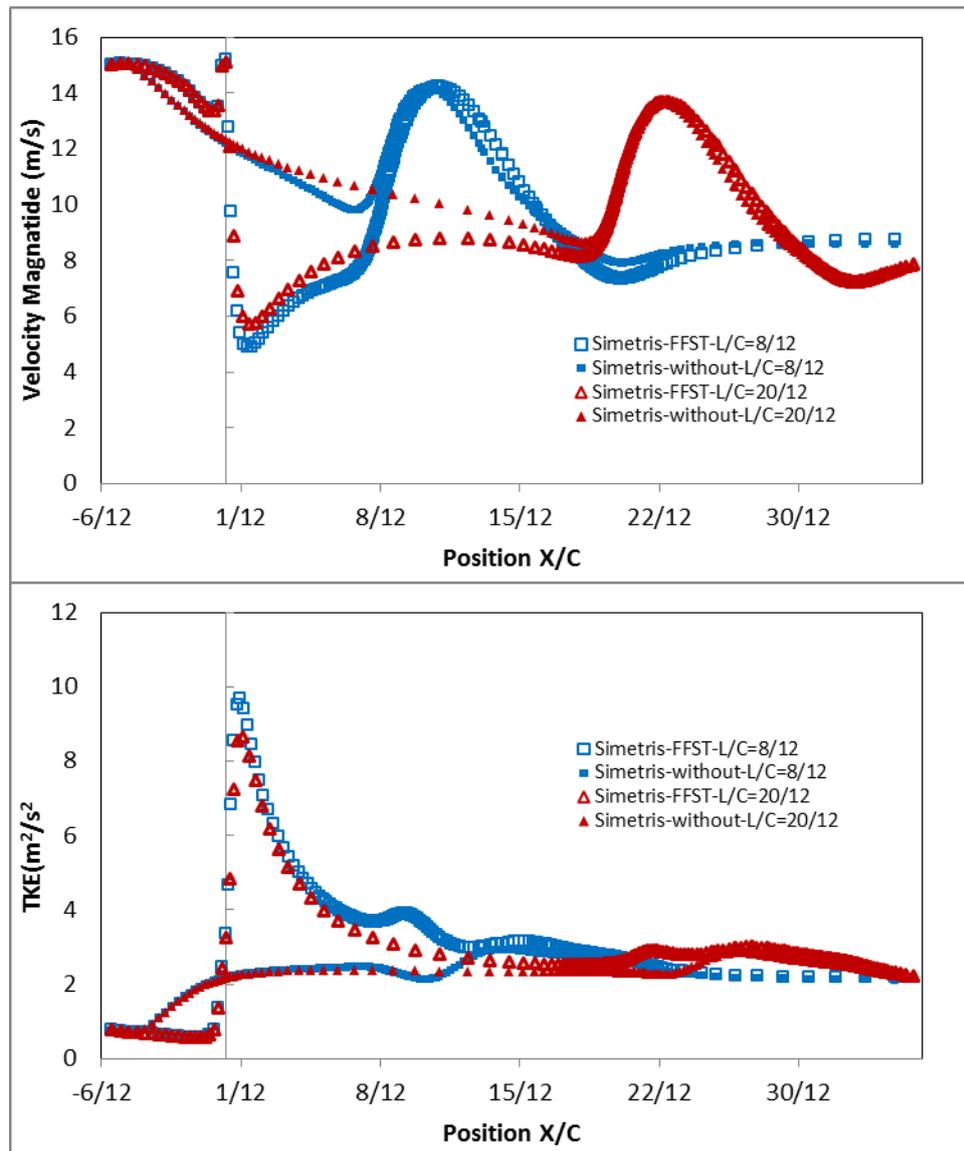


Gambar 4-71 Distribusi kecepatan dan TKE *lower side*.

Fenomena aliran setelah melintasi *leading edge* mengalami peningkatan kecepatan yang tinggi. Hal ini disebabkan menyempitnya *streamtube*, sehingga terjadi akselerasi akibat *favorable pressure*. Fenomena ini terjadi pada semua bidang gesek dengan FFST maupun tanpa FFST. Namun pada intensitas turbulensi penambahan FFST menyebabkan peningkatan yang sangat signifikan setelah melintasi *leading edge*. Fenomena ini terkait dengan peningkatan intensitas turbulensi akibat terjadi *bubble separation* di depan *leading edge*. Apabila FFST diletakkan dekat dengan *leading edge* berdampak peningkatan intensitas turbulensi yang lebih kuat. Intensitas turbulensi seiring dengan melintasi bodi mengalami penurunan. Pada daerah setelah melintasi maksimum *thickness body*, aliran mengalami *streamtube* yang membesar sehingga menyebabkan *adverse pressure*. Fenomena *adverse pressure* menyebabkan reduksi kecepatan

dan intensitas turbulensi, namun dengan adanya intensitas turbulensi yang lebih tinggi menyebabkan penurunan kecepatan lebih kecil. Fenomena itu menjelaskan bahwa pada daerah *adverse pressure* kandungan energi mikro terlebih daerah digunakan oleh aliran untuk menanggulangi kerugian akibat gesekan, sehingga kecepatan aliran tidak mengalami reduksi yang besar dibandingkan tanpa FFST. Fenomena itu ditunjukkan pada gambar 4-72.

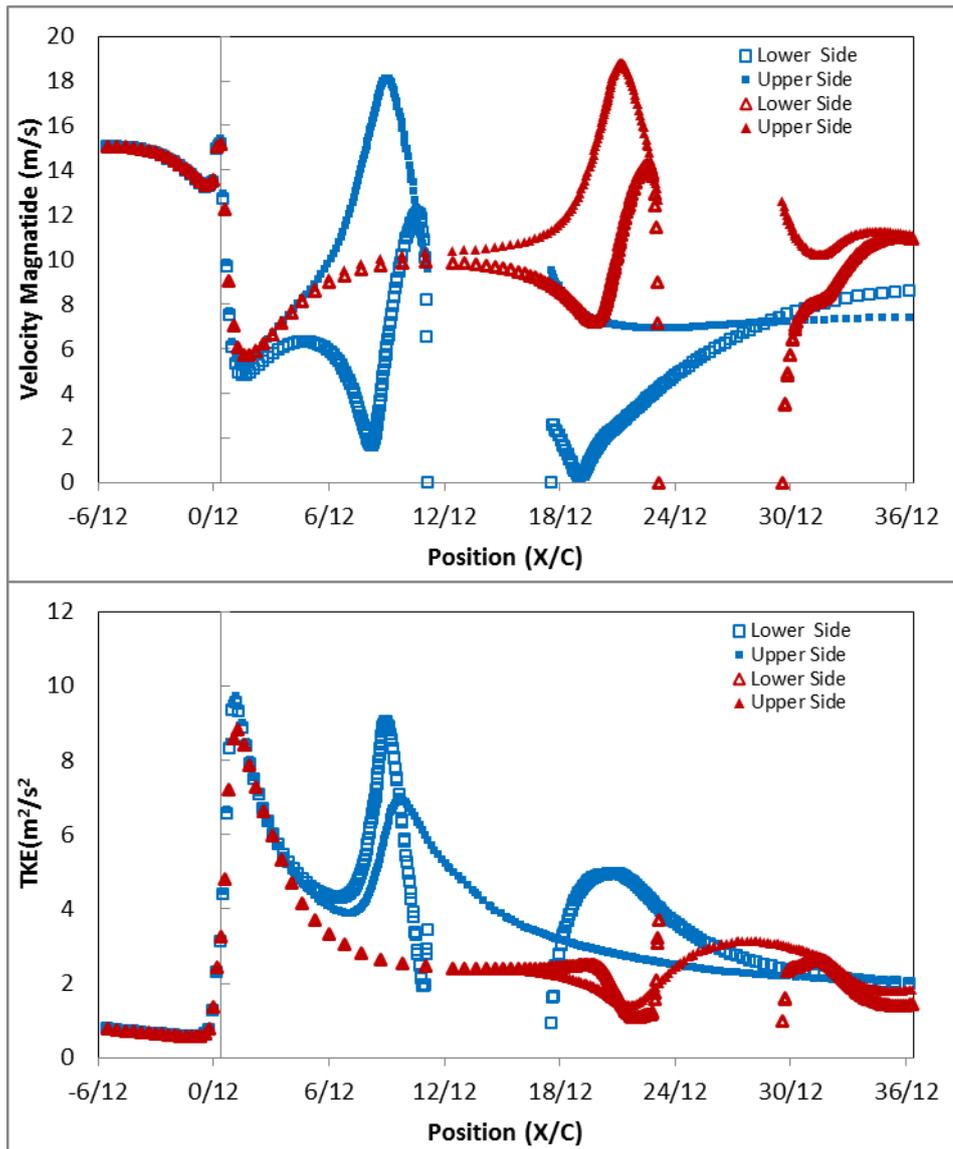
Pada gambar 4-73 merupakan distribusi kecepatan dan TKE yang terjadi pada *angle of attack*  $\alpha=12^\circ$  yang diambil garis evaluasi. Namun perbedaannya data diambil pada sisi *upper* dan *lower side* untuk masing masing posisi  $Y=20\text{ mm}$  dan  $Y=-20\text{mm}$ . Kondisi ini bertujuan untuk memaparkan evolusi elemen fluida ketika masuk di dalam formasi *horseshoe vortex*. Pada sisi *lower side* kecepatan saat mendekati *leading edge* posisi FFST  $L/C=8/12$  memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan  $L/C=20/12$ , perbandingan kecepatan saat mendekati *leading edge* 2 m/s dan 8 m/s. Setelah itu aliran fluida bergerak menyentuh bodi *lower side* pada  $X/C=10/12$  terjadi penurunan kecepatan yang sangat tajam itu menunjukkan peningkatan TKE yang kuat. Pada daerah tersebut merupakan tempat terbentuk *curl flow*, dimana penjelas sebelumnya dipaparkan bahwa aliran yang kuat selalu cenderung bergerak *downstream* dibandingkan melintasi *trailing edge* menjadi *curl flow*. *Deaccelaration* pada daerah tersebut menunjukkan TKE yang meningkat. Hal ini memungkinkan terjadi perubahan karakteristik aliran *laminar* menjadi *turbulence* semakin singkat.



Gambar 4-72. Distribusi kecepatan dan TKE pada *lower side*.

Peningkatan TKE yang terjadi saat *bubble separation*, peningkatan kedua terjadi melintasi *leading edge* bersamaan dengan kecepatan aliran. Hal ini disebabkan oleh penyempitan *stream tube* aliran sebelum ketebalan maksimum bodi. Sedangkan TKE saat posisi sejajar dengan *leading edge* memiliki nilai  $2\text{ m}^2/\text{s}^2$  dan  $9\text{ m}^2/\text{s}^2$  pada FFST dengan posisi  $L/C=8/12$  dan  $L/C=20/12$ . Hasil ini sesuai pernyataan sebelumnya bahwa posisi FFST yang lebih dekat dengan bodi memiliki energi TKE yang lebih kuat dibandingkan dengan momentum aliran di dalam *boundary layer*. TKE pada *lower side* memiliki nilai sangat besar pada FFST  $L/C=8/12$  apabila dibandingkan dengan FFST  $L/C=20/12$ . Sesuai

pernyataan sebelumnya semakin jauh posisi FFST maka menghasilkan kecepatan yang lebih besar namun berdasarkan kajian aliran sekunder memiliki *end stagnation point* (ESP) yang lebih menjauhi bidang tumpu. Jenis *disturbance* atau handicap yang baik untuk mereduksi aliran sekunder tidak semata-mata melihat profil kecepatan saja namun perlu diamati tentang posisi ESP yang merupakan produk FFST.



Gambar 4-73. Distribusi kecepatan dan TKE pada *lower – upper side*.

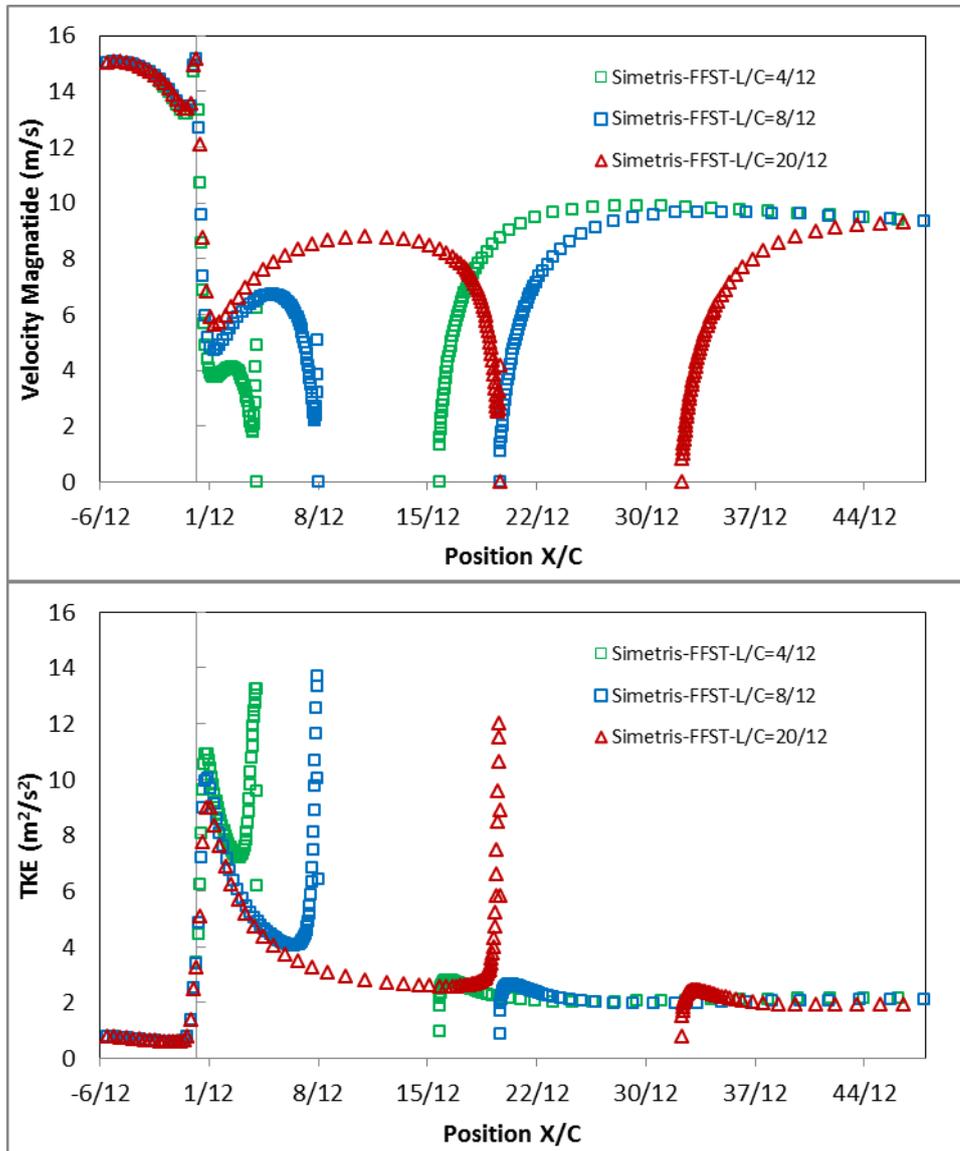
Pada *upper side* elemen kecepatan fluida pada FFST  $L/C=8/12$  memiliki nilai lebih kecil, namun TKE memiliki nilai yang berkebalikan. Hal ini selalu menjelaskan perubahan momentum aliran di dalam *boundary layer* selalu

diimbangi dengan perubahan TKE. Fenomena ini mempertegas bahwa hubungan kedua kinetik energi ini sangat erat dan saling tersubsitusi dengan baik, walaupun terjadi peningkatan entropi akibat kerugian proses. Peningkatan entropi sering terjadi di posisi *upper side*, sebab aliran yang tidak mengalir selalu bermuara pada posisi *upper side* dekat *trailing edge*. Peningkatan kecepatan daerah tersebut mempertegas bahwa dominasi aliran di luar formasi *horseshoe vortex* mampu masuk ke dalam formasi di dekat *trailing edge*. Fenomena ini dijelaskan pada sebelumnya bahwa FFST yang lebih dekat dengan bodi selalu menghasilkan *turbulence kinetic energy* lebih besar dibandingkan dengan kecepatan aliran, sebaliknya pada FFST yang lebih jauh menghasilkan peristiwa yang berkebalikan.

Pernyataan sebelumnya bahwa untuk mereduksi aliran sekunder dibutuhkan aliran yang memiliki kriteria *end stagnation point* dan 3D disturbance thickness yang lebih menjauh dari bidang tumpu. Hal ini dipertegas bahwa dengan posisi 3D- $\delta$  yang semakin jauh selalu menghasilkan aliran viscous yang lebih banyak sehingga elemen fluida yang membentuk aliran sekunder semakin kuat. Teori tersebut diperkuat oleh teori terbentuknya aliran sekunder menurut Merati et al [5] akibat interaksi dua aliran viscous.

Jika FFST diletakkan pada posisi sangat dekat setelah terjadinya *reattachment* maka aliran tersebut belum tentu menghasilkan reduksi yang terbaik. Hal ini dipaparkan pada gambar 4-74 yang memperlihatkan kecepatan aliran pada posisi FFST  $L/C=4/12$ ,  $8/12$ , dan  $20/12$ . Garis evaluasi dilakukan pada posisi  $Y=0$  dan  $Z=0.001m$ . Posisi  $Z$  tersebut diambil sangat dekat bidang tumpu agar informasi pengaruh gesekan sangat tampak. Pembahasan ini dititik beratkan pada perbedaan profil kecepatan dan TKE antara  $L/C=4/12$  dan  $8/12$ . Pada kajian aliran sekunder sebelumnya mempertegas bahwa posisi yang paling optimal digunakan untuk mereduksi kerugian energi akibat aliran sekunder terjadi pada posisi  $L/C=8/12$  dibandingkan  $L/C=4/12$ . Berdasarkan pernyataan sebelumnya bahwa posisi  $L/C=4/12$  memiliki ESP yang menjauhi bidang tumpu sehingga memiliki aliran viscous yang lebih melimpah. Oleh karena dibutuhkan batasan kembali dimana posisi FFST optimal digunakan mereduksi terjadi kerugian energi akibat aliran sekunder. Kondisi ini memperlihatkan bahwa posisi yang semakin dekat

selalu didapatkan kecepatan yang lebih rendah di depan *leading edge*, namun pada daerah *trailing* didapatkan nilai kecepatan aliran yang lebih tinggi. Hal ini membuktikan peristiwa *bubble separation* terbukti dapat meningkatkan kecepatan aliran di daerah *downstream*.

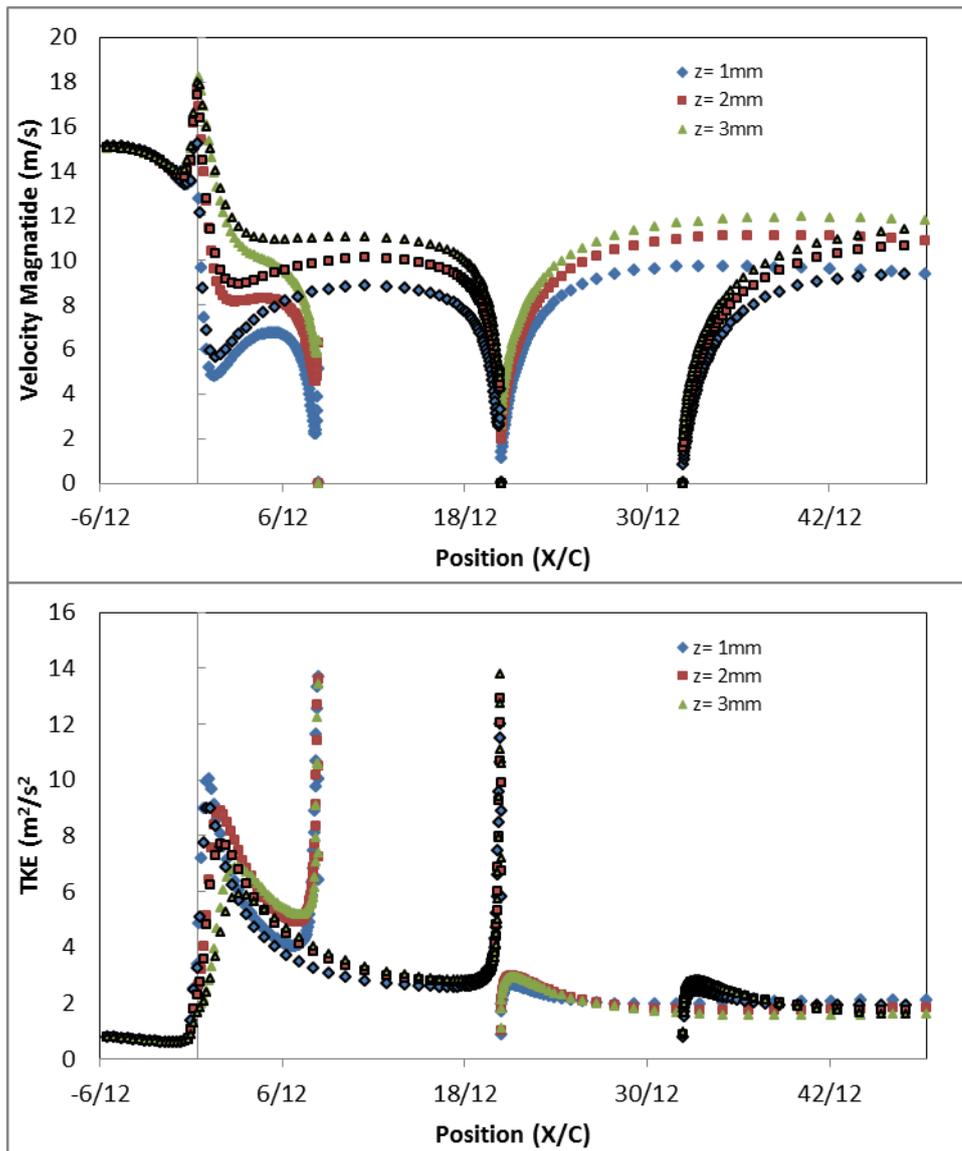


Gambar 4-74. Distribusi kecepatan dan TKE pada daerah *center*.

Pada TKE selalu berlawanan dengan terjadi kecepatan aliran secara konsisten, dimana ketika kecepatan semakin kecil maka selalu diimbangi dengan peningkatan TKE. Oleh karena itu pada penelitian ini didapatkan bahwa untuk mendapatkan penambahan FFST di indikasi oleh dua faktor, yaitu kecepatan

aliran dan posisi ESP. Posisi FFST tidak diletakkan terlalu dekat dengan posisi *reattachment* sebab TKE masih belum pada kondisi maksimal. Selain itu FFST tidak dapat terlalu jauh sebab posisi ESP semakin mendekati bidang tumpu sehingga komposisi aliran *viscous* semakin tipis. Hal ini tidak dapat terjadi sebab energi di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin kecil, sehingga kerugian energi akibat aliran sekunder semakin kuat. Kondisi ini tidak berlalu apabila dalam aliran tidak dijumpai *bubble separation* yang menghasilkan TKE aliran yang sangat besar.

Selain itu energi di dalam formasi *horseshoe vortex* selalu berasal dari *end stagnation point*, hal ini telah dijelaskan bawah aliran *free stream* dekat bidang gesek tidak mampu menyentuh bodi. Sehingga aliran tersebut membentuk *skewness boundary layer* bergerak mengitari bodi kontur diluar formasi *horseshoe vortex*. Pada penelitian ini menjelaskan bahwa posisi *end stagnation point* yang lebih jauh dari bidang tumpu menyebabkan aliran di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin kuat. Hal ini diungkapkan pada gambar 4-75, dimana posisi Z yang semakin besar menunjukkan bahwa kecepatan dan intensitas turbulensi semakin besar. Selain itu posisi FFST yang semakin dekat *leading edge* memiliki energi makro yang lebih kecil dan energi mikro yang lebih besar. Hambatan aliran khusus *adverse pressure* lebih mudah memanfaatkan energi mikro dibandingkan dengan energi makro, sehingga pada *trailing edge* energi makro aliran lebih tinggi dibandingkan dengan aliran tanpa adanya peningkatan energi mikro. Aliran tanpa FFST tidak terjadi peningkatan energi mikro yang sangat kuat, dimana pada aliran tersebut peningkatan energi mikro terjadi hanya akibat gesekan dengan permukaan lintasan yang identik dengan teori Reynolds. Dimana pada aliran internal nilai Reynolds berbanding lurus dengan panjang lintasan, semakin panjang lintasan aliran maka aliran semakin turbulen.

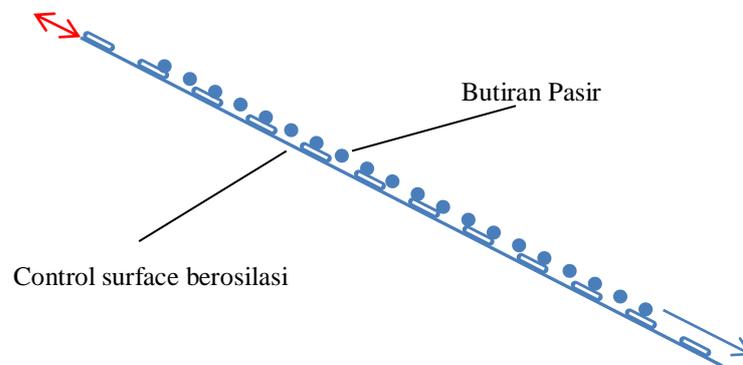


Gambar 4-75. Distribusi kecepatan dan TKE pada *leading edge* pada variasi posisi Z (ketinggian).

Pengaruh posisi pada *leading edge* menunjukkan bahwa posisi yang semakin jauh dari bidang tumpu didapatkan energi makro dan mikro yang lebih besar. Hal ini disesuaikan teori bahwa aliran dekat *inviscid flow* selalu menunjukkan energi yang sesuai dengan aliran *freestream*. Kondisi ini dimanfaatkan untuk masuk menuju formasi *horseshoe vortex* sehingga aliran sekunder tersebut mampu tereduksi.

#### 4.11 Arti Fisik Peran Energi Kinetik Turbulensi menjadi Energi Momentum.

Ilustrasi peran dari energi kinetik turbulen yang terindikasi berupa energi micro dikonversikan menjadi energi makro yaitu momentum aliran dalam *boundary layer*, dipaparkan seperti gambar 4-76. Energi turbulensi berbentuk getaran di *control surface* berosilasi sedangkan aliran fluida diwakili oleh pasir. Pergerakan aliran pada butiran pasir diakibatkan adanya gaya grafitasi akibat hasil perkalian sudut kemiringan.



Gambar 4-76 Ilustrasi Momentum aliran di dalam *boundary layer* menjadi TKE.

Ilustrasi ini menunjukkan bahwa elemen fluida berbentuk butiran pasir yang bergerak turun akibat gaya gravitasi. Kecepatan yang dihasilkan dipengaruhi oleh sudut kemiringan dan koefisien gesekan permukaan. Permukaan *control surface* yang tidak rata mengilustrasikan gaya gesek pada permukaan. TKE aliran dapat dinyatakan dengan besaran frekuensi yang diberikan pada *boundary condition*, semakin tinggi frekuensi maka TKE semakin besar. Akibatnya aliran fluida yang dinyatakan dalam butiran pasir melaju semakin cepat apabila *control surface* diberikan getaran dengan aliran. Ilustrasi ini menjelaskan bahwa TKE selalu membangkitkan kecepatan secara berangsur-angsur. Peningkatan kecepatan tersebut dipaparkan pada profil TKE yang semakin makin kecil selalu menghasilkan kecepatan aliran yang meningkat. Fenomena ini mempertegas teori yang diungkap sebelumnya bahwa TKE yang hilang selalu menjadi bentuk energi

lain berupa momentum aliran. Peningkatan momentum aliran tersebut selalu terjadi secara berangsur-angsur seiring melintasi lintasan bidang gesek. Berbeda halnya dengan adanya FFST dimana momentum aliran secara serentak menghilang menjadi *bubble separation*. Peristiwa tersebut menyebabkan perubahan serentak dimana momentum menjadi TKE yang sangat dasyat, apabila terjadi *massive separation* maka momentum tersebut tidak mampu bertransformasi menjadi momentum aliran. Semua energi momentum tersebut terkonversi menjadi peningkatan energi dalam dan losses, menurut hukum Gibbs dapat membangkitkan energi panas. Fenomena ini sangat tidak disukai oleh aliran fluida dimana energi tersebut tidak dapat menjadi energi kembali seperti dalam pernyataan fluida terdapat berbagai energi antara lain energi tekanan, kinetik dan potensial.

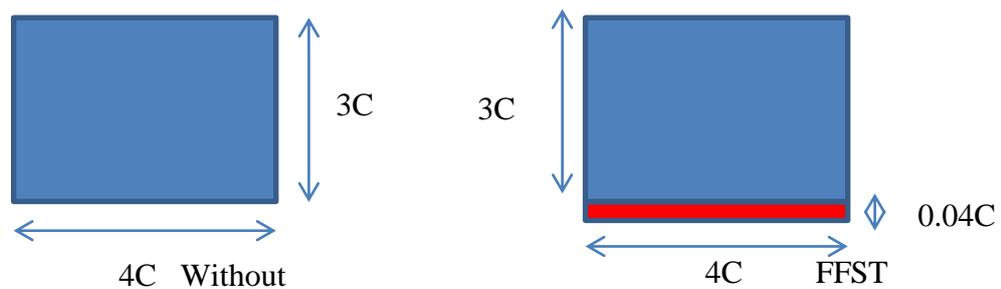
Keterlibatan *bubble separation* menyebabkan energi fluida semakin berkembang sebab terdapat energi tambahan berupa energi turbulensi. Energi turbulensi ini dinyatakan dengan *Turbulence Kinetic Energy* (TKE). Energi tersebut sejak abad 20 semakin populer untuk diteliti kembali sebagai alternatif energi aliran internal. Hal ini disebabkan peningkatan TKE tidak membutuhkan suatu usaha dari eksternal secara *massive*, melainkan dapat dilakukan dengan berikan sedikit gangguan (*disturbance*) pada aliran. Apabila gangguan tersebut berlebihan menghasilkan *massive separation*, dimana aliran tidak sempat kembali pulih (*reattachment*) sehingga aliran hancur dan meningkatkan kerugian energi. Apabila gangguan tersebut terlalu sedikit tidak berdampak terhadap aliran, maka gangguan tersebut tidak bermanfaat.

Oleh karena itu aliran dengan fenomena *bubble separation* dapat mempercepat perkembangan *boundary layer* aliran dari kondisi laminar menjadi turbulen. Berdasarkan teori turbulen selalu dipertegas aliran semakin kuat khusus di daerah aliran viscous. Fenomena ini diprediksi mampu mereduksi terjadi aliran sekunder yang terjadi pada aliran daerah persimpangan dua aliran viscous. Khusus daerah persimpangan tersebut sering terjadi di daerah kerja mesin-mesin turbo aksial, dimana memiliki radius putar yang pendek dan putaran yang tinggi. Teori ini mempetegaskan bahwa TKE dapat digunakan sebagai cadangan energi di dalam aliran fluida, yang selalu identik di dalam elemen fluida turbulen. Oleh karena itu peran dari turbulensi aliran merupakan fenomena yang sangat penting

sehingga *bubble separation* sangat menguntungkan. Fenomena aliran *bubble separation* yang terjadi di dalam aliran merupakan faktor penambahan energi cadangan di dalam aliran, dimana energi tersebut terkonversi secara bertahap.

#### 4.12 Pembuktian Dampak Variasi *Inlet Domain* Simulasi

Pemilihan metode domain *inlet* simulasi numerik antara tanpa dan dengan FFST memiliki perbedaan luasan area. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4-77, perbedaan luasan  $4C \times 0.04C = 0.16C^2$  dicurigai yang menyebabkan peningkatan kecepatan pada aliran dengan FFST. Oleh karena itu penelitian ini membuktikan bahwa peningkatan luasan di dekat bidang tumpu tidak mempengaruhi peningkatan kecepatan di daerah *downstream*.



Gambar 4-77 Perbedaan domain inlet tanpa dan dengan FFST.

Pembuktian ini dilakukan dengan variasi model domain inlet pada simulasi numerik. Metode yang digunakan dengan menyamakan Reynolds number yang terjadi di inlet. Perhitungan Reynolds didekatkan dengan aliran internal. Dimana persamaan Reynolds yang digunakan seperti persamaan 4.1.

$$Re_D = \frac{VD_h}{\nu} \dots\dots\dots 4.1$$

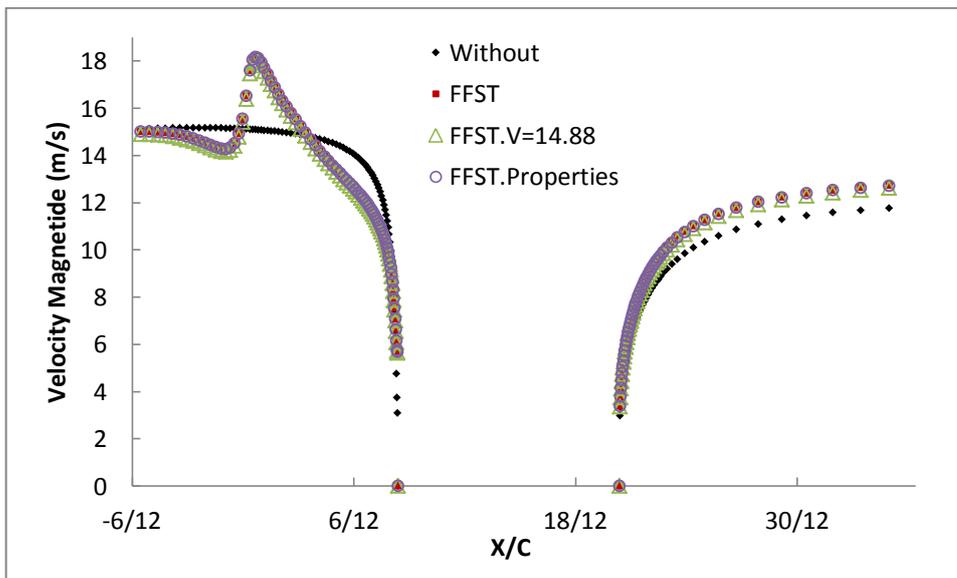
Sedangkan untuk Diameter Hidrolis,

$$D_h = \frac{4A}{P} \dots\dots\dots 4.2$$

Hasil perhitungan didapatkan untuk mendapatkan nilai Reynolds yang sama, maka kecepatan inlet diganti dari 15 m/s menjadi 14.88 m/s. Perbedaan ini

disebabkan perbedaan luasan pada inlet, hal ini dicurigai dapat meningkatkan kecepatan di daerah *downstream*. Pada FFST *properties* nilai dari viscositas kinematic ( $\nu$ ) disesuaikan dengan perbedaan nilai diameter hidrolis tanpa dan dengan FFST.

Distribusi kecepatan yang terjadi pada *center line* dipaparkan pada gambar 4-78. Data ini didapatkan pada posisi 1mm di atas bidang tumpu. Kondisi ini menjelaskan bahwa dampak penambahan luasan yang sangat kecil tidak mempengaruhi kecepatan yang signifikan di daerah *viscous flow*. Selain itu kecepatan di daerah *downstream* tidak mengalami peningkatan berarti, sehingga pengaruh dari luasan *inlet* tidak terlalu signifikan terhadap revolusi kecepatan aliran saat melintasi FFST dan bodi kontur. Peningkatan kecepatan di daerah *downstream* dihasilkan oleh penambahan FFST bukan dari penambahan energi dari *inlet* akibat pembesaran diameter hidrolis.



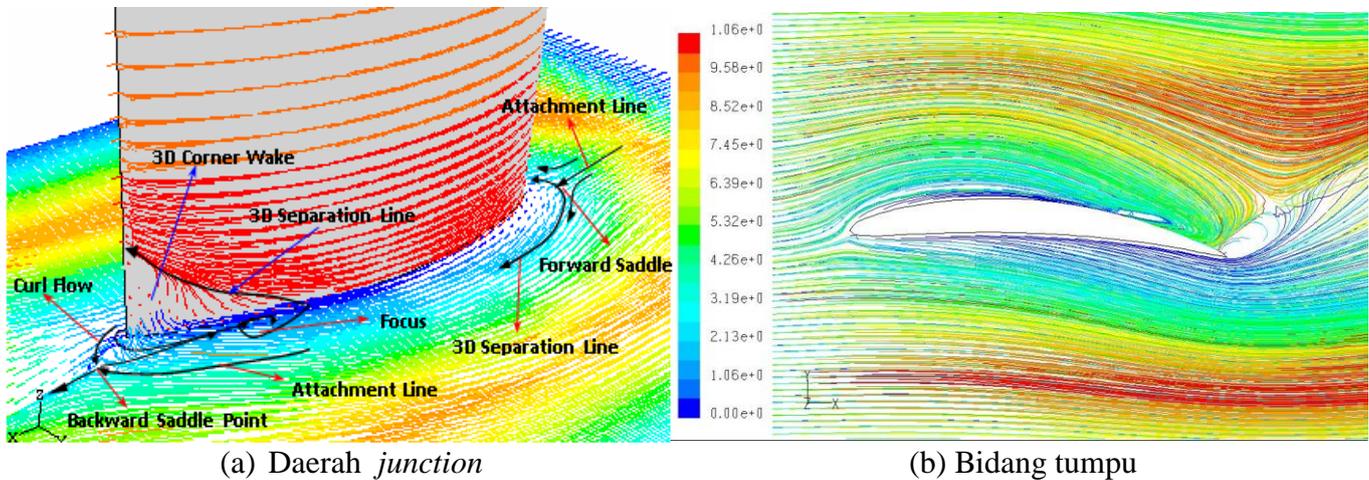
Gambar 4-78 Distribusi kecepatan pada *centerline*.

#### 4.6 Diskusi

Pada kompresor, fenomena *surging* merupakan kondisi terjadinya fluktuasi tekanan dengan frekuensi tinggi. Hal ini disebabkan oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara discharge keluar kompresor dan sistem perpipaan, akibat beroperasi di daerah kurang dari kapasitas minimal. Hal ini menyebabkan aliran balik (*back flow*) yang cukup besar dengan frekuensi yang tinggi di dalam blade kompresor, sehingga kompresor mengalami getaran yang sangat dahsyat. Fenomena ini disebut sebagai *surging*. Pada kompresor aksial peningkatan tekanan terjadi akibat peningkatan *angle of attack (incidence)* pada profil *blade*. Fenomena ini menyebabkan terjadi separasi aliran secara 2D di daerah *mid span*, apabila terjadinya separasi aliran menguasai daerah *blade* menyebabkan terjadinya fenomena *blade stall*. Sedangkan pada daerah *tip* dan *hub* akibat adanya aliran sekunder terjadinya separasi aliran menjadi semakin awal. Peningkatan stagger pada kompresor aksial menyebabkan fenomena *wall stall* dimana aliran tidak dapat melintasi daerah aliran sekunder. Fenomena ini dapat memperkuat terjadi *surging* di aksial kompresor sehingga dengan mereduksi aliran sekunder dapat menunda terjadinya *surging*.

Penelitian ini mengobservasi aliran sekunder dekat dinding bodi tunggal. Pada penelitian serupa Mirmanto dan Sasongko [4] ditampilkan pada gambar 4-79, topologi aliran sekunder dekat dinding pada bodi tunggal 9C7/32.5C50 di daerah interaksi (*junction*) dan bidang tumpu. Aliran sekunder yang terjadi selalu dimulai terbentuknya *forward saddle point (FSP)* depan *leading edge*, kemudian FSP menyebabkan *3D separation line*. Garis *3D separation line* ini menandakan bahwa secara lokal disepanjang garis tersebut aliran terpisah dari dinding dan diarahkan menjauhi dinding, membentuk lokal *separation vortex* disepanjang garis separasi. Lapisan batas ini selanjutnya menggulung (*rolls-up*) dan menyelimuti bodi selanjutnya bergerak menuju *downstream*. Vortex ini lalu membentuk formasi *streamwise vorticity* dan menjadi aliran sekunder di daerah pojok antara pangkal sudu dengan pelat datar. Oleh peneliti-peneliti sebelumnya vortex seperti ini dinamakan sebagai *horseshoe vortex*. Pada perkembangannya garis *3D separation line* ini juga berfungsi sebagai *dividing surface* yaitu, garis

yang membatasi aliran diluar agar tidak saling bertabrakan dengan aliran yang berada di daerah separasi.



(a) Daerah *junction* (b) Bidang tumpu  
 Gambar 4-79 Topologi aliran sekunder pada bodi tunggal 9C7/32.5C50,  $\alpha=4^\circ$  [4]

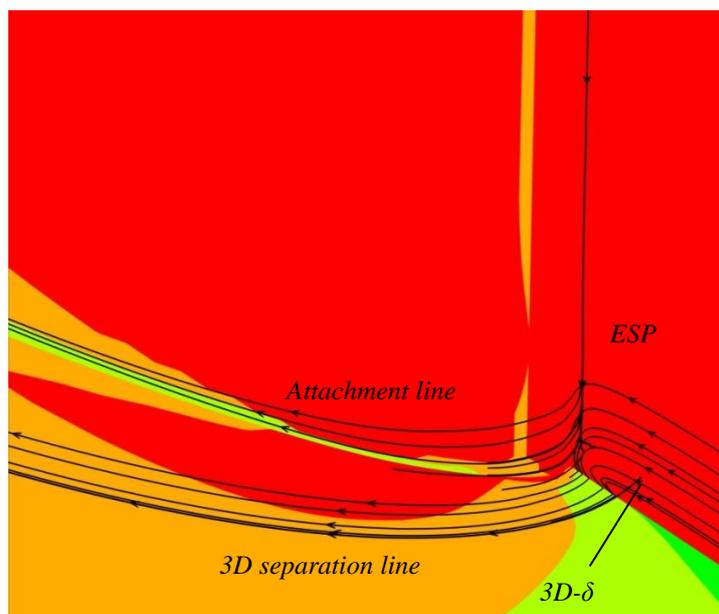
Topologi aliran sekunder pertama diungkap oleh Tobak dan Peake [2],[3] merupakan teori dasar mengamati pola aliran. Penelitian ini menghasilkan pembaruan informasi tentang terbentuk aliran sekunder. Mirmanto dan Sasongko [4] menyatakan bahwa terbentuk *horseshoe vortex* dipengaruhi oleh posisi *forward saddle point* (FSP) terhadap *leading edge*. Sebab FSP selalu membentuk dua *3D separation line* yang melingkupi bodi kontur. Daerah lingkupan tersebut diprediksi dapat memaparkan terjadinya *blockage* di daerah *downstream*.

Topologi aliran sekunder pertama diungkap oleh Tobak dan Peake **Error! Reference source not found.**,[3] merupakan teori dasar mengamati pola aliran. Penelitian ini menghasilkan pembaruan informasi tentang terbentuk aliran sekunder. Mirmanto dan Sasongko [4] menyatakan bahwa terbentuk *horseshoe vortex* dipengaruhi oleh posisi *forward saddle point* (FSP) terhadap *leading edge*. Sebab FSP selalu membentuk dua *3D separation line* yang melingkupi bodi kontur. Daerah lingkupan tersebut diprediksi dapat memaparkan terjadinya *blockage* di daerah *downstream*.

Hasil eksperimen *oil flow visualization* (OFV) pada penelitian ini dipertegas dengan hasil simulasi numerik dan paparan *post processing* TECPLOT, dapat menginformasikan lebih detail aliran di dalam lingkup *horseshoe vortex*.

Dimana bentuk aliran tersebut sangat kompleks sehingga hasil eksperimen tidak mampu memaparkan pola aliran sekunder dengan jelas. Hasil penelitian ini menginformasikan bahwa ESP merupakan batas aliran 2D dan 3D. Fenomena ini sesuai dengan teori airfoil bahwa aliran 2D selalu dijumpai titik stagnasi pada bodi. Apabila tidak dijumpai titik stagnasi maka daerah tersebut merupakan daerah aliran 3D.

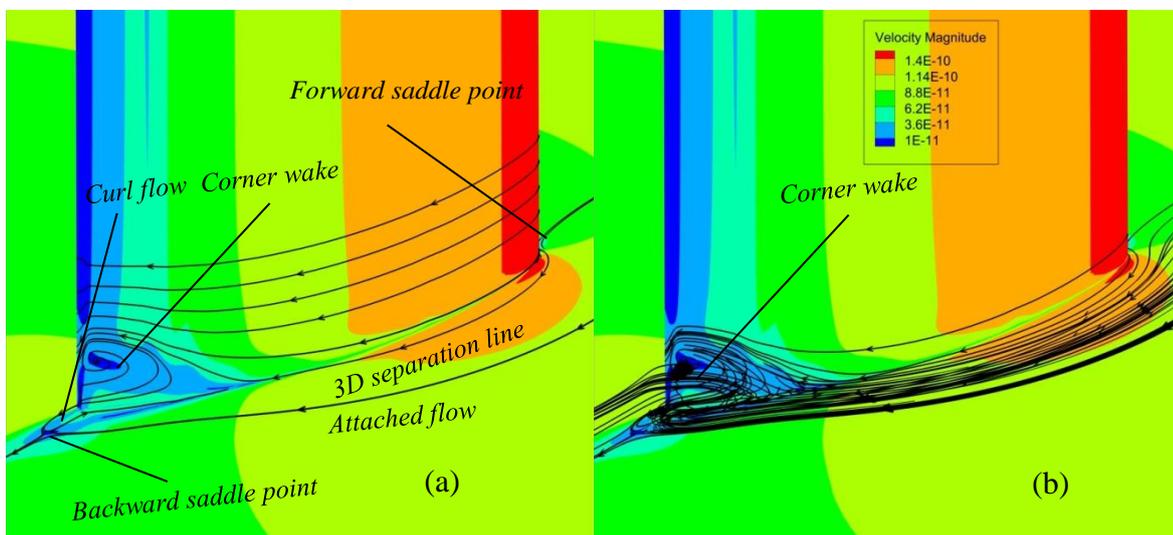
Aliran fluida yang terjadi di dalam daerah aliran 3D terdiri dari dua bentuk aliran. Aliran yang mampu menyentuh *leading edge* membentuk *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex*. Sedangkan aliran yang tidak mampu menyentuh *leading edge* bodi bergerak dan bergabung dengan *3D separation line*. Pada penelitian ini batas aliran yang tidak menyentuh tersebut disebut sebagai *3D-disturbance thickness* ( $3D-\delta$ ). Pada gambar 4-80 ditunjukkan ESP dan  $3D-\delta$  pada bidang tumpu bodi tunggal.



Gambar 4-80 ESP dan  $3D-\delta$  pada bodi tunggal 9C7/32.5C50,  $\alpha=4^\circ$ .

Hasil numerik pada penelitian diperlihatkan pada gambar 4-81, dimana tampilannya disama dengan hasil penelitian Mirmanto dan Sasongko [4] gambar 4-79. Hasil penelitian ini diperlihatkan topologi yang indentik, dimana yang selalu dijumpai FSP, *3D separation line*, *curl flow*, dan BSP. Selain itu pada  $\alpha=4^\circ$  penelitian ini tidak menjumpai terjadinya fenomena *focus* atau *foci*. Pada

penelitian ini memaparkan bahwa *3D separation line* tidak mampu bergerak menuju *downstream* dan terjebak lalu bermuara di *corner wake*. Akibat ketidakmampuan aliran tersebut maka daerah *corner* mengalami *blockage*, sehingga *backward saddle point* terbentuk oleh pertemuan *curl flow* dan *attached flow* di luar formasi *horseshoe vortex*. Pada penelitian terdahulu *3D separation line* dan *attachment line* tidak memiliki keterkaitan yang jelas terhadap terbentuknya aliran sekunder, sedangkan pada  $\alpha=4^\circ$  terjadinya *focus* tampak kurang jelas. Oleh karena itu penelitian ini dapat memaparkan hubungan *3D separation line* dan *attachment line* dengan paparan *streamline* aliran di bidang tumpu.

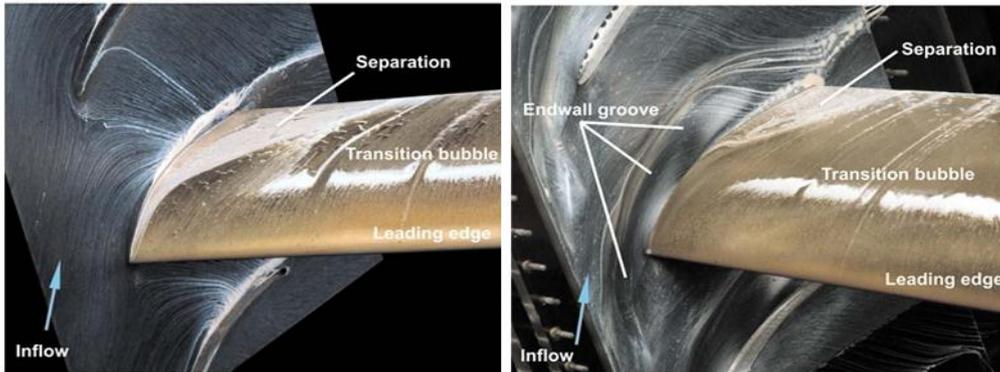


Gambar 4-81 Topologi aliran sekunder bodi tunggal 9C7/32.5C50,  $\alpha=4^\circ$ , (a) *streamline surface*, (b) *streamline volume*

Penelitian ini dihasilkan dua *uniqueness* dasar yaitu tentang pembaharuan evolusi detail aliran sekunder atau *3D flow* khusus di daerah dekat bidang tumpu (*endwall*). Hasil ini berperan untuk meningkatkan kinerja dari mesin-mesin turbo. Lakshminarayana dan Horlock [1] memaparkan peran dari aliran sekunder dapat menyumbang kerugian hidrolis yang dominan, sehingga dengan mereduksi aliran sekunder dapat secara langsung meningkatkan kinerja mesin-mesin turbo.

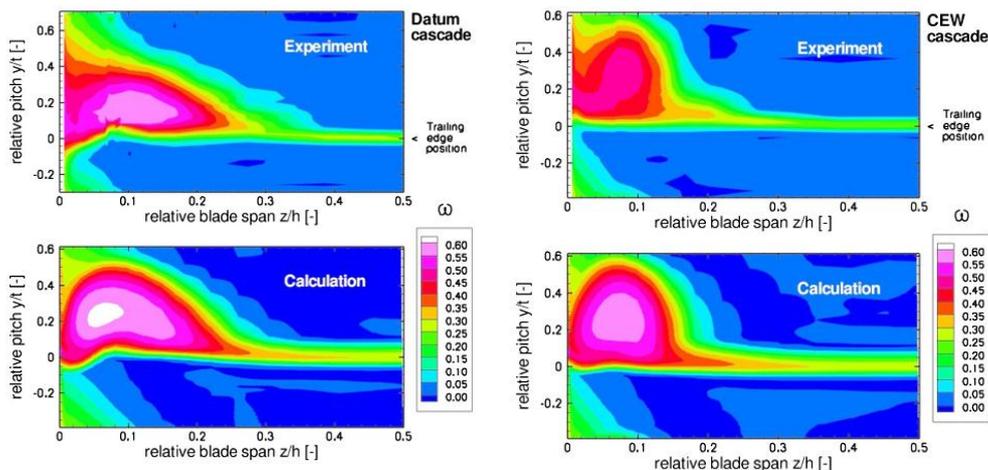
Pada gambar 4-82 dipaparkan hasil penelitian Hergt et al [57] dengan memodifikasi bidang tumpu. Hasil tersebut diperlihatkan bahwa *endwall groove* dapat mereduksi terjadi *corner wake* di daerah *downstream*. Penelitian tersebut

dilakukan dengan metode kaskade kompresor. Kerugian energi akibat aliran sekunder dapat dilakukan dengan paparan kontur *total pressure loss* di daerah *downstream* seperti pada gambar 4-83. Pada penelitian tersebut dilakukan dengan cara eksperimen dan numerik. Secara keseluruhan hasil numerik dapat mempresentasi secara detail sehingga dapat dijadikan alat untuk analisa detail aliran sekunder.



Gambar 4-82 OFV perbandingan without dan groove pada bidang tumpu (*endwall*). [57]

Namun penelitian tersebut tidak membahas aliran sekunder secara detail. Oleh karena itu penelitian ini melakukan kajian dasar terbentuk aliran sekunder khususnya di daerah bodi tunggal bidang tumpu. Sebab fenomena aliran sekunder pada bodi tunggal merupakan fenomena dasar aliran sekunder jika dibandingkan dengan kaskade kompresor.



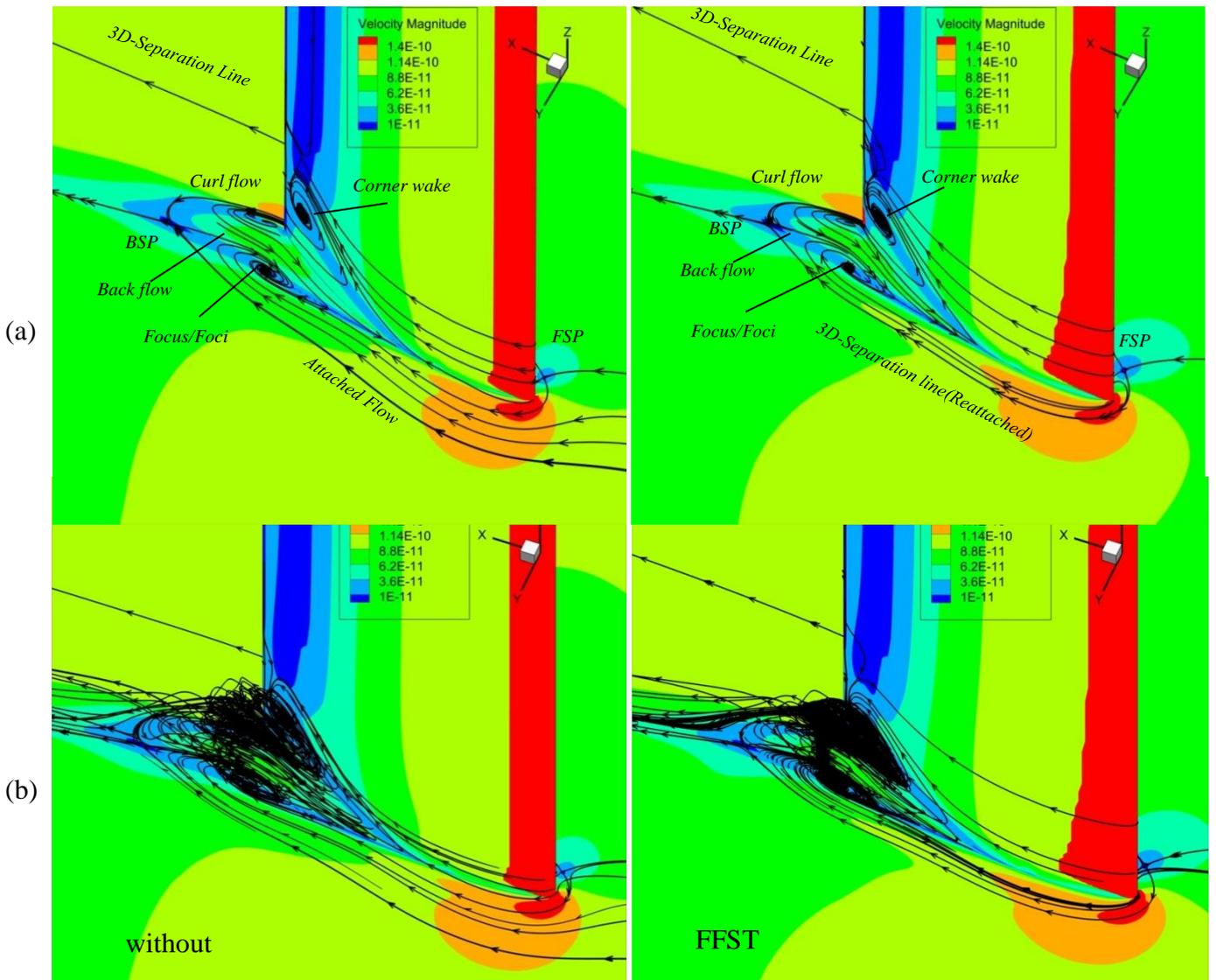
Gambar 4-83 *Total pressure loss* perbandingan without dan groove pada bidang tumpu (*endwall*). [57]

Modifikasi pada kontur bidang tumpu dapat meningkatkan turbulensi aliran. Serry *et al* [27] memaparkan intensitas turbulensi yang tinggi dihasilkan oleh pembangkit turbulensi jenis *forward facing step turbulator* (FFST). Hal ini disebabkan FFST menghasilkan dua daerah resirkulasi aliran. Aliran dengan turbulensi yang tinggi selalu memiliki komponen fluktuasi kecepatan yang random sehingga diperlukan evaluasi pola turbulensi. TKE merupakan bentuk energi kinetik dari fluktuasi kecepatan. Energi ini mampu mereduksi aliran sekunder dengan baik apabila karakter turbulensinya terjadi secara random, frekuensi tinggi dan amplitude kecil. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *flatness* yang lebih rendah dan *skewness* yang positif. *Skewness* yang positif mempresentasikan bahwa aliran tersebut tidak dijumpai *back flow*.

Karakteristik turbulensi aliran setelah terjadinya *bubble separation* momentum aliran secara serentak terkonversi menjadi *turbulence kinetic energy* (TKE), yang diimbangi dengan reduksi kecepatan. Setelah aliran melintasi *bubble separation* momentum aliran mengalami peningkatan secara berangsur-angsur seiring dengan melemahnya TKE.

*Uniqueness* aliran dengan TKE tinggi apabila di letak sangat dekat daerah *blockage* pada aliran sekunder, dihasilkan reduksi yang tidak efektif. Hal ini disebabkan bahwa TKE tidak dapat secara langsung dimanfaatkan oleh aliran sekunder. TKE yang dapat mereduksi aliran sekunder merupakan TKE yang telah terkonversi menjadi momentum aliran, sehingga membutuhkan proses relaksasi agar peningkatan momentum aliran terjadi tepat pada daerah *blockage* akibat aliran sekunder. Apabila posisi TKE telah terkonversi semua menjadi momentum, maka kondisi ini indentik dengan aliran tanpa *turbulence generator*.

Dampak posisi FFST terhadap bodi kontur dapat mempengaruhi jumlah aliran sekunder yang tidak mampu menyentuh *leading edge*, Posisi ini perlu dioptimalkan untuk setiap bentuk dimensi FFST, hasil yang terbaik didapatkan dengan nilai  $3D-\delta$  yang paling tebal. Pada penelitian ini ditunjukkan bahwa posisi terbaik berada pada  $L/C=8/12$ . *Uniqueness* atau *Novelty* penelitian ini menginformasikan ESP dan  $3D-\delta$  merupakan faktor penentu terbentuk aliran sekunder sebelum terbentuk FSP. Perlakuan aliran dengan TKE yang tinggi berdampak langsung terhadap topologi perlakuan aliran sekunder.

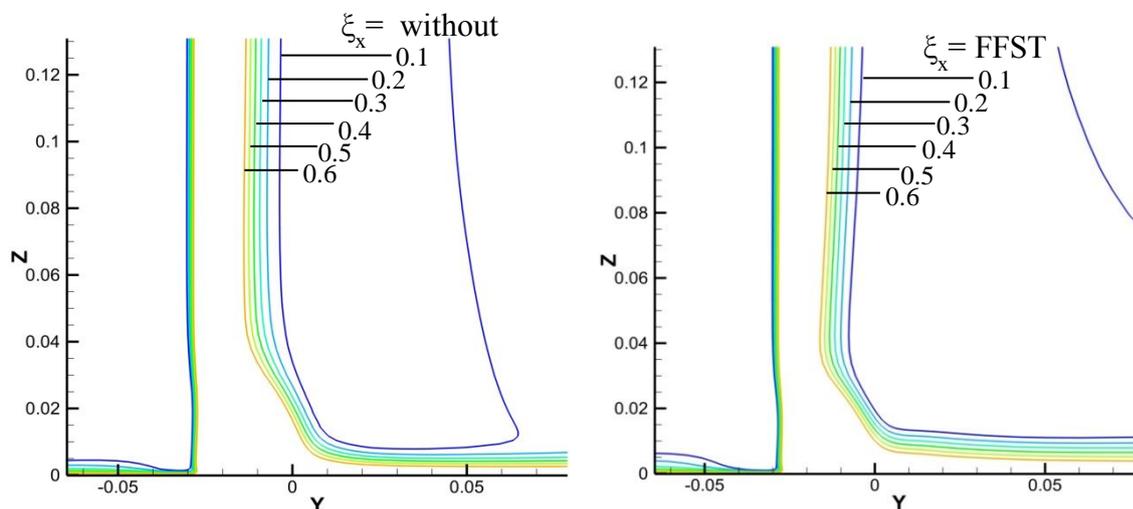


Gambar 4-84 Perbandingan Topologi aliran sekunder bodi tunggal 9C7/32.5C50,  $\alpha=12^\circ$  tanpa dan dengan FFST, (a) *streamline surface*, (b) *streamline volume*

Pada gambar 4-84 diperlihatkan perbedaan topologi aliran sekunder dengan turbulensi yang berbeda pada bodi tunggal 9C7/32.5C50,  $\alpha=12^\circ$ . Perbedaan turbulensi ini disebabkan oleh penambahan FFST khususnya di bidang tumpu. Fenomena ini disebabkan fenomena *bubble separation* yang dapat meningkatkan turbulensi aliran. Dampak penambahan FFST menyebabkan posisi ESP semakin menjauh dari bidang tumpu sehingga komposisi aliran viscous semakin luas. Akibat hal itu berdampak pada peningkatan energi aliran di dalam formasi *horseshoe vortex*, sehingga *attachment line* dari *leading edge* semakin

mampu mendesak *Forward Saddle Point* (FSP) menjauhi bodi dan *3D separation line* yang terjadi semakin menjauhi bodi kontur. Aliran fluida dari *upstream* yang tidak mampu menyentuh *leading edge* dengan kondisi batas 3D- $\delta$  yang semakin kuat menyebabkan *3D separation line* mampu *reattachment*. Selain itu *attachment line lower side* yang lebih kuat akibat penambahan FFST menyebabkan *curl flow* semakin lemah.

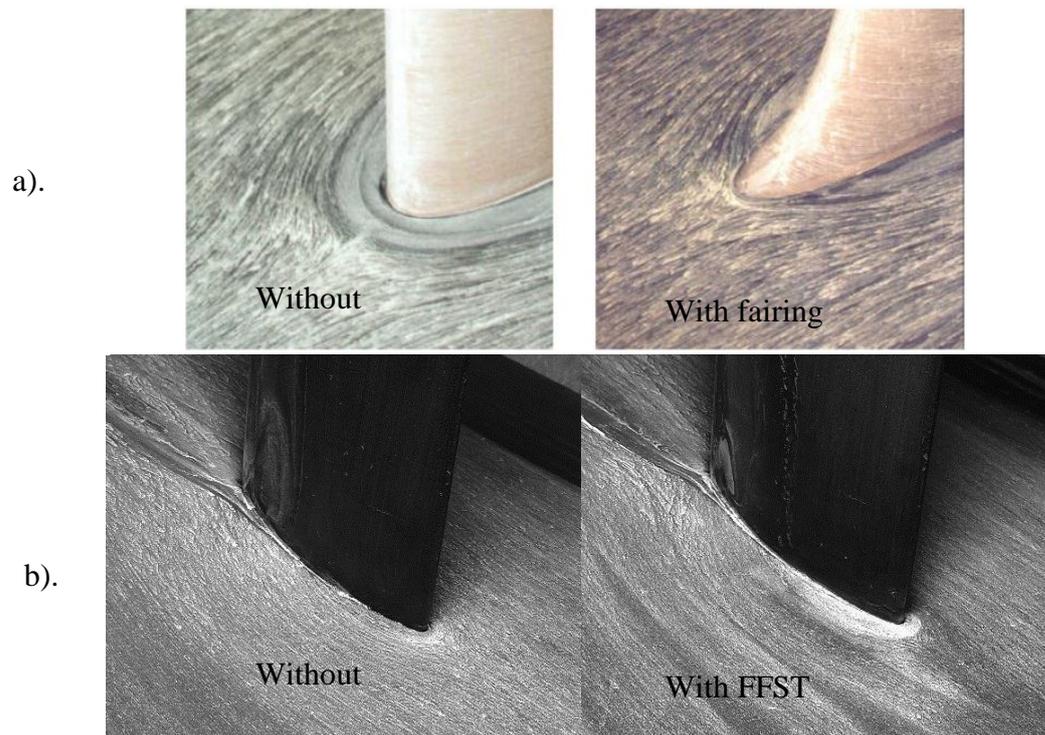
Penambahan FFST menyebabkan BSP yang terbentuk oleh tumbukan *curl flow* yang lemah dan *3D-separation line* yang mampu *reattached*. Dampak *backflow* yang lemah menyebabkan terjadi *focus* atau *foci* di daerah *upper side* lebih kecil sehingga *blockage* juga semakin kecil. Selain itu *back flow* semakin lemah menyebabkan aliran tersebut bermuara di daerah *corner*. Oleh karena itu peningkatan turbulensi aliran melalui penambahan FFST berdampak secara langsung terhadap topologi aliran sekunder, sehingga reduksi kerugian energi akibat aliran sekunder semakin efektif. Penyumbatan aliran dapat diperlihatkan dengan *axial total pressure loss coefficient* ( $\xi_x$ ) di daerah *downstream*, pada gambar 4-85. Seperti yang dipaparkan oleh Hergt *et al* [57].



Gambar 4-85 Perbandingan *Axial pressure loss coefficient* pada bodi bodi tunggal 9C7/32.5C50,  $\alpha=12^\circ$ .

Salah satunya penelitian Steeanert *et al* [16], yang dipaparkan pada gambar 4-86. Hasil penelitiannya menyatakan bahwa FSP yang semakin dekat dengan *leading edge* dihasilkan *3D separation line* yang semakin berimpit dan mendekati pada kontur bodi. Pada teori terdahulu fenomena ini selalu mengindikasikan terjadinya *horseshoe-vortex* semakin kecil. Peningkatan intensitas turbulensi menyebabkan FSP memiliki fenomena berkebalikan dari hasil Steeanert *et al* [16], dimana FSP semakin menjauhi kontur bodi menyebabkan *3D separation line* semakin luas, namun *corner wake* di dalam formasi *horseshoe vortex* semakin lemah. Oleh karena itu pada kasus aliran dengan intensitas turbulensi yang tinggi, teori aliran sekunder sebelumnya harus dilengkapi dengan teori terbentuk FSP yang merupakan informasi pembaharuan tentang topologi aliran sekunder. Perbedaan fenomena ini diperlihatkan gambar 4-86 penambahan *fairing leading edge* dan *forward facing step turbulent generator* (FFST).

Penambahan FFST pada bidang tumpu secara sistematis dapat meningkatkan turbulensi aliran tanpa *resource* energi di luar kondisi batas. Pada kompresor aksial penambahan FFST pada bidang tumpu dapat secara langsung meningkatkan unjuk kerjanya. Hal ini terjadi akibat reduksi aliran sekunder di daerah *junction* sehingga berdampak pada kerugian energi di daerah *downstream*. Energi aliran di daerah *downstream* yang kuat dapat menunda terjadinya *separation 3D* sehingga *blockage* yang terjadi semakin kecil. Fenomena ini dapat menunda terjadinya *surgings* sehingga memperluas daerah operasi kerja kompresor.



Gambar 4-86 Perbandingan hasil eksperimen OFV  
a). Fairing , b). FFST.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penambahan FFST pada bidang tumpu menyebabkan fenomena dua *bubble separation* sehingga transisi aliran dari laminar menjadi turbulen terjadi lebih singkat. Fenomena *bubble separation* merupakan *flapping of dividing streamline* (*low frekuensi steadiness*) sehingga ukuran *bubble separation* selalu berubah terhadap waktu (*time dependent*). Akibatnya ukuran *bubble separation* dinyatakan dengan *reattachment zone*. Karakteristik turbulensi aliran yang baik untuk mereduksi aliran sekunder harus memiliki nilai *skewness* bernilai positif sehingga tidak dijumpai *reverse flow*, sedangkan untuk *flatness* diharapkan memiliki nilai yang lebih kecil, dimana frekuensi turbulensi tinggi dan amplitude kecil. Fenomena ini menyebabkan aliran lebih turbulen sehingga separasi aliran lebih tertunda. Berikut ini fenomena *bubble separation* yang terjadi akibat penambahan FFST di bidang tumpu (*endwall*).

1. Peristiwa dimensi FFST lebih dari  $d/L=1.8\%$  dihasilkan peningkatan *reattachment zone* yang besar.
2. Terjadinya peningkatan TKE (intensitas turbulensi/ *fluctuation velocity component*) yang besar secara serentak.
3. Menyebabkan reduksi *mean velocity* secara drastis.
4. Setelah *reattachment*, TKE (*Micro*) secara berangsur-angsur terkonvensi menjadi *mean velocity (macro)* aliran kembali.

Penelitian ini menghasilkan pembaharuan terhadap teori topologi aliran sekunder. Zona terjadi aliran sekunder pada bodi tunggal dekat bidang tumpu dibatasi oleh akhir terbentuknya titik stagnasi di daerah *leading edge* bodi. Zona tersebut disebut sebagai *end stagnation point* (ESP). Teori ini sesuai dengan teori aliran sekunder dan aliran 2D (airfoil). Pada teori aliran sekunder merupakan interaksi dua lapis batas aliran viscous antara bidang tumpu dan bodi tunggal. Sedangkan pada teori aliran 2D selalu dijumpai titik stagnasi pada bodi, jika tidak dijumpai maka termasuk daerah aliran sekunder (*3D-separation flow*).

Pada aliran sekunder terbagi menjadi dua daerah yaitu aliran yang masih mampu menyentuh *leading edge* dan aliran yang tidak mampu menyentuh *leading edge*. Batas aliran yang tidak mampu menyentuh *leading edge* disebut sebagai  $3D-\delta$  (*3D disturbance thickness*). Pembaharuan topologi aliran sekunder antara lain :

1. *End stagnation point* (ESP), sangat menentukan terhadap ukuran formasi horseshoe vortex.
2. Aliran yang mampu menyentuh *leading edge* selalu bergerak menuju *attachment line* di dalam formasi *horseshoe vortex*.
3. Aliran yang tidak mampu menyentuh *leading edge* bergerak menuju *separation line 3D*. Batas aliran tersebut disebut sebagai  $3D-\delta$ , yang mencerminkan ketebalan formasi *horseshoe vortex*.
4. *Forward saddle point* (FSP) sangat dipengaruhi terbentuknya *end stagnation point* (ESP) dan *3D disturbance thickness* ( $3D-\delta$ ).
5. *Curl flow* terbentuk oleh aliran *attachment line lower side* di dalam formasi *horseshoe vortex*.

Penelitian ini menghasilkan evolusi topologi aliran sekunder akibat penambahan FFST pada bidang tumpu. Penambahan FFST menyebabkan posisi ESP semakin menjauhi bidang tumpu sehingga komposisi aliran viscous semakin kuat. Fenomena itu berdampak terhadap aliran semakin kuat *mean velocity* dan *fluctuation velocity component* di dalam formasi *horseshoe vortex*.

Perubahan topologi aliran sekunder akibat peningkatan turbulensi aliran :

1. Posisi ESP semakin menjauhi bidang tumpu sehingga menghasilkan *attachment line* yang lebih kuat.
2. *Attachment* yang kuat menyebabkan posisi FSP menjauhi *leading edge* bodi kontur.
3. *Attachment lower side* yang kuat berdampak pada komposisi *attachment line* lebih banyak bergerak menuju *downstream* sehingga *curl flow* semakin lemah
4. *Attachment* yang kuat dan posisi  $3D-\delta$  yang menjauhi bidang tumpu menyebabkan *3D separation line* mampu *reattached*.

Hasil penambahan FFST di bidang tumpu mampu mereduksi aliran sekunder antara 10-25%, hal ini sangat tergantung dari bentuk profil bodi *angle of attack* , dan *camber*. Penggunaan FFST yang menyebabkan terjadinya peristiwa *bubble separation* sehingga dihasilkan *Turbulence Kinetic Energy*(TKE). Pemanfaat TKE tidak dapat digunakan langsung untuk mereduksi terjadinya aliran sekunder. Reduksi aliran sekunder membutuhkan momentum aliran yang lebih kuat, sedangkan TKE dapat berevolusi menjadi momentum aliran sehingga dibutuhkan proses relaksasi. Proses relaksasi ini disesuaikan dengan kondisi bodi kontur dan bidang tumpu yang dilalui oleh fluida.

Peningkatan TKE ini merupakan hal yang sangat unik terjadi pada aliran turbulen. Teori kelembaman gaya pada hukum Newton I merupakan salah satu energi yang dihasilkan oleh peristiwa *bubble separation*. TKE merupakan cadangan energi aliran yang masuk di dalam formasi *horseshoe vortex* melalui ESP. *Corner wake* terjadi akibat interaksi beberapa *attachment line* yang berasal dari *3D-Disturbance thickness* dan *End Stagnation Point di leading edge*. **Hal ini merupakan teori baru, bahwa aliran dengan *Flucluating Component Velocity* (TKE) yang tinggi lebih efektif mereduksi terjadinya *blockage* pada daerah *corner*, jika dibandingkan dengan memperkuat *Mean Velocity*.** Karena *Mean velocity* tidak langsung dapat masuk di dalam formasi aliran sekunder.

Dimensi FFST yang digunakan  $d = 4.8 \text{ mm}$ ,  $d/Lu = 0.075$  proses optimasi pada bodi  $C = 120 \text{ mm}$  didapatkan  $L/C = 8/12$ . Peristiwa penggunaan FFST secara konsisten ditunjukkan pada perubahan *angle of attack* dan *camber*. Peningkatan *angle of attack* dan *camber* berdampak sebagai berikut ini :

1. Posisi ESP tidak terpengaruhi oleh peningkatan  $\alpha$ .
2. Pergeseran FSP semakin menuju *lowerside* dan luasan daerah tekanan maksimum seiring dengan peningkatan  $\alpha$  semakin berkurang.
3. Pergerakan FSP semakin signifikan seiring dengan peningkatan  $\alpha$  .
4. Daerah tekanan minimum pada *trailing edge* semakin bergerak menuju arah *upstream upper side*.
5. *Reduction Curl flow* seiring dengan peningkatan  $\alpha$  semakin besar.
6. Terjadinya *focus* seiring dengan peningkatan  $\alpha$  akan tampak semakin tereduksi, sedang pada sudut  $\alpha = 8^\circ$  *focus* tidak tampak dekat bidang tumpu.

## 5.2 Saran

Pemanfaat penambahan FFST pada bidang tumpu terbukti mampu mereduksi terjadi aliran sekunder. Oleh karena itu aplikasi FFST dapat digunakan untuk mendesain bentuk profil *hub* atau *casing* yang komperhensif. Selain itu penelitian dapat dilanjutkan dalam konfigurasi susunan *cascade compressor* dan turbin. Sebab perlakuan aliran sekunder pada susunan kaskade memiliki komposisi yang lebih kompleks dan rumit.

Reduksi aliran sekunder dapat dilakukan dengan cara sama dengan mereduksi separasi aliran pada aliran 2D, antara lain menghisap aliran terseparasi tersebut atau menginjeksikan aliran yang kuat pada daerah aliran terseparasi. Oleh karena itu penelitian ini dapat dilanjutkan dengan memindahkan aliran daerah *inviscid flow* menuju daerah *corner wake*. Selain itu peningkatan kekasaran (*roughness*) permukaan bidang tumpu dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran *mean flow* sehingga upaya tersebut indentik dengan penambahan FFST penelitian ini.

Harinaldi et al [58] melakukan reduksi drag pada bodi kendaraan melalui pembangkitan plasma. Pembangkitan plasma tersebut menggunakan *power supply* AC dan mampu mereduksi koefisien drag sebesar 22%. Fenomena ini indentik dengan peningkatan intensitas turbulensi aliran sehingga dapat diterapkan untuk mereduksi aliran sekunder di daerah interaksi bodi tunggal bidang tumpu. Oleh karena itu penelitian reduksi aliran sekunder dapat menerapkan pembangkitan plasma seperti yang telah dilakukan oleh Harinaldi et al [58].

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Horlock, J.H., Lakshminarayana, B., (1987), "Leakage and Secondary Flows in Compressor Cascades", Ministry of Technology Aeronautical Research Council Report and Memoranda No.3483.
- [2]. Tobak, M., Peake, D.J., (1981), "Topology of Two Separated and Three Dimensional Separated Flow", NACA Technical Report.
- [3]. Tobak, M., Peake, D.J., (1982), "Topology of Three Dimensional Separated Flow", NACA Technical Report.
- [4]. Mirmanto, Sasongko, (2009), "Reduksi Kerugian Sekunder Melalui Penambahan Leading Edge Fairing". Jurnal Teknik Mesin ITS Surabaya, Mei 2009.
- [5]. Merati, P & McMahan, H.M., (1991), "Experimental Investigation of a Turbulent Flow in The Vicinity of an Appendage Mounted on a Flat Plate", Journal of Fluid Engineering, vol 113, pp. 635 – 642.
- [6]. Abdulla, A. K., Bhargava, R. K., and Raj, R., (1991), "An Experimental Study of Local Wall Shear Stress, Surface Statics Pressure, and Flow Visualization Upstream, Alongside, and Downstream of a Blade Endwall Corner", Journal of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 626-632.
- [7]. Surana, A., Grunberg, O., Haller, G., (2006), "Exact Theory of Three Dimensional Flow Separation", Part I: Steady Separated, Journal of Fluid Mechanics, vol 564, pp.57-103.
- [8]. Surana, A., Jacobs, G., Grunberg, O., (2006), Haller, G., "Exact Theory of Three Dimensional Flow Separation", Part II: Fixed Unsteady separation, under consideration for publication in Journal of Fluid Mechanics.
- [9]. Surana, A., Jacobs, O., Haller, G., (2007), "Extraction of Separation and Attachment Surfaces from Three – Dimensional Steady Shear Flows", AIAA Journal Vol.45, No6.
- [10]. Hermanson, K.S., and Thole, K.A., (2002), "Effect of No uniform Inlet Conditions on Endwall Secondary Flows", Journal of Turbo machinery Vol 124, pp. 623-631.
- [11]. Kang, S., Hursch, C., (1993), "Experiment Study on The Three Dimensional Flow With in A Compressor Cascade With Tip Clearance: Part I= Velocity and Pressure Fields", Jurnal of Turbomachinery, Vol.155 pp.435-443.
- [12]. Storer, J.A., Cumpsty, N.A., (1991), "Tip Leakage Flow in Axial Compressor", Journal of turbomachinery Vol 113.
- [13]. Sasongko, H., (1997), "Rand und Splatstromungen in Strak gestaffelten Verdichtergitter aus Schwach gewolbten Profilen", ZLR-Forschungsbericht01.
- [14]. Devenport, W. J., dan Simpson, R. L., (1990), "Time Dependent and Time Averaged Turbulent Structure Near the Nose of a Wing-Body Junction", Journal of Fluid Mechanics, vol.210, pp.23-55.
- [15]. Devenport, W.J., Simpson, R. L., (1992), "An Experimental Study of a Wing-Body Junction and Wake Flow", AIAA Journal-92-0434 99. 1-12.

- [16]. Steenaert, C.B., Oudheusden, V., Boermans, L. M. M.,(2002),”Simple Approach for the Design of a Wing Body Fairing”, CEAS Aerospace Aerodynamics Research Cambridge, UK.
- [17]. Schlichting, H,(1962),”Boundary Layer Theory 4rd Edition”, McGraw-Hill,Washington DC.
- [18]. Sutardi,Chi. C. Y.,(1999),”Effect of Tranverse Square on Turbulent Boundary Layer”, Experimental Thermal and Science.20 pp 1-10.
- [19]. Wahidin, R., Chakroun, W., Al-Fahed, S.,(2005), “The Behavior of The Skin-Friction Coefficient of a Turbulent Boundary Layer Flow Over a Flat Plate with Different Configured Tranverse Square Grooves.Science Direct Experiment Thermal and Fluid Science 30-141-151.
- [20]. Sutardi, (2009),“The Study of Turbulent Boundary Layer Characteristics Downstream of Different Shaped Tranverse Grooves”. Proceedings of the Internasinal Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion, Tongyeong South Korea.
- [21]. Viswamath, P. R.,(2002), “Aircraft Viscous Drag Reduction Using Riblets”, Progrees in Aerospace Sciences 38(2002)571-600.
- [22]. Peet, Y., Sagaut, P., Charron, Y.,(2008),”Turbulent Drag Reduction Using Sinusiodal Riblets with Triangular Cross-Section”, AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Juni pp23-26,WA.
- [23]. Yaghoubi. M, Mahmoodi. S, (2004),Experiment study of turbulent separated and reattached flow over a finite blunt plate, Eksperiment Thermal and Fluid Science 29-pp 105-112
- [24]. Suksangpanomrung. A, Djilali.N, Moinat, P, (2002), “Large-eddy simulation of separated flow over a bluff rectangular plate”, Internasional journal of heat transfer fluid flow 21-655-663.
- [25]. Djilali, N., and Gratshore, I.S., (1991), “Turbulent flow around a bluff rectangular plate, Part1: Experimental investigation”, ASME Trans. Fluid Eng. Vol 311pp51-59.
- [26]. Djilali, N., Gratshore, I.S., Salcudean, M.,(1991), “Turbulent flow around a bluff rectangular plate, Part2: Experimental investigation”, ASME Trans. Fluid Eng. Vol 113pp60-67.
- [27]. Serry, M. J., Jacono, D,L., Sheridan, J., (2009),” Flow Separation Characterisation of a Forward Facing Step immersed in a Turbulent Boundary Layer”, Sixth International Symposium of Turbulence and Shear Flow Phenomena, Seoul, Korea, 22-24 June.
- [28]. Muller,T. J., Batill, S. M., (1992), “Eksperiment studies of separation on a two-dimensional Airfoil at Low Reynold Numbers”, AIAA Journal 20, 4,pp457-463.
- [29]. Maltby,R.L.,(1962),“Flow Visualization in Wind Tunnels Using Indicators”., AGARDograph No. 70., (1962).
- [30]. Lighthill, P. J., (1963), “Attachment and separation in three dimensional flow”. In Laminar Boundary Lavers, ed. L. Rosenhead II,2.6:72-82, Oxford Univ. Press.
- [31]. Wang, K. C., (1976),”Separation of Three Dimensional Flow”, In Review in Viscous Flow, Proc. Lockheed-Georgia Co.Sym.LG77ER0044:341-414.

- [32]. Balio, F., Guadagnini, A., Malavasi, S.,(1998),”Stresses Due to a Horseshoe Vortex at a Surface-Cylinder Intersection”, Proceedings 3<sup>Rd</sup> International Conference on Hydrosience and Engineering ICHE’98, Cottbus 31 August-3 September.
- [33]. Coon, M., Tobak. M.,(1991),”Experiment Study of Saddle Point of Attachment in Laminar Juncture Flow”, AIAA Paper.79-1480.
- [34]. Sedighi, K., Farhadi, M.,(2006),”Three-Dimensional Study of Vortical Struktire Around a Cubic Bluff Body in a Channel”, Fact Universitatis Series Mechanical Engineering Vol.4No1 pp1-16 , Babol-Mazadaran, Iran.
- [35]. Sasongko, H., Mirmanto, H., Sutardi, (2007)” Separation Aliran Tiga Dimensi Pada Daerah Interaksi Antara Airfoil dengan Pelat Datar dalam Susunan Tunggal. Penelitian Fundamental LPPM Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [36]. Levchenya, A. M., Smirnov, E.M., Goryachev, V.D, (2010),“RANS-based numerical simulation and Visualization of The Horseshoe Vortex System in The Leading Edge Endwall Region of a Symmetric Body”, Internasional Jurnal of Heat and Fluid Flow Science Direct, 1107-1112.
- [37]. Hecklau, M., Van Rennings, R., Zander, V., Nitsche, W., Huppertz, A., Swoboda. M., (2010),” Particle Image Velocimetry of Active Flow Control on a Compressor Cascade”, Springer Jurnal, 29 May.
- [38]. Vassberg, J., Sclafani, A.J., Dehaan, M.A, (2005),”A Wing-Body Fairing Design for The DLR-F6 Model: A DPW-III Case Study”, AIAA-2005-4730.
- [39]. Munson, B. R., Young, D.F., Okiishi, T.H, Huebsch. W.W.,(2009),” Fundamental of fluid mechanics Sixth Edition”, John Willy & Sons. Inc, USA.
- [40]. Fox dan McDonald’s,(2011),” Introduction to Fluid Mechanics”, Eighth edition John Willey & Sons,Inc.
- [41]. Lee, S.j., Lee, S.H., (2001),”Flow Field Analysis of a Turbulent Boundary Layer Over a Riblet Surface”, Experiment in Fluid 30 pp 153-166, Springer-Verlag.
- [42]. Okamoto, S., (1987), “ Turbulent Shear Flow Behind a Single Row of Bluff Obstacle Placed on Plane Boundary Layer” Pergamon Jurnal Ltd Atmospheric Enviroment Vol 21 no6 pp1295-1303.
- [43]. Becker, S., Leinhart, H., Durst, F., (2002),”Flow around Three-Dimensional Obstacle in Boundary Layers”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 pp 265-279.
- [44]. Inam, M. I., Mashud, M.,(2003)”Flow over a Blunt Plate at Low Reynolds Number”, International Journal of Mechanical & Mechatronics IJMME-IJENS Vol:10 No:03.
- [45]. Bouhadji, A., Djilali, N., (2003),”Forcing of unsteady separated flow and convective heat transfer via bulk upstream oscillations”, Internasional Jurnal of Heat and Fluid Flow 24-pp 77-90.
- [46]. Velayati, E., Yaghoubi, M.,(2005),”Numerical Study of Convective Heat Tranfer From an Array of Parallel Bluff Plate”, International Journal Elsevier of Heat and Fluid Flow 26-pp80-91

- [47]. Lamballais, E., Silvertrini, J., Laizet, S.,(2010), “Direct numerical simulation of flow separation behind a rounded leading edge : Study of curvature effect”. International Journal of heat and fluid flow 31pp295-306.
- [48]. Saldana, J.G.B., Diez, P.Q., Silva, P.Q., Mariscal, I. C.,(2007),”Numerical Simulation for The Flow Structures Following a Three Dimensional Horizontal Forward Facing Step Channel”, Revista Mexicana De Fisica 5. Pp 87-95.
- [49]. Wu dan Zhong,(2003),”Flow Visualization for the Endwall Region of a First Stage Vane with a Forward Facing Entrance Step”, Proceedings of PASFVIP-4,France.
- [50]. FLUENT v 6.3.26, (2008),” Introductory FLUENT Notes, Fluent User Services Center”, www.fluentusers.com.
- [51]. Freitas, C. J, (1999),“The issue of numerical uncertainty”, Second International Conference on CFD in the Minerals and Proses Industries CSIRO, Melbourne, Australia. 6-8 Desember.
- [52]. Yang, Z., Abdalla, I. E., (2009),”Effects of Free-Stream Turbulence on a Transitional Separated-Reattached Flow Over a Flat Plate a Sharp Leading Edge”, Internasional Journal of Heat and Fluid 30pp1026-1035, Elsevier.
- [53]. D. B. DeGraff and J. K. Eaton,(2000).”Reynolds number scale of the flat plate turbulent boundary layer”, J. Fluid Mechanics.422,319.
- [54]. Ruderich, R., Fernholz, H.,(1986),”An Experiment Investigation of a Turbulent Shear Flow with Separation, Reverse Flow, and Reattachment”, J.Fluid Mech., Vol.163,pp.283-332.
- [55]. Fitra T. C.,(2013), “Studi Eksperimen Dan Numerik Karakteristik Aliran Tiga Dimensi Dekat Dinding Pada *Airfoil* Naca 0015 Dengan Penambahan *Forward Facing Step*”, Tugas Akhir TM091486- ITS,Surabaya.
- [56]. L. Keirbulck, G. Fourrie, L. Labraga, M.Gad-el-Hak, (2012), “ Scaling of statistics in wall-bounded turbulent flows”, C.R. Mecanique 340-pp420-433, SciVerse Science Direct, France.
- [57]. A. Hergt , C. Dorfner, W. Steinert, E. Nicke, H.A. Schreiber, (2011), “Advanced nonaxisymmetric endwall contouring for axial compressors by generating an Aerodynamic Separator-Part II:Experimental and Numerical Cascade Investigation”,Jurnal of turbomachinery April Vol 133 ASME.
- [58]. Harinaldi, J. Julian, Budiarso, R. Difitro, P. Stefan, (2016),” The effect of plasma actuator placement on drag coefficient reduction of Ahmed body as an aerodynamic model”, International Journal of Technologi, Vol 2 pp 306-313.

## Lampiran 1 Data Airfoil NACA 0015

TABEL KOORDINAT AIRFOIL NACA 0015							
X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C
1	0.00157	0.35635	0.07419	0.00267	-0.01125	0.45874	-0.06919
0.99647	0.00219	0.34002	0.07459	0.00473	-0.01485	0.47641	-0.06796
0.99008	0.0033	0.32394	0.07486	0.00735	-0.01838	0.49422	-0.06663
0.98192	0.00471	0.30811	0.075	0.01054	-0.02183	0.51214	-0.0652
0.97238	0.00634	0.29255	0.07501	0.01428	-0.02521	0.53016	-0.06368
0.96171	0.00814	0.27728	0.07487	0.01857	-0.0285	0.54826	-0.06206
0.95006	0.01007	0.26229	0.0746	0.02339	-0.0317	0.56644	-0.06037
0.93757	0.01212	0.24762	0.07419	0.02874	-0.03482	0.58466	-0.05859
0.92433	0.01426	0.23326	0.07364	0.03462	-0.03785	0.60292	-0.05674
0.91044	0.01646	0.21923	0.07294	0.04101	-0.04079	0.62119	-0.05482
0.89596	0.01872	0.20554	0.0721	0.0479	-0.04362	0.63945	-0.05283
0.88096	0.02103	0.1922	0.07113	0.05528	-0.04636	0.65769	-0.05079
0.86549	0.02336	0.17922	0.07001	0.06315	-0.04899	0.67588	-0.04868
0.84959	0.02572	0.16661	0.06875	0.0715	-0.05151	0.69399	-0.04653
0.83333	0.02808	0.15438	0.06736	0.08032	-0.05392	0.71202	-0.04433
0.81672	0.03045	0.14255	0.06583	0.0896	-0.05622	0.72992	-0.04208
0.79982	0.03281	0.13111	0.06416	0.09933	-0.05839	0.74768	-0.03981
0.78266	0.03516	0.12009	0.06237	0.10949	-0.06044	0.76527	-0.0375
0.76527	0.0375	0.10949	0.06044	0.12009	-0.06237	0.78266	-0.03516
0.74768	0.03981	0.09933	0.05839	0.13111	-0.06416	0.79982	-0.03281
0.72992	0.04208	0.0896	0.05622	0.14255	-0.06583	0.81672	-0.03045
0.71202	0.04433	0.08032	0.05392	0.15438	-0.06736	0.83333	-0.02808
0.69399	0.04653	0.0715	0.05151	0.16661	-0.06875	0.84959	-0.02572
0.67588	0.04868	0.06315	0.04899	0.17922	-0.07001	0.86549	-0.02336
0.65769	0.05079	0.05528	0.04636	0.1922	-0.07113	0.88096	-0.02103
0.63945	0.05283	0.0479	0.04362	0.20554	-0.0721	0.89596	-0.01872
0.62119	0.05482	0.04101	0.04079	0.21923	-0.07294	0.91044	-0.01646
0.60292	0.05674	0.03462	0.03785	0.23326	-0.07364	0.92433	-0.01426
0.58466	0.05859	0.02874	0.03482	0.24762	-0.07419	0.93757	-0.01212
0.56644	0.06037	0.02339	0.0317	0.26229	-0.0746	0.95006	-0.01007
0.54826	0.06206	0.01857	0.0285	0.27728	-0.07487	0.96171	-0.00814
0.53016	0.06368	0.01428	0.02521	0.29255	-0.07501	0.97238	-0.00634
0.51214	0.0652	0.01054	0.02183	0.30811	-0.075	0.98192	-0.00471
0.49422	0.06663	0.00735	0.01838	0.32394	-0.07486	0.99008	-0.0033
0.47641	0.06796	0.00473	0.01485	0.34002	-0.07459	0.99647	-0.00219
0.45874	0.06919	0.00267	0.01125	0.35635	-0.07419	1	-0.00157
0.44122	0.07031	0.00119	0.00757	0.37292	-0.07365		
0.42387	0.07132	0.0003	0.00382	0.3897	-0.073		
0.40669	0.07222	0	0	0.40669	-0.07222		
0.3897	0.073	0.0003	-0.00382	0.42387	-0.07132		
0.37292	0.07365	0.00119	-0.00757	0.44122	-0.07031		

**Lampiran 2 Data Airfoil British 9C7/22.5C50**

TABEL KOORDINAT AIRFOIL BRITISH 9C7/22.5C50							
X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C
1.0000	0.0000	0.2742	0.0715	0.0026	-0.0057	0.4089	-0.0132
0.9672	0.0090	0.2588	0.0701	0.0041	-0.0071	0.4241	-0.0126
0.9422	0.0158	0.2438	0.0686	0.0061	-0.0085	0.4393	-0.0122
0.9214	0.0212	0.2291	0.0670	0.0085	-0.0098	0.4545	-0.0117
0.9029	0.0258	0.2148	0.0653	0.0114	-0.0111	0.4698	-0.0113
0.8859	0.0300	0.2008	0.0636	0.0147	-0.0123	0.4850	-0.0108
0.8697	0.0338	0.1873	0.0617	0.0186	-0.0134	0.5003	-0.0104
0.8539	0.0371	0.1742	0.0599	0.0229	-0.0145	0.5155	-0.0099
0.8384	0.0403	0.1615	0.0579	0.0277	-0.0154	0.5308	-0.0096
0.8229	0.0434	0.1492	0.0559	0.0330	-0.0164	0.5461	-0.0091
0.8075	0.0463	0.1375	0.0539	0.0388	-0.0172	0.5614	-0.0087
0.7919	0.0490	0.1262	0.0518	0.0451	-0.0179	0.5768	-0.0084
0.7761	0.0517	0.1154	0.0497	0.0518	-0.0186	0.5922	-0.0081
0.7601	0.0542	0.1051	0.0476	0.0591	-0.0192	0.6077	-0.0077
0.7439	0.0566	0.0954	0.0454	0.0669	-0.0196	0.6233	-0.0073
0.7275	0.0590	0.0861	0.0432	0.0751	-0.0201	0.6390	-0.0070
0.7108	0.0612	0.0774	0.0410	0.0839	-0.0204	0.6548	-0.0067
0.6938	0.0633	0.0692	0.0388	0.0930	-0.0206	0.6708	-0.0065
0.6767	0.0653	0.0615	0.0367	0.1027	-0.0208	0.6871	-0.0062
0.6593	0.0671	0.0543	0.0345	0.1127	-0.0209	0.7037	-0.0059
0.6417	0.0688	0.0477	0.0324	0.1232	-0.0209	0.7205	-0.0057
0.6239	0.0705	0.0415	0.0302	0.1341	-0.0209	0.7377	-0.0055
0.6060	0.0719	0.0359	0.0282	0.1454	-0.0208	0.7554	-0.0052
0.5880	0.0733	0.0307	0.0261	0.1570	-0.0206	0.7735	-0.0050
0.5698	0.0744	0.0260	0.0240	0.1690	-0.0205	0.7922	-0.0048
0.5516	0.0755	0.0218	0.0221	0.1814	-0.0202	0.8116	-0.0046
0.5334	0.0764	0.0180	0.0201	0.1940	-0.0199	0.8317	-0.0042
0.5151	0.0771	0.0146	0.0183	0.2070	-0.0196	0.8525	-0.0038
0.4969	0.0777	0.0117	0.0164	0.2202	-0.0192	0.8743	-0.0036
0.4788	0.0782	0.0091	0.0146	0.2337	-0.0188	0.8970	-0.0030
0.4607	0.0784	0.0069	0.0127	0.2474	-0.0184	0.9208	-0.0025
0.4427	0.0785	0.0050	0.0110	0.2614	-0.0180	0.9459	-0.0019
0.4249	0.0784	0.0034	0.0090	0.2755	-0.0175	0.9722	-0.0013
0.4073	0.0783	0.0022	0.0076	0.2899	-0.0170	1.0000	0.0000
0.3898	0.0778	0.0012	0.0062	0.3044	-0.0166		
0.3725	0.0774	0.0006	0.0042	0.3190	-0.0161		
0.3555	0.0767	0.0001	0.0013	0.3338	-0.0156		
0.3387	0.0759	0.0000	0.0000	0.3486	-0.0151		
0.3221	0.0750	0.0001	-0.0003	0.3636	-0.0146		
0.3059	0.0740	0.0006	-0.0029	0.3786	-0.0141		
0.2899	0.0728	0.0014	-0.0049	0.3938	-0.0136		

### Lampiran 3 Data Airfoil British 9C7/32.5C50

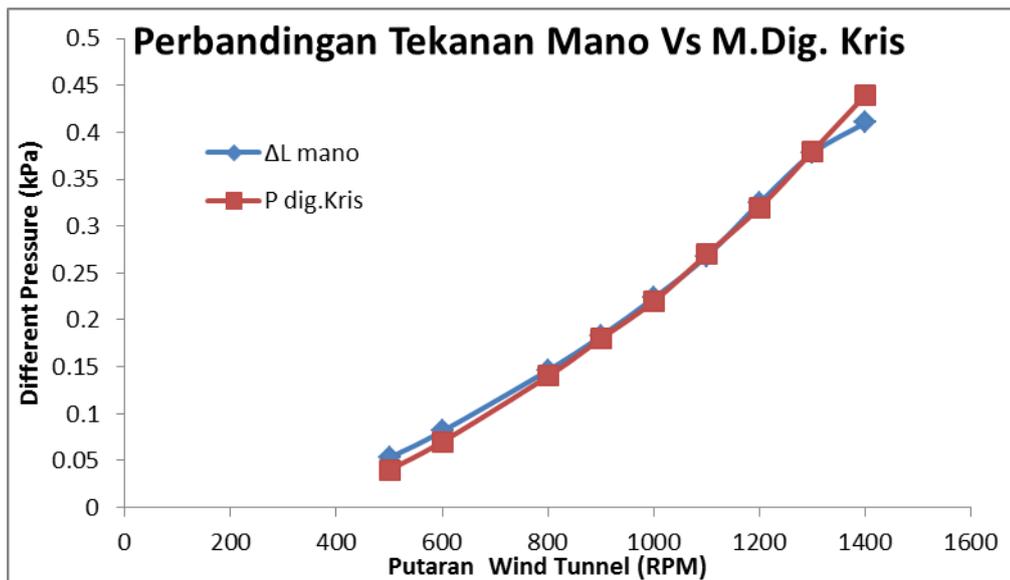
TABEL KOORDINAT AIRFOIL BRITISH 9C7/32.5C50							
X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C
1.0000	0.0000	0.2742	0.1014	0.0026	-0.0046	0.4089	0.0231
0.9672	0.0140	0.2588	0.0989	0.0041	-0.0056	0.4241	0.0240
0.9422	0.0242	0.2438	0.0964	0.0061	-0.0066	0.4393	0.0248
0.9214	0.0325	0.2291	0.0936	0.0085	-0.0075	0.4545	0.0256
0.9029	0.0394	0.2148	0.0908	0.0114	-0.0083	0.4698	0.0262
0.8859	0.0456	0.2008	0.0878	0.0147	-0.0090	0.4850	0.0268
0.8697	0.0512	0.1873	0.0848	0.0186	-0.0096	0.5003	0.0273
0.8539	0.0564	0.1742	0.0818	0.0229	-0.0100	0.5155	0.0277
0.8384	0.0612	0.1615	0.0785	0.0277	-0.0103	0.5308	0.0280
0.8229	0.0658	0.1492	0.0753	0.0330	-0.0105	0.5461	0.0283
0.8075	0.0701	0.1375	0.0721	0.0388	-0.0105	0.5614	0.0285
0.7919	0.0743	0.1262	0.0689	0.0451	-0.0104	0.5768	0.0285
0.7761	0.0783	0.1154	0.0655	0.0518	-0.0102	0.5922	0.0285
0.7601	0.0821	0.1051	0.0623	0.0591	-0.0099	0.6077	0.0284
0.7439	0.0857	0.0954	0.0590	0.0669	-0.0094	0.6233	0.0283
0.7275	0.0892	0.0861	0.0557	0.0751	-0.0088	0.6390	0.0280
0.7108	0.0925	0.0774	0.0525	0.0839	-0.0081	0.6548	0.0276
0.6938	0.0956	0.0692	0.0493	0.0930	-0.0072	0.6708	0.0271
0.6767	0.0985	0.0615	0.0463	0.1027	-0.0063	0.6871	0.0266
0.6593	0.1012	0.0543	0.0432	0.1127	-0.0053	0.7037	0.0259
0.6417	0.1037	0.0477	0.0402	0.1232	-0.0042	0.7205	0.0251
0.6239	0.1060	0.0415	0.0372	0.1341	-0.0030	0.7377	0.0241
0.6060	0.1080	0.0359	0.0344	0.1454	-0.0017	0.7554	0.0231
0.5880	0.1099	0.0307	0.0317	0.1570	-0.0004	0.7735	0.0219
0.5698	0.1114	0.0260	0.0289	0.1690	0.0009	0.7922	0.0205
0.5516	0.1128	0.0218	0.0264	0.1814	0.0024	0.8116	0.0190
0.5334	0.1139	0.0180	0.0239	0.1940	0.0037	0.8317	0.0174
0.5151	0.1147	0.0146	0.0216	0.2070	0.0052	0.8525	0.0156
0.4969	0.1153	0.0117	0.0192	0.2202	0.0067	0.8743	0.0135
0.4788	0.1156	0.0091	0.0170	0.2337	0.0081	0.8970	0.0113
0.4607	0.1157	0.0069	0.0148	0.2474	0.0097	0.9208	0.0088
0.4427	0.1156	0.0050	0.0128	0.2614	0.0110	0.9459	0.0062
0.4249	0.1151	0.0034	0.0108	0.2755	0.0124	0.9722	0.0032
0.4073	0.1145	0.0022	0.0088	0.2899	0.0139	1.0000	0.0000
0.3898	0.1135	0.0012	0.0068	0.3044	0.0152		
0.3725	0.1124	0.0006	0.0048	0.3190	0.0165		
0.3555	0.1110	0.0001	0.0026	0.3338	0.0177		
0.3387	0.1095	0.0000	0.0000	0.3486	0.0190		
0.3221	0.1077	0.0001	-0.0012	0.3636	0.0201		
0.3059	0.1058	0.0006	-0.0023	0.3786	0.0212		
0.2899	0.1036	0.0014	-0.0035	0.3938	0.0222		

### Lampiran 4 Data Airfoil 9C7/42.5C50

TABEL KOORDINAT AIRFOIL BRITISH 9C7/42.5C50							
X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C	X/C	Y/C
1.0000	0.0000	0.2743	0.1456	0.0026	-0.0023	0.4090	0.0777
0.9672	0.0240	0.2588	0.1415	0.0041	-0.0026	0.4242	0.0790
0.9422	0.0389	0.2438	0.1374	0.0061	-0.0033	0.4394	0.0801
0.9214	0.0498	0.2291	0.1329	0.0085	-0.0034	0.4546	0.0809
0.9029	0.0605	0.2148	0.1284	0.0114	-0.0035	0.4699	0.0815
0.8859	0.0712	0.2008	0.1237	0.0147	-0.0033	0.4851	0.0822
0.8697	0.0791	0.1873	0.1190	0.0186	-0.0029	0.5004	0.0826
0.8539	0.0860	0.1742	0.1141	0.0229	-0.0023	0.5156	0.0829
0.8384	0.0941	0.1615	0.1091	0.0277	-0.0015	0.5309	0.0830
0.8229	0.1015	0.1492	0.1041	0.0330	-0.0006	0.5462	0.0829
0.8075	0.1074	0.1375	0.0990	0.0388	-0.0005	0.5615	0.0826
0.7919	0.1131	0.1262	0.0939	0.0451	0.0020	0.5769	0.0821
0.7761	0.1192	0.1154	0.0890	0.0518	0.0035	0.5923	0.0815
0.7601	0.1252	0.1051	0.0839	0.0591	0.0052	0.6078	0.0804
0.7439	0.1307	0.0954	0.0790	0.0669	0.0071	0.6234	0.0795
0.7276	0.1360	0.0861	0.0741	0.0751	0.0092	0.6391	0.0784
0.7109	0.1409	0.0774	0.0692	0.0839	0.0116	0.6549	0.0771
0.6939	0.1455	0.0692	0.0646	0.0930	0.0140	0.6709	0.0756
0.6768	0.1496	0.0615	0.0601	0.1027	0.0167	0.6872	0.0737
0.6594	0.1535	0.0543	0.0556	0.1127	0.0193	0.7038	0.0715
0.6418	0.1574	0.0477	0.0513	0.1232	0.0222	0.7206	0.0691
0.6240	0.1609	0.0415	0.0470	0.1341	0.0251	0.7377	0.0663
0.6061	0.1636	0.0359	0.0430	0.1454	0.0281	0.7554	0.0634
0.5881	0.1660	0.0307	0.0392	0.1570	0.0312	0.7735	0.0603
0.5699	0.1681	0.0260	0.0355	0.1690	0.0344	0.7922	0.0568
0.5517	0.1700	0.0218	0.0320	0.1814	0.0376	0.8116	0.0522
0.5335	0.1713	0.0180	0.0289	0.1940	0.0407	0.8317	0.0474
0.5152	0.1722	0.0146	0.0259	0.2070	0.0440	0.8525	0.0433
0.4970	0.1728	0.0117	0.0231	0.2202	0.0471	0.8743	0.0373
0.4789	0.1730	0.0091	0.0204	0.2337	0.0502	0.8970	0.0312
0.4608	0.1727	0.0069	0.0176	0.2474	0.0534	0.9208	0.0253
0.4428	0.1719	0.0050	0.0151	0.2614	0.0562	0.9459	0.0168
0.4250	0.1705	0.0034	0.0123	0.2756	0.0590	0.9722	0.0082
0.4074	0.1692	0.0022	0.0103	0.2900	0.0616	1.0000	0.0000
0.3899	0.1675	0.0012	0.0082	0.3045	0.0641		
0.3726	0.1656	0.0006	0.0057	0.3191	0.0662		
0.3556	0.1631	0.0001	0.0025	0.3339	0.0683		
0.3388	0.1603	0.0000	0.0000	0.3487	0.0704		
0.3222	0.1569	0.0001	-0.0012	0.3637	0.0724		
0.3060	0.1533	0.0006	-0.0009	0.3787	0.0744		
0.2900	0.1495	0.0014	-0.0023	0.3939	0.0761		

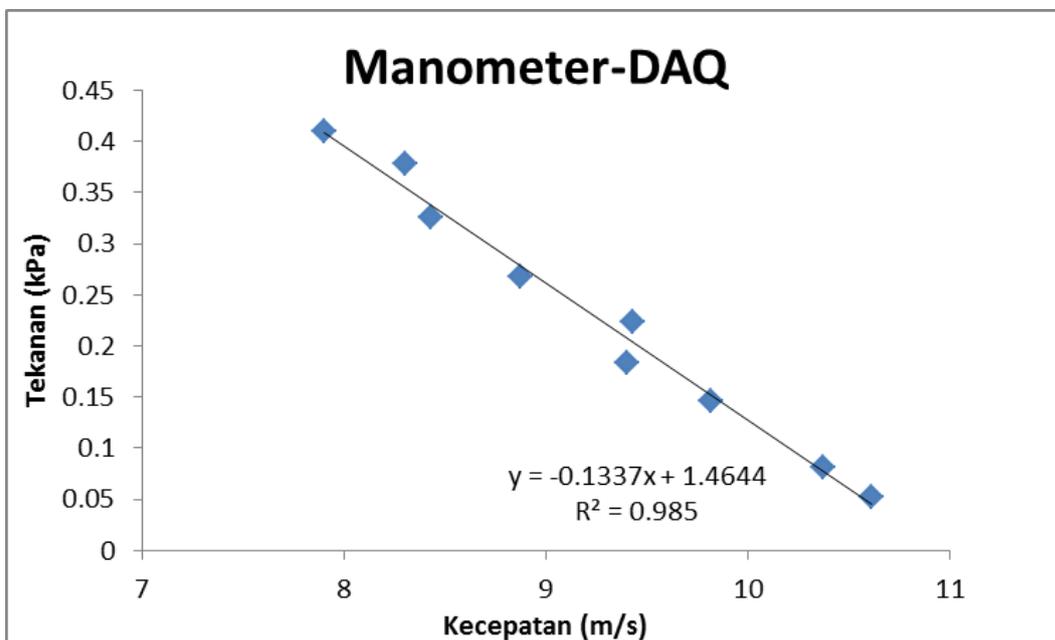
### Lampiran 5 Validasi Pressure Different vs Manometer

Putaran	$\Delta L$ mano	P mano.	P dig.Kris
rpm	m	kPa	kPa
500	0.013	0.052811509	0.04
600	0.02	0.081248475	0.07
800	0.036	0.146247254	0.14
900	0.045	0.182809068	0.18
1000	0.055	0.223433305	0.22
1100	0.066	0.268119966	0.27
1200	0.08	0.324993899	0.32
1300	0.093	0.377805407	0.38
1400	0.101	0.410304797	0.44



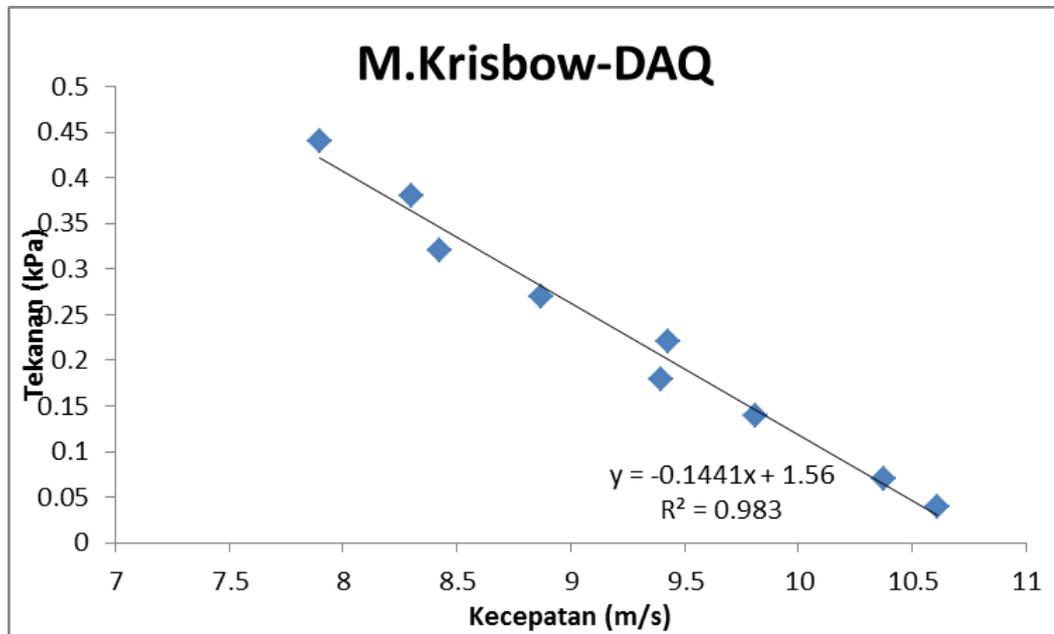
## Lampiran 6 Validasi Pressure Transduser (DAQ) vs Manometer

Putaran rpm	P mano. kPa	V.Mano m/sec	I transducer 7 mA	P daq. kPa	V daq. m/sec	Error Mano
500	0.053	9.63	10.6130	0.0525	9.5951	0.32%
600	0.081	11.94	10.3716	0.0846	12.1816	2.03%
800	0.146	16.02	9.8139	0.1587	16.6886	4.19%
900	0.183	17.83	9.3974	0.2141	19.2981	8.23%
1000	0.223	19.80	9.4252	0.2104	19.2147	2.95%
1100	0.268	21.69	8.8723	0.2840	22.3206	2.91%
1200	0.325	23.77	8.4251	0.3435	24.4404	2.80%
1300	0.378	25.69	8.3012	0.3599	25.0744	2.39%
1400	0.410	26.77	7.8982	0.4135	26.8764	0.39%



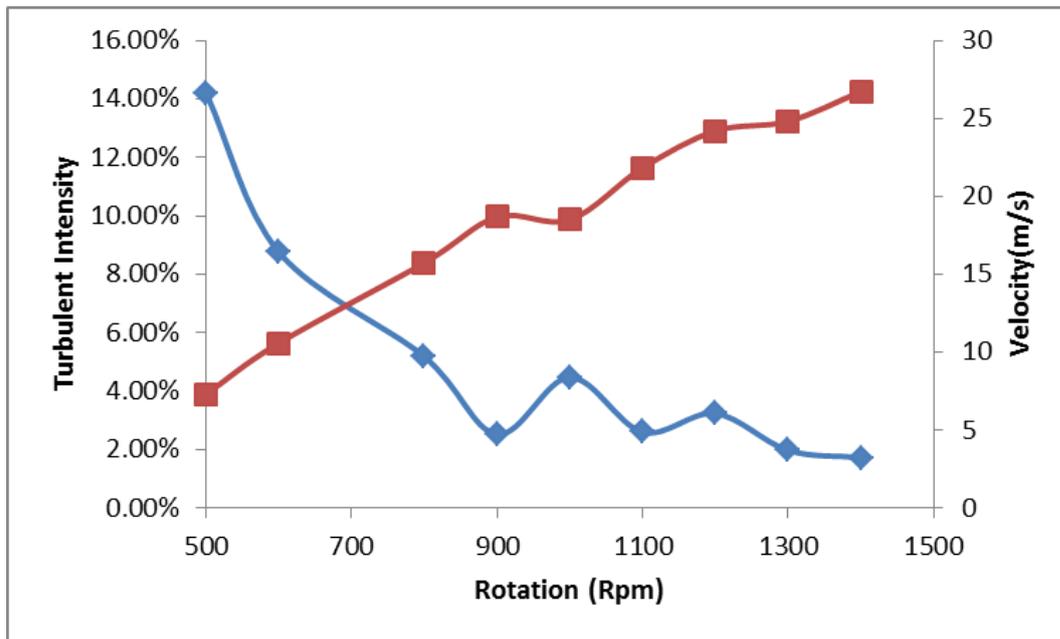
**Lampiran 6 Validasi Pressure Tranduser (DAQ) vs Pressure Different (Krisbow)**

Putaran rpm	P dig.Kris kPa	V.M.Kris m/sec	I tranducer 7 mA	P daq. kPa	V m/sec	Error M.Kris
500	0.04	8.38	10.61295	0.032	7.322	31.05%
600	0.07	11.08	10.37156	0.066	10.598	14.94%
800	0.14	15.67	9.81391	0.147	15.747	5.98%
900	0.18	17.77	9.39744	0.207	18.689	3.26%
1000	0.22	19.65	9.42521	0.203	18.507	3.82%
1100	0.27	21.76	8.87234	0.282	21.840	2.20%
1200	0.32	23.69	8.42506	0.347	24.203	0.98%
1300	0.38	25.82	8.30116	0.365	24.818	1.03%
1400	0.44	27.78	7.89819	0.423	26.720	0.59%

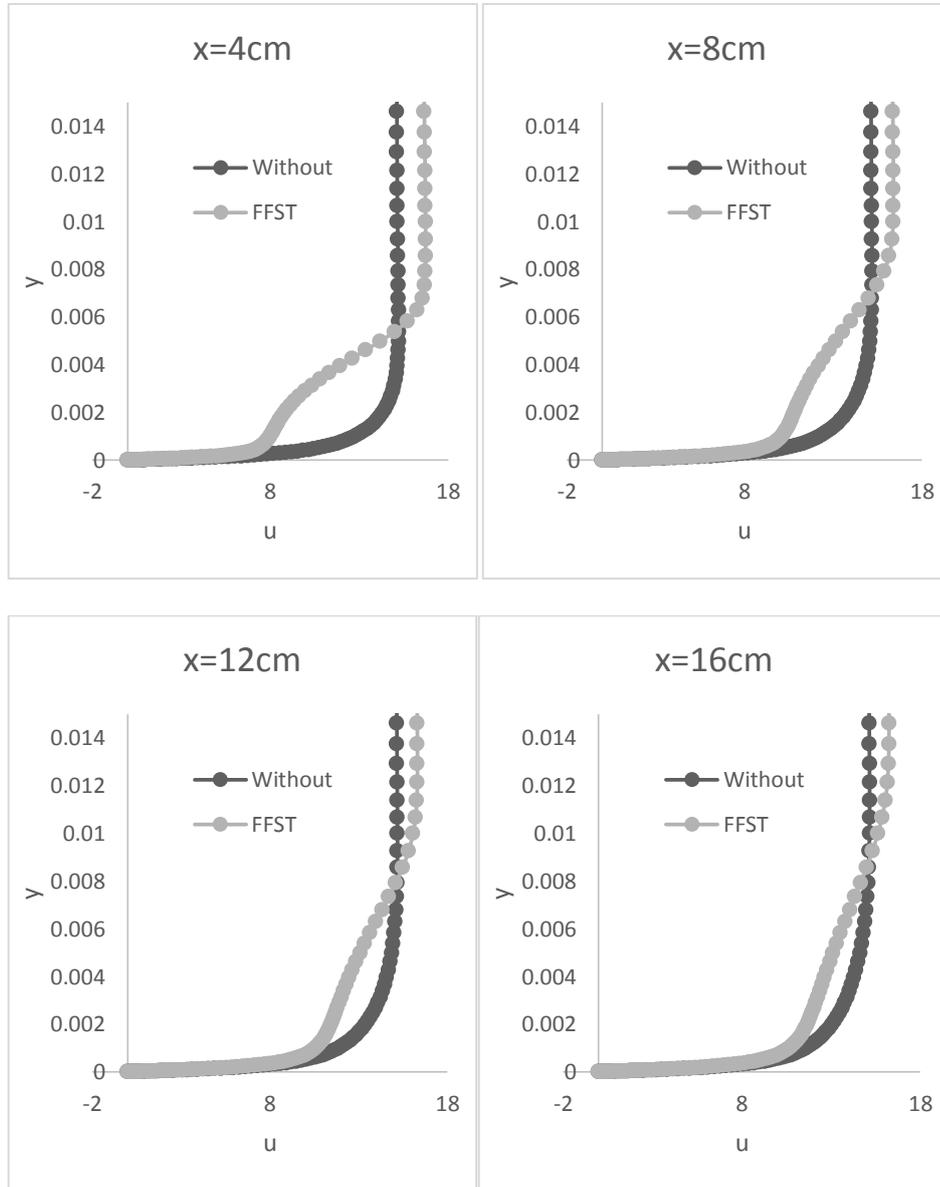


**Lampiran 7 Hasil Pengukuran Pressure Tranduser (DAQ-Omega)**

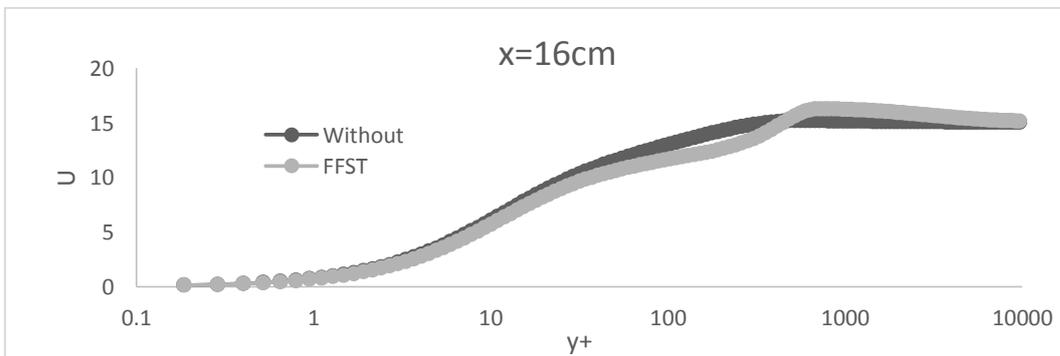
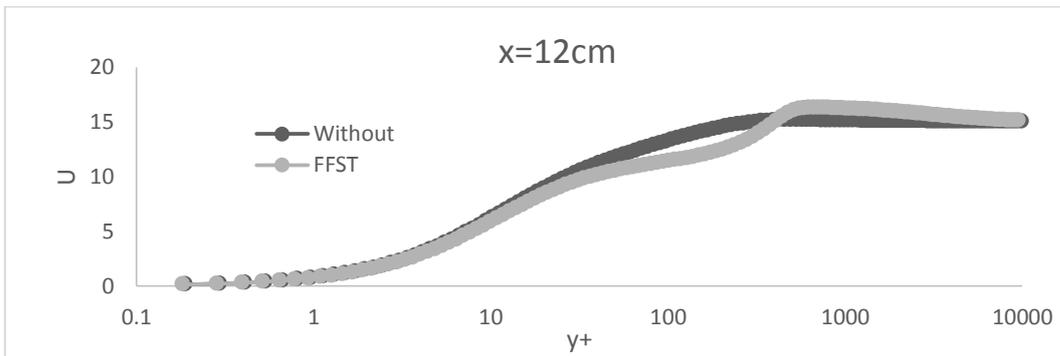
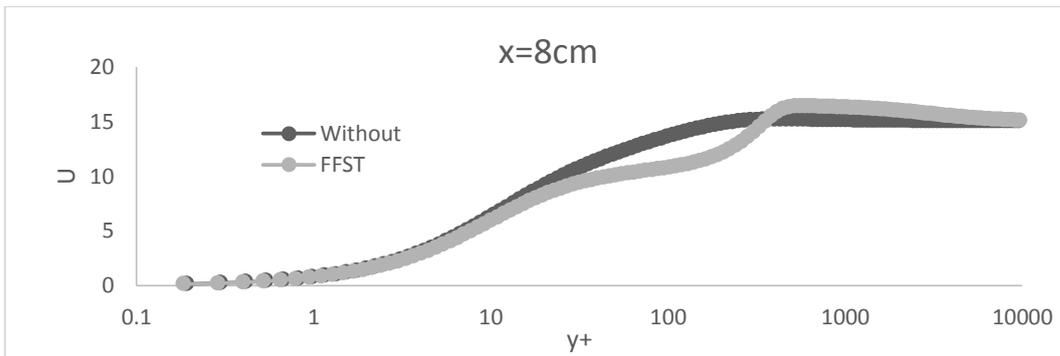
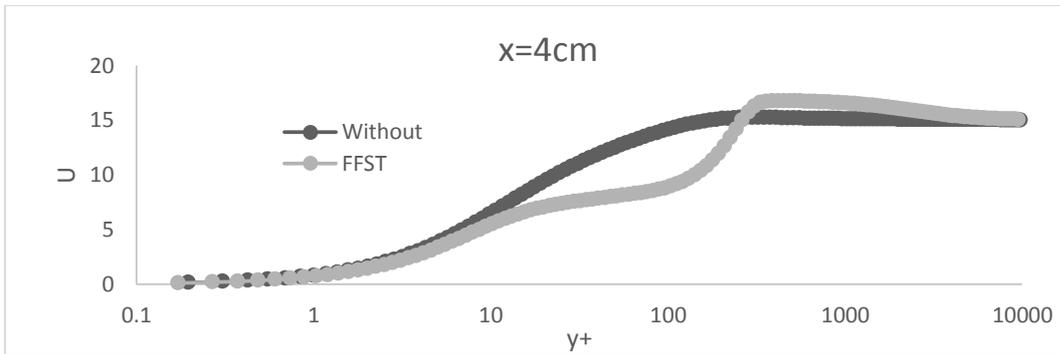
Putaran rpm	I tranducer 7 mA	P daq. kPa	V daq. m/sec	Tu
500	10.6129538	0.052477145	9.595059456	14.22%
600	10.3715556	0.084583105	12.1816014	8.77%
800	9.8139124	0.158749651	16.68856373	5.19%
900	9.39744	0.21414048	19.29814048	2.54%
1000	9.425207	0.210447469	19.21473617	4.49%
1100	8.872339	0.283978913	22.32058734	2.61%
1200	8.4250634	0.343466568	24.44040019	3.25%
1300	8.3011646	0.359945108	25.07439092	1.99%
1400	7.8981882	0.413540969	26.87642656	1.74%



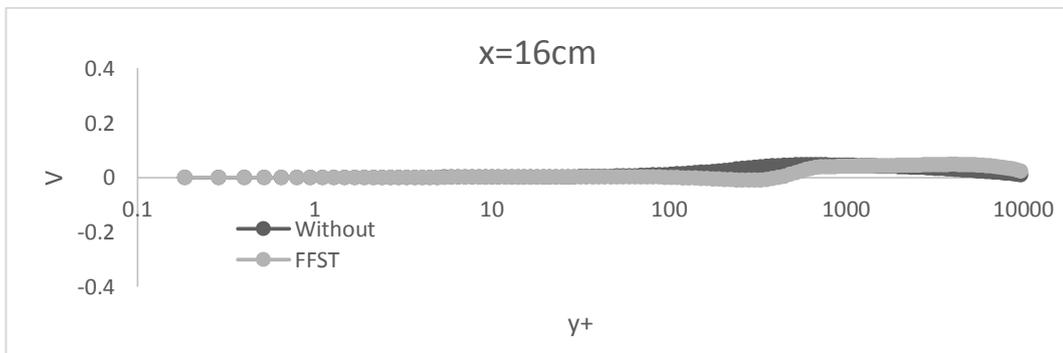
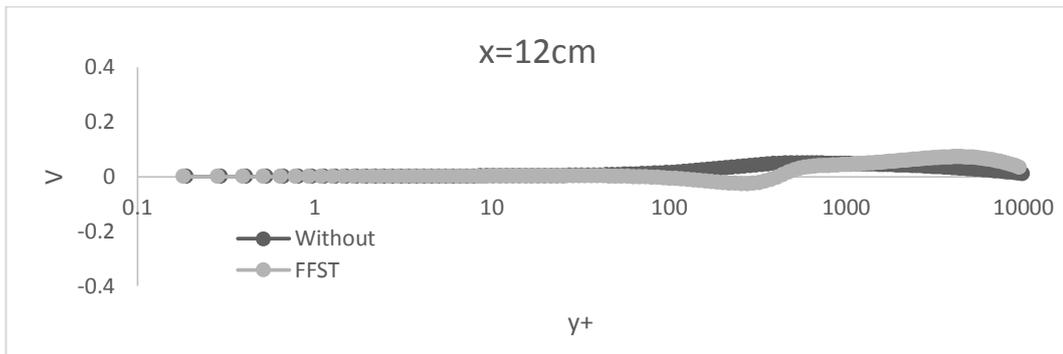
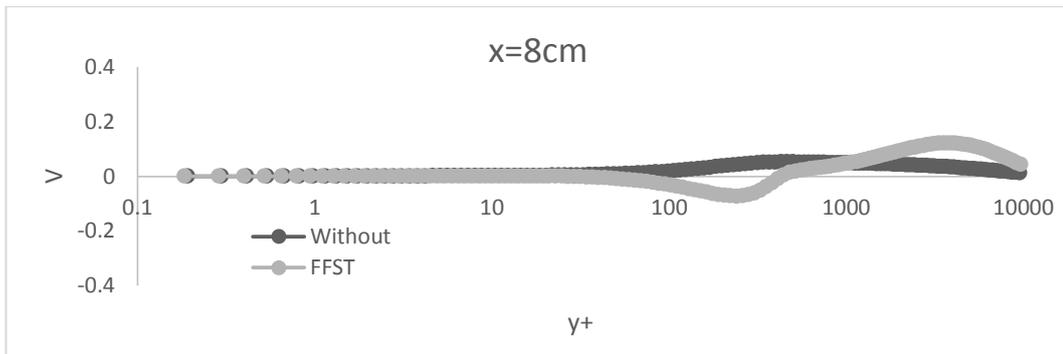
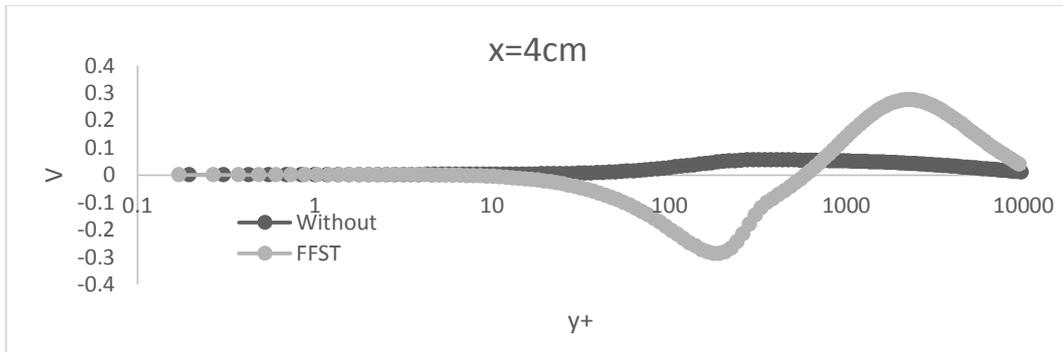
**Lampiran 8 A Profil Kecepatan(U) Melintasi FFST .**



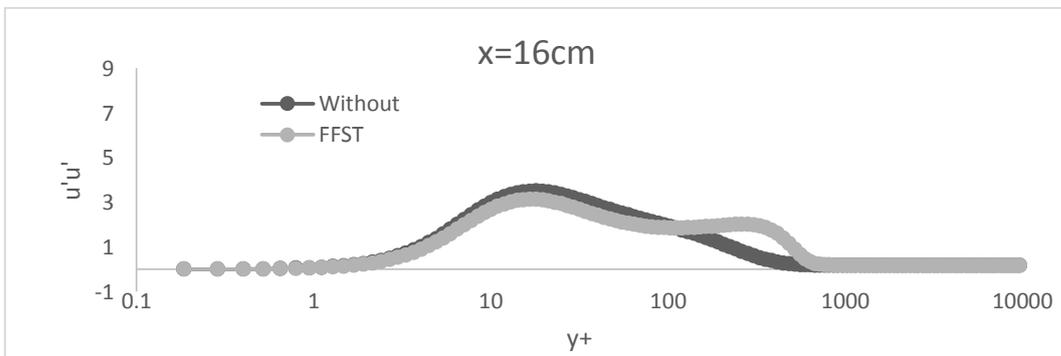
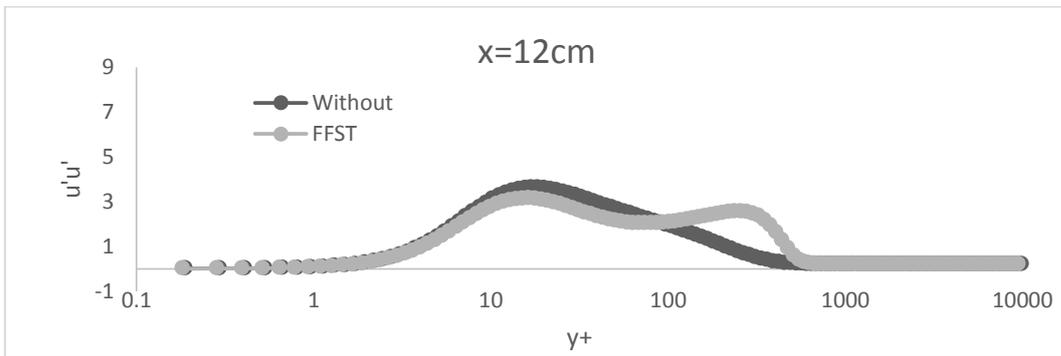
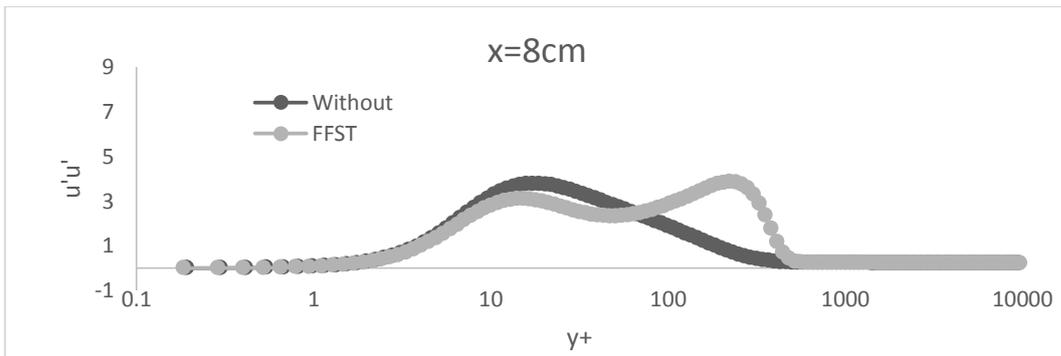
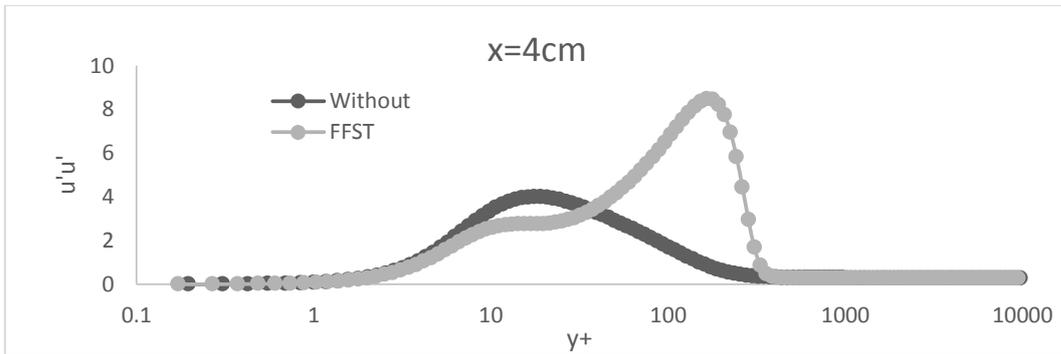
### Lampiran 8 B Profil Kecepatan (U) Melintasi FFST.



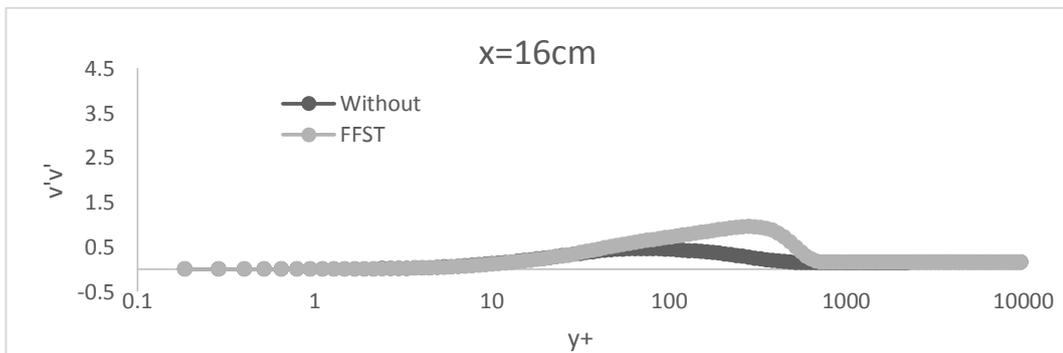
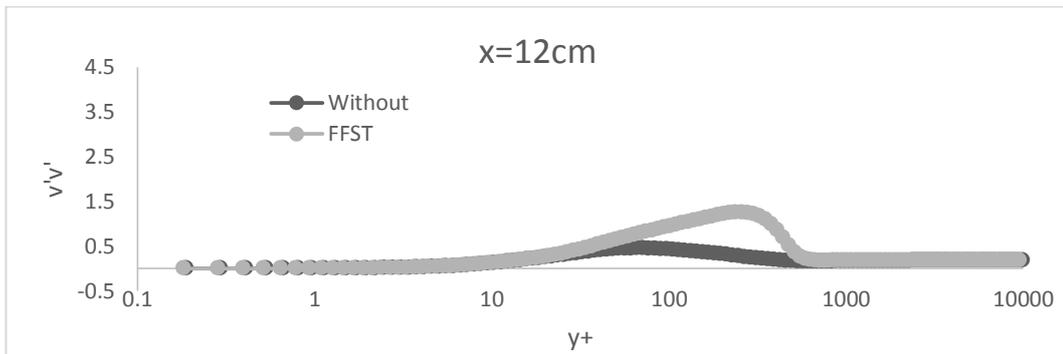
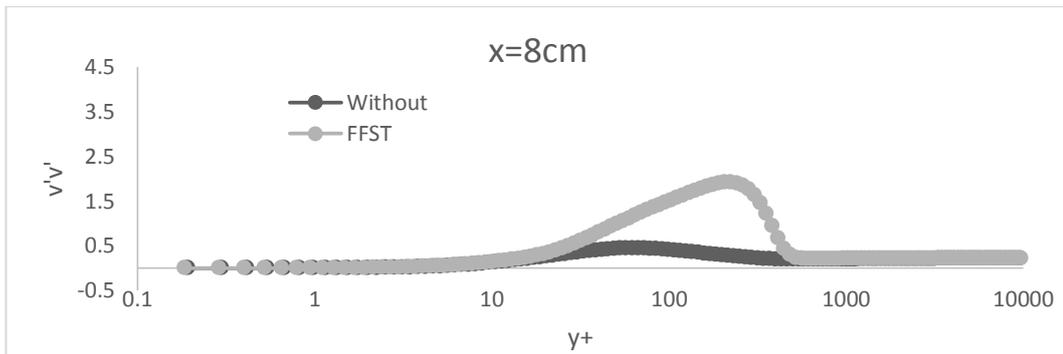
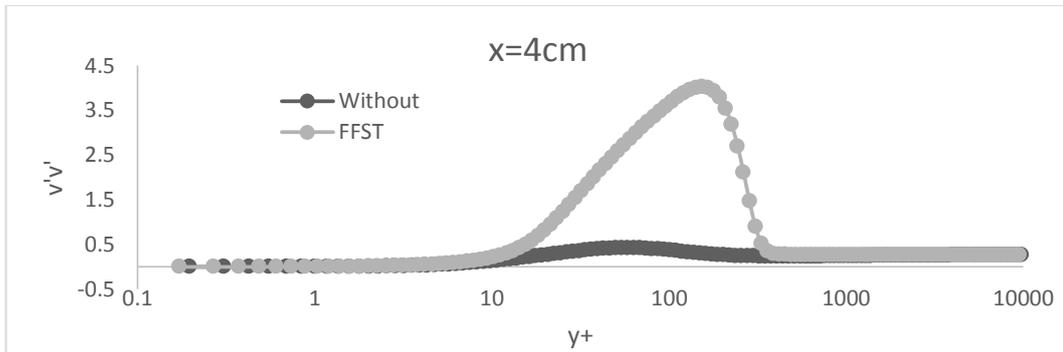
### Lampiran 9 Profil Kecepatan (V) Melintasi FFST.



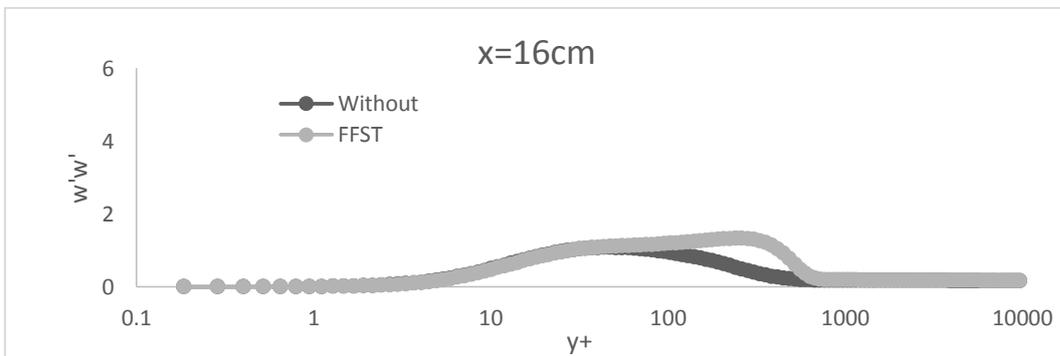
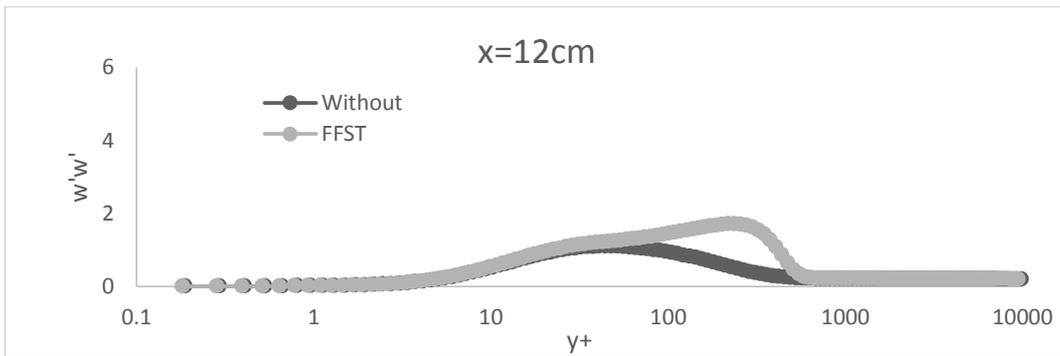
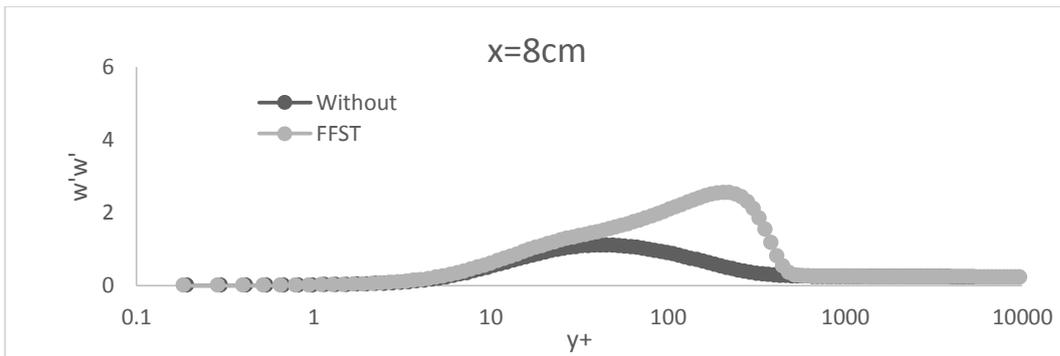
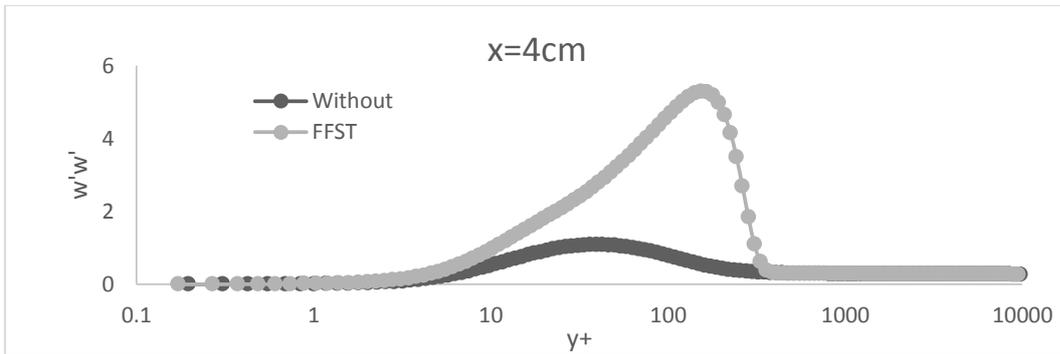
### Lampiran 9 A Profil Fluktuasi Kecepatan ( $u'u'$ ) Melintasi FFST.



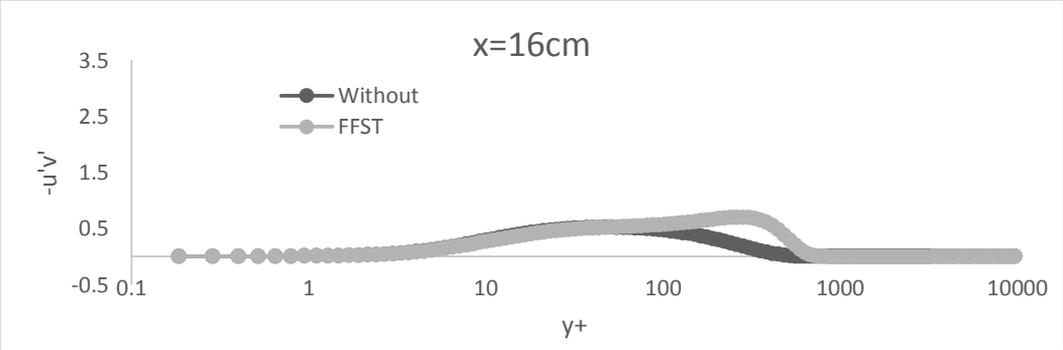
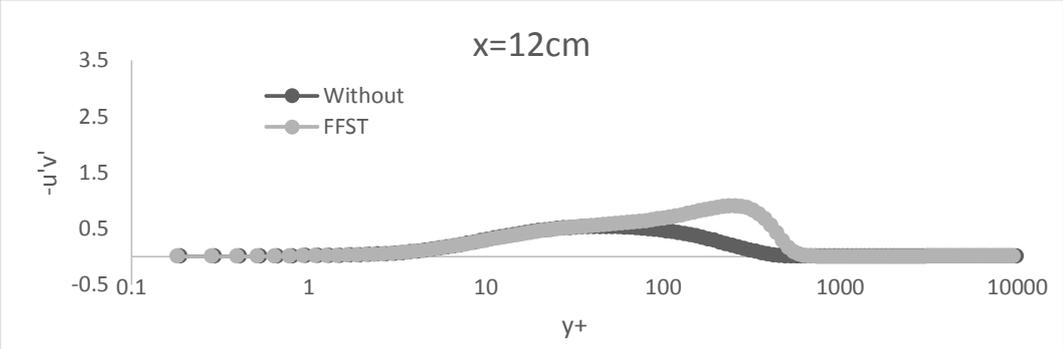
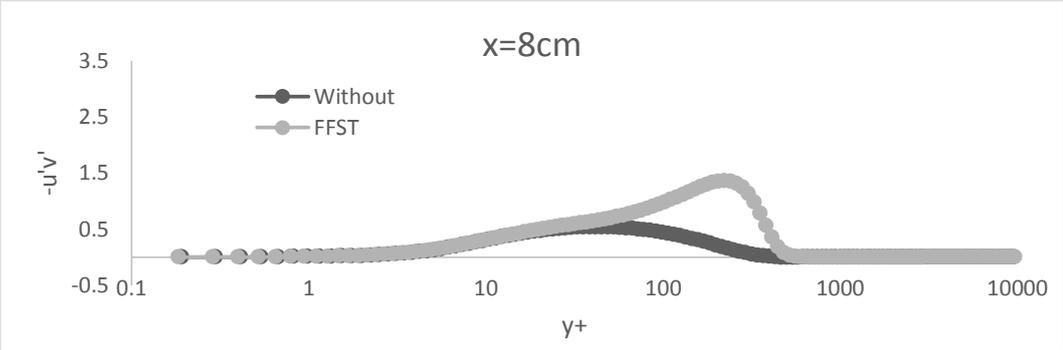
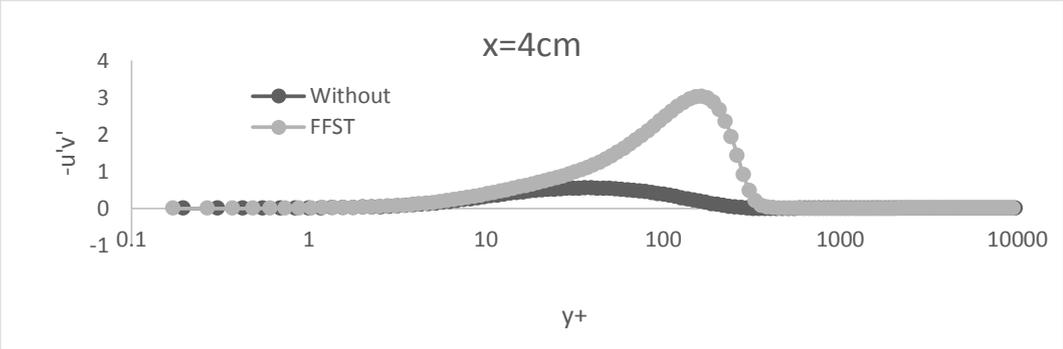
## Lampiran 9 B Profil Fluktuasi Kecepatan ( $v'v'$ ) Melintasi FFST.



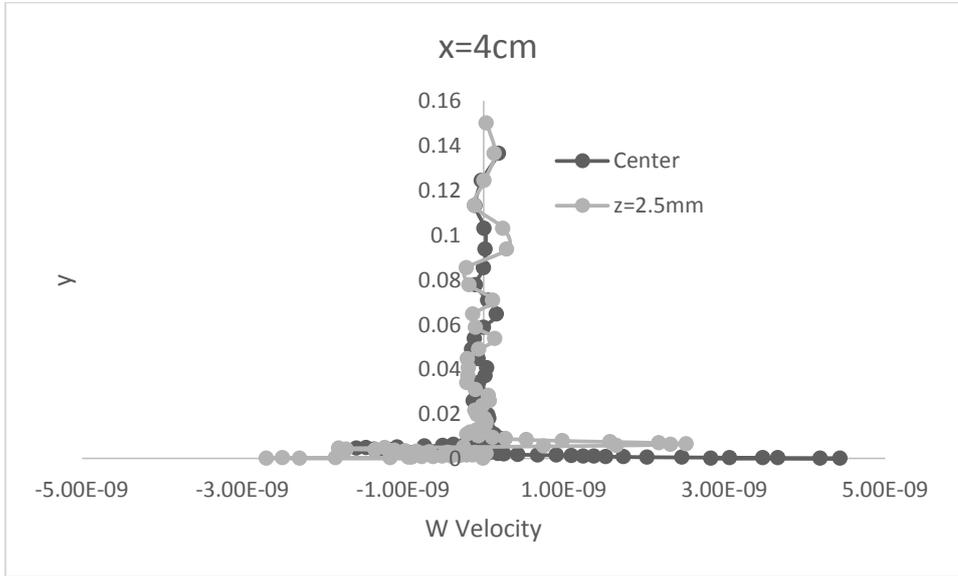
### Lampiran 9 C Profil Fluktuasi Kecepatan ( $w'w'$ ) Melintasi FFST.



**Lampiran 9 D Profil Fluktuasi Kecepatan ( $u'v'$ ) Melintasi FFST.**



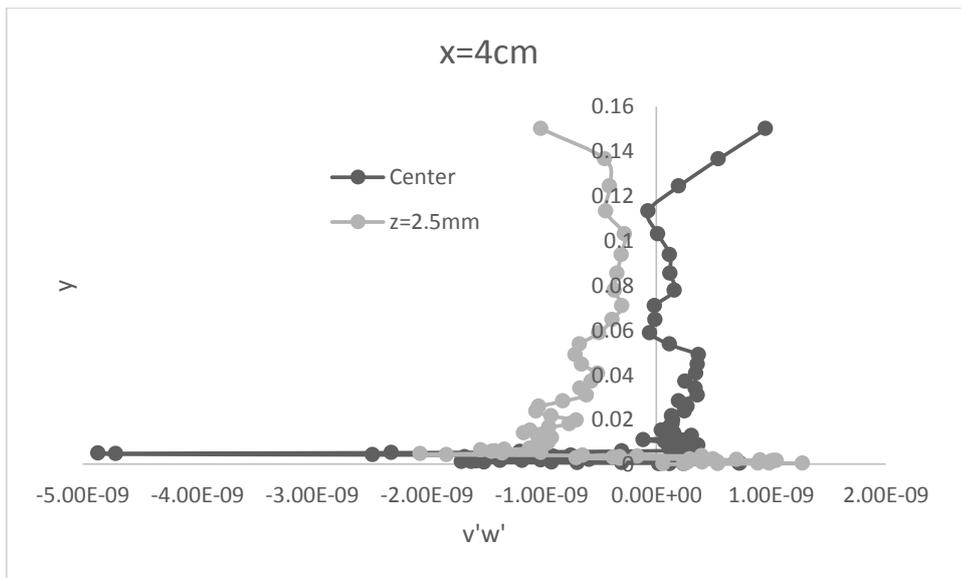
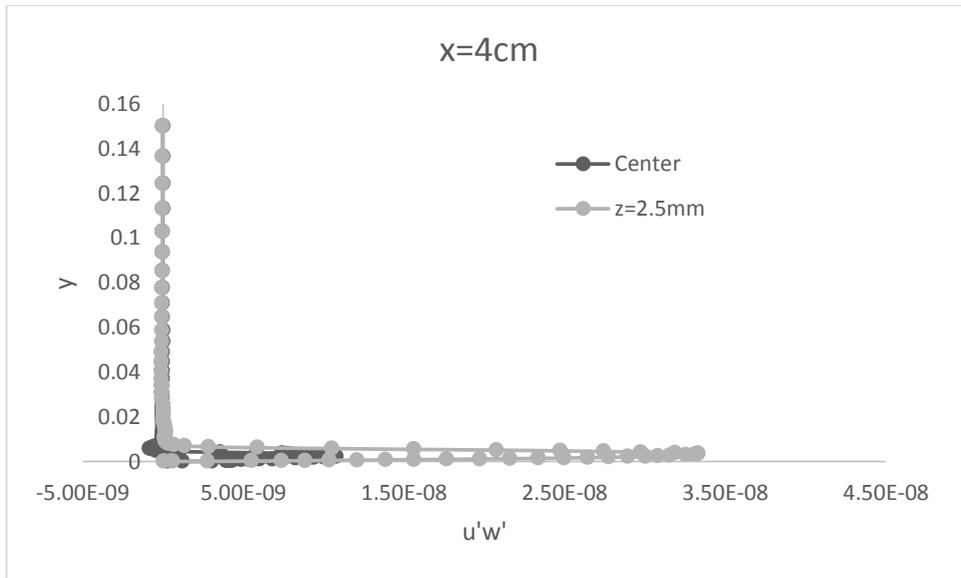
**Lampiran 10 A Profil Kecepatan (W) , Wall Shear Stress dan Shape Faktor Melintasi FFST.**



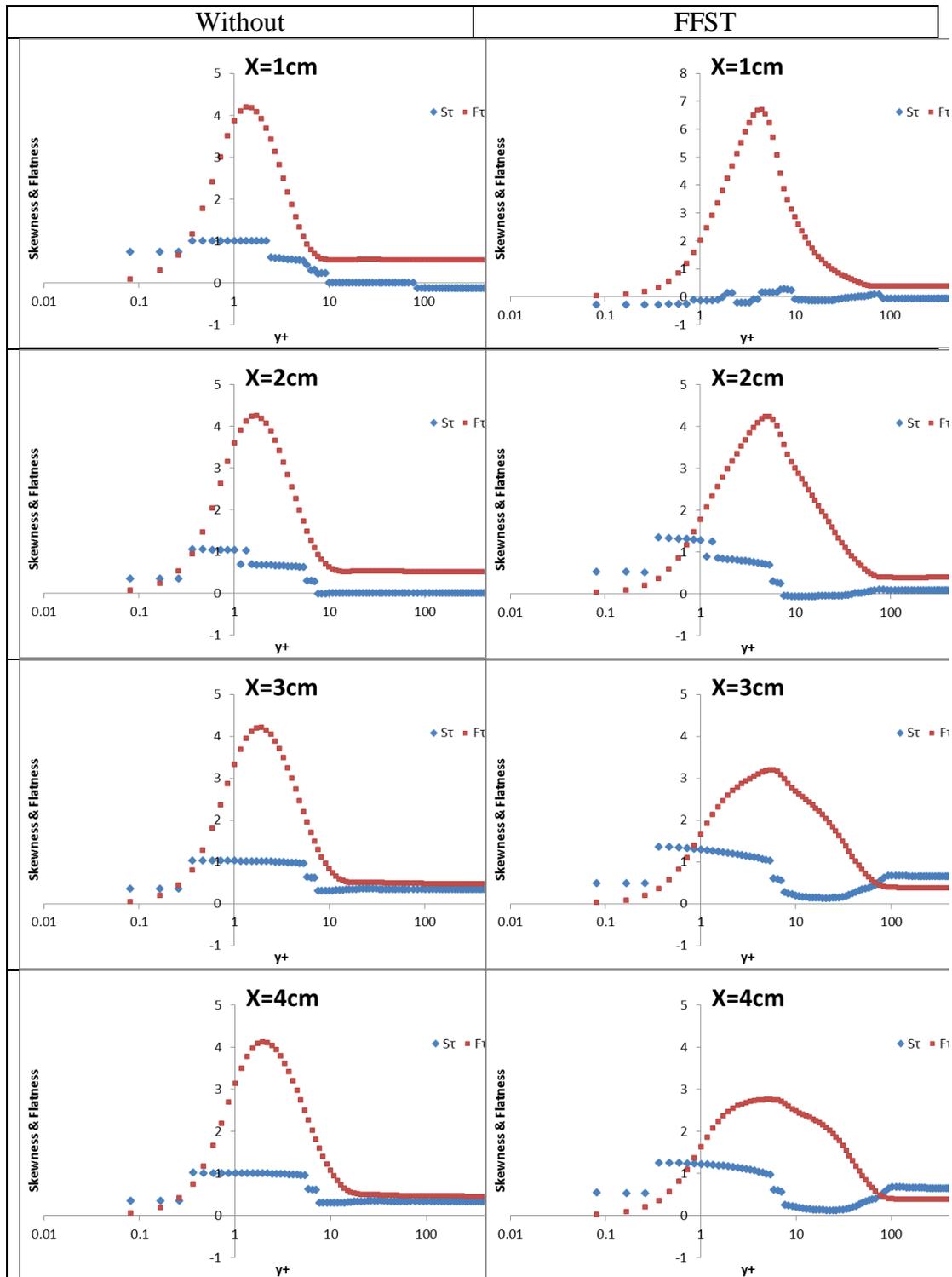
Bidang Tumpu	Wall Shear Stress (Pa)			
	Posisi X(cm)			
	4	8	12	16
Without	0.81	0.77	0.74	0.72
FFST	0.63	0.71	0.69	0.67

Endwall	Shape Factor			
	Position X(cm)			
	4	8	12	16
Without	1.65	1.59	1.51	1.44
FFST	1.80	1.50	1.43	1.40
Defferent	-0.15	0.09	0.08	0.04

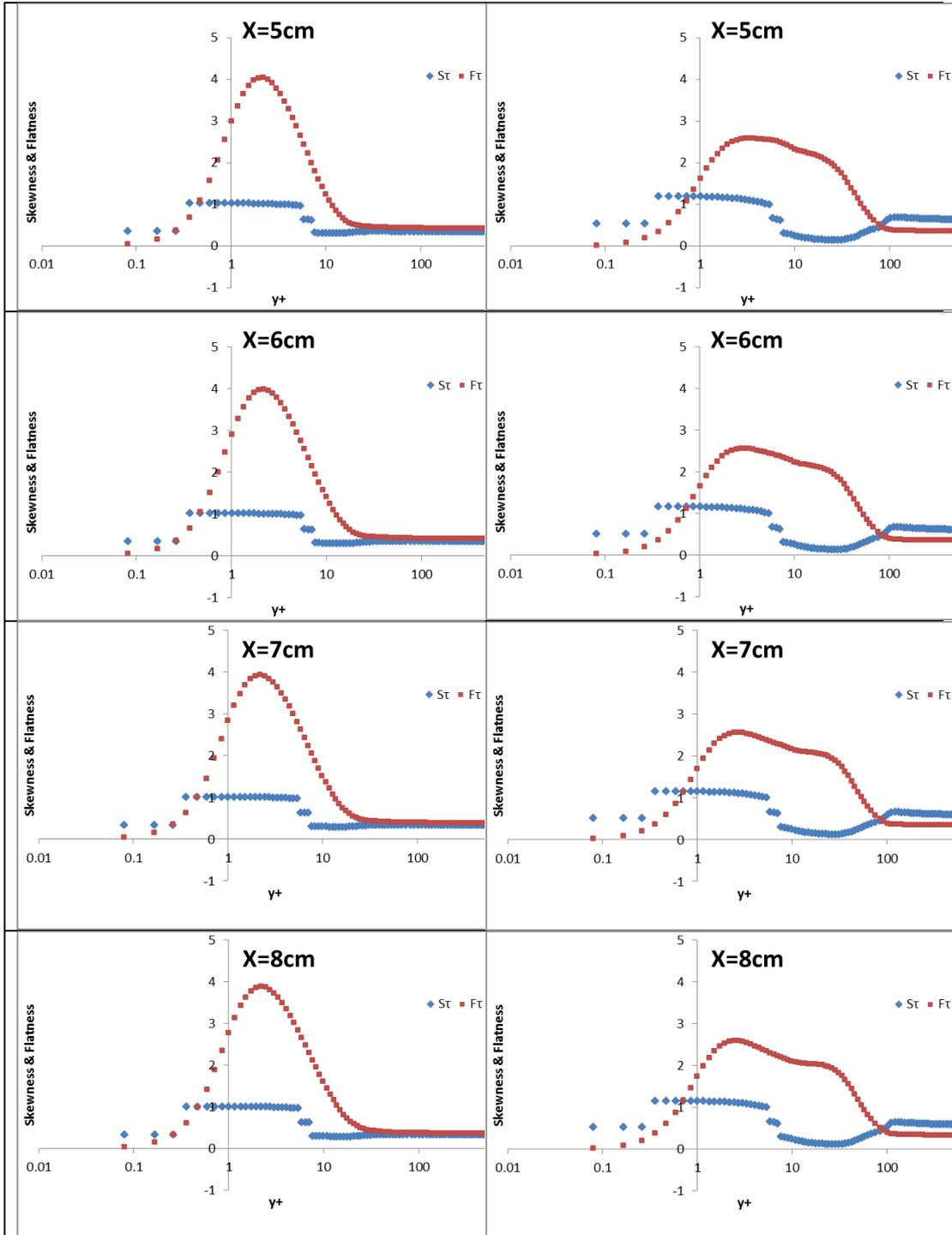
**Lampiran 10 B Profil fluktuasi Kecepatan (W) Melintasi FFST.**



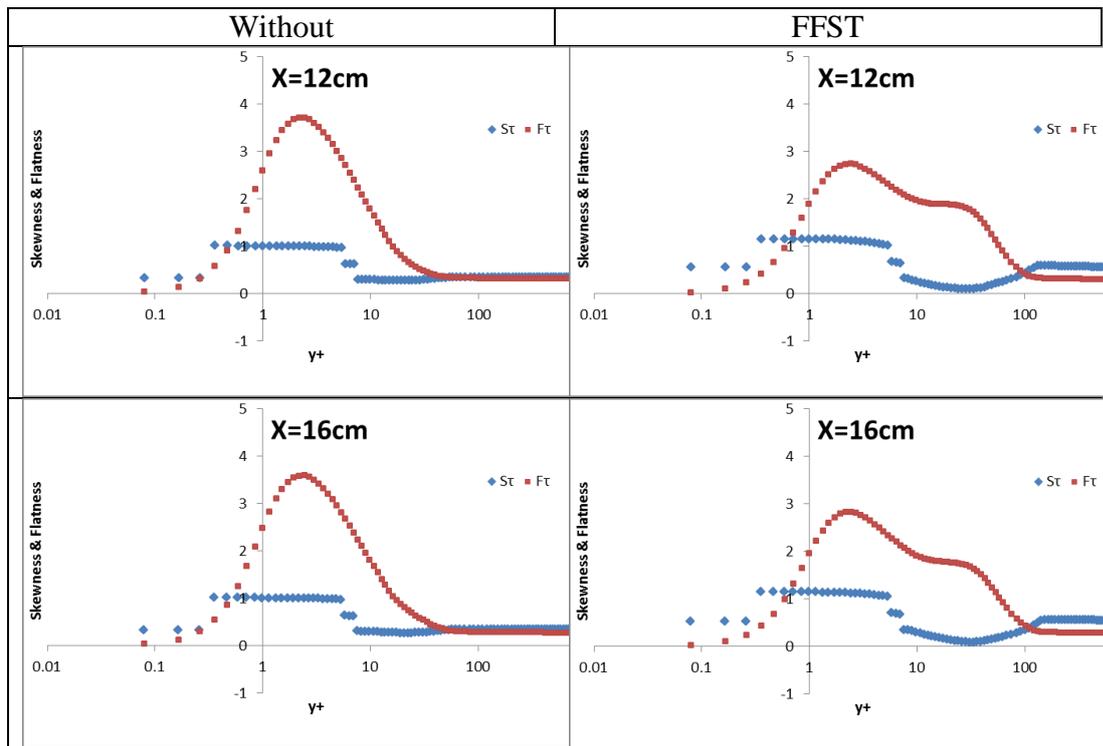
## Lampiran 11 Skewnes dan Flatness $X=1\text{ cm}$ s/d $X=4\text{ cm}$



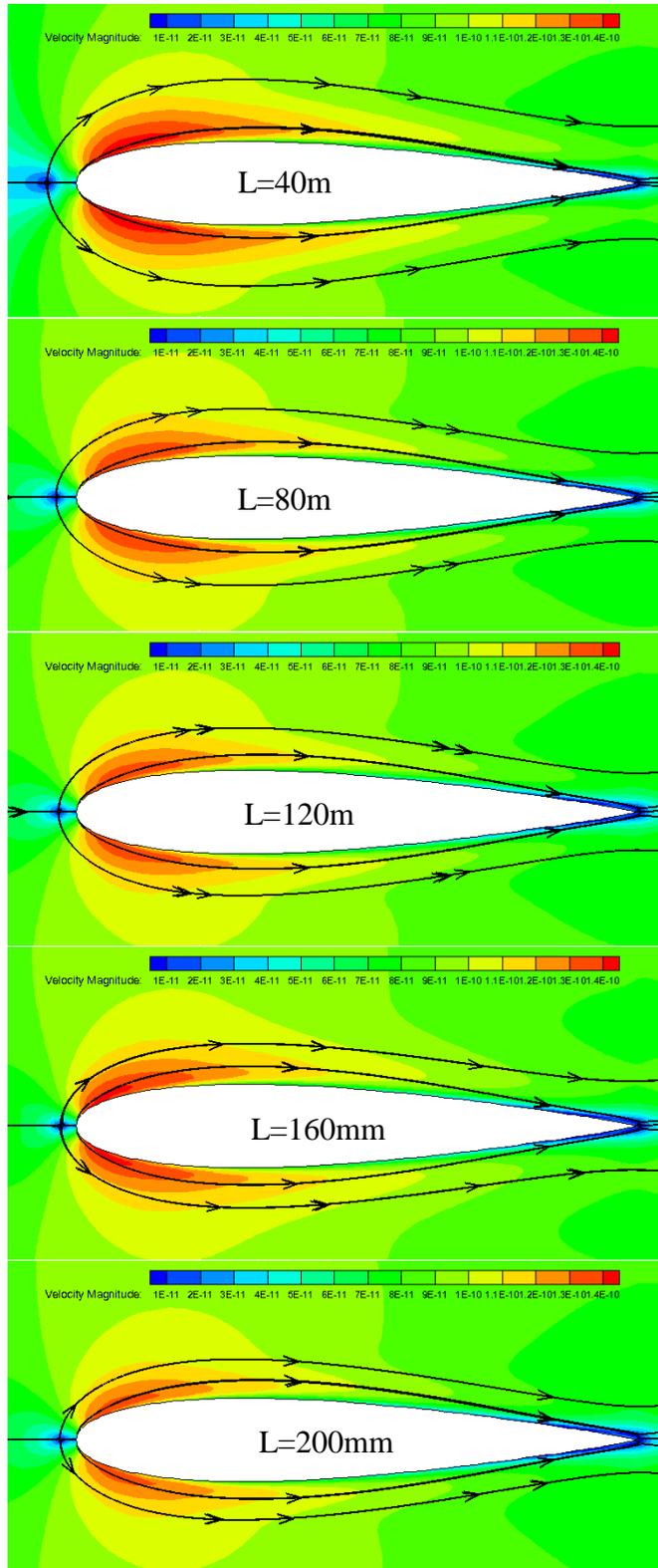
## Lampiran 12 Skewnes dan Flatness X=5 cm s/d X=8cm



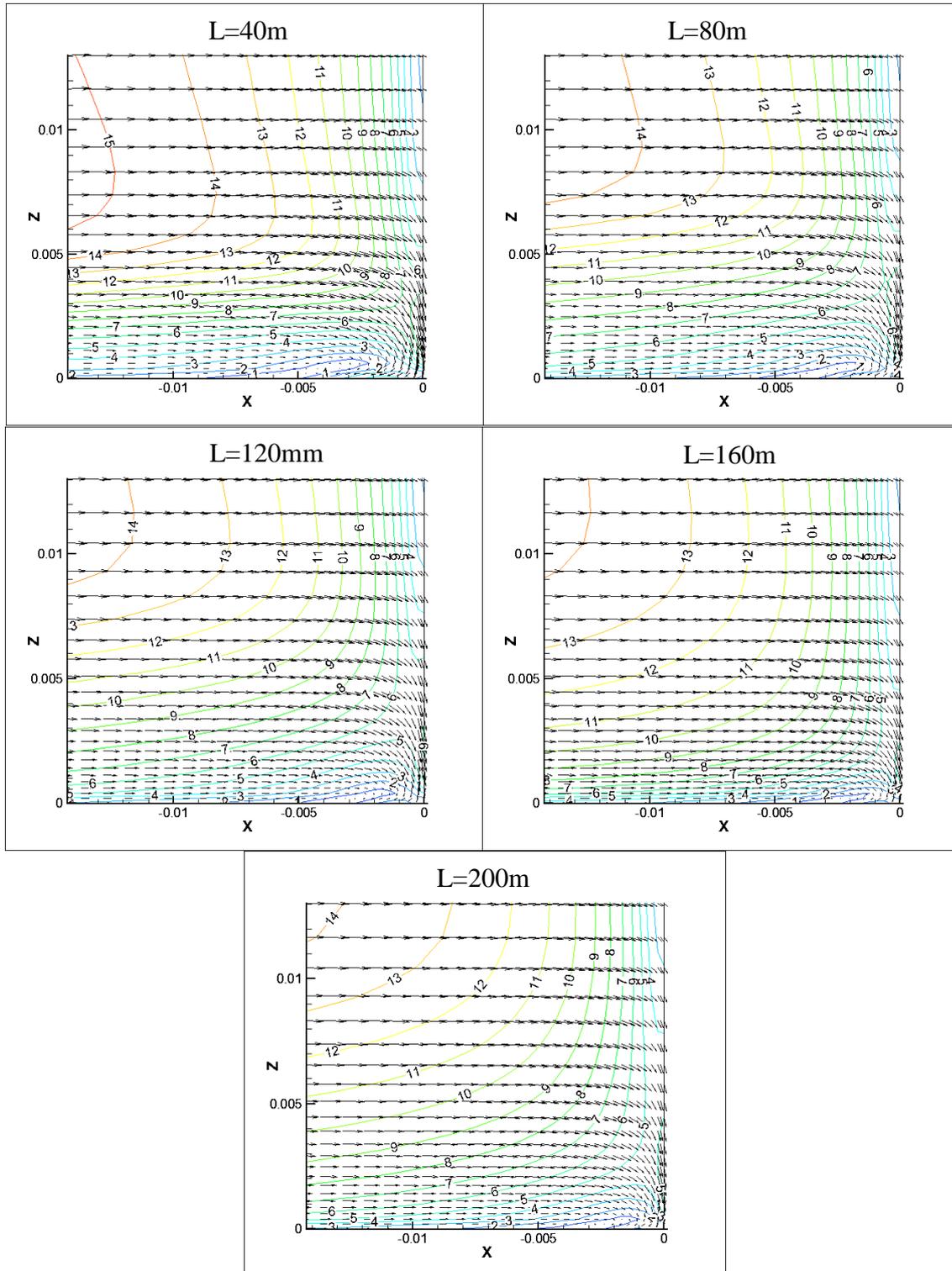
### Lampiran 13 Skewnes dan Flatness X=5 cm s/d X=8cm



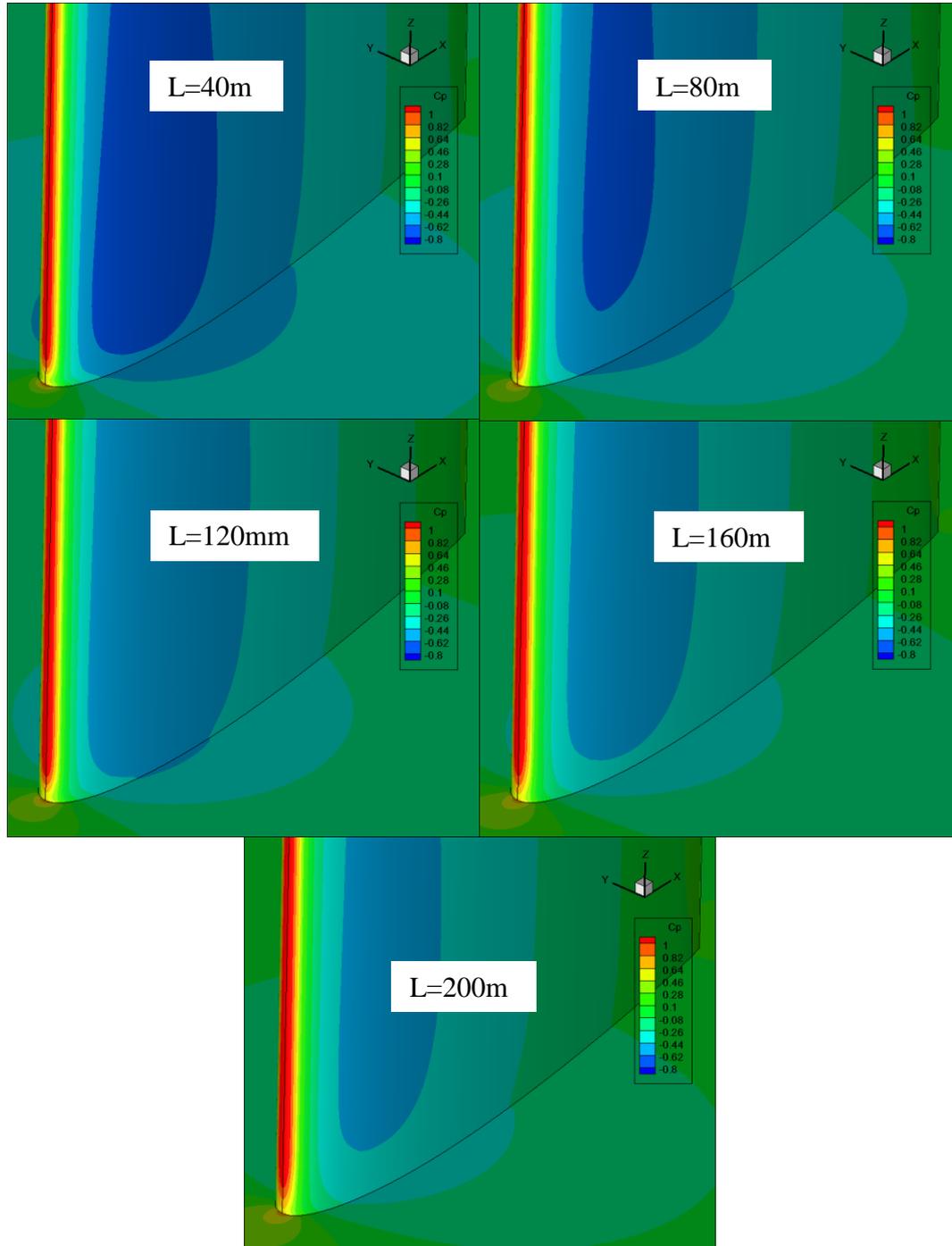
### Lampiran 13 Aliran Sekunder Variasi Jarak FFST.



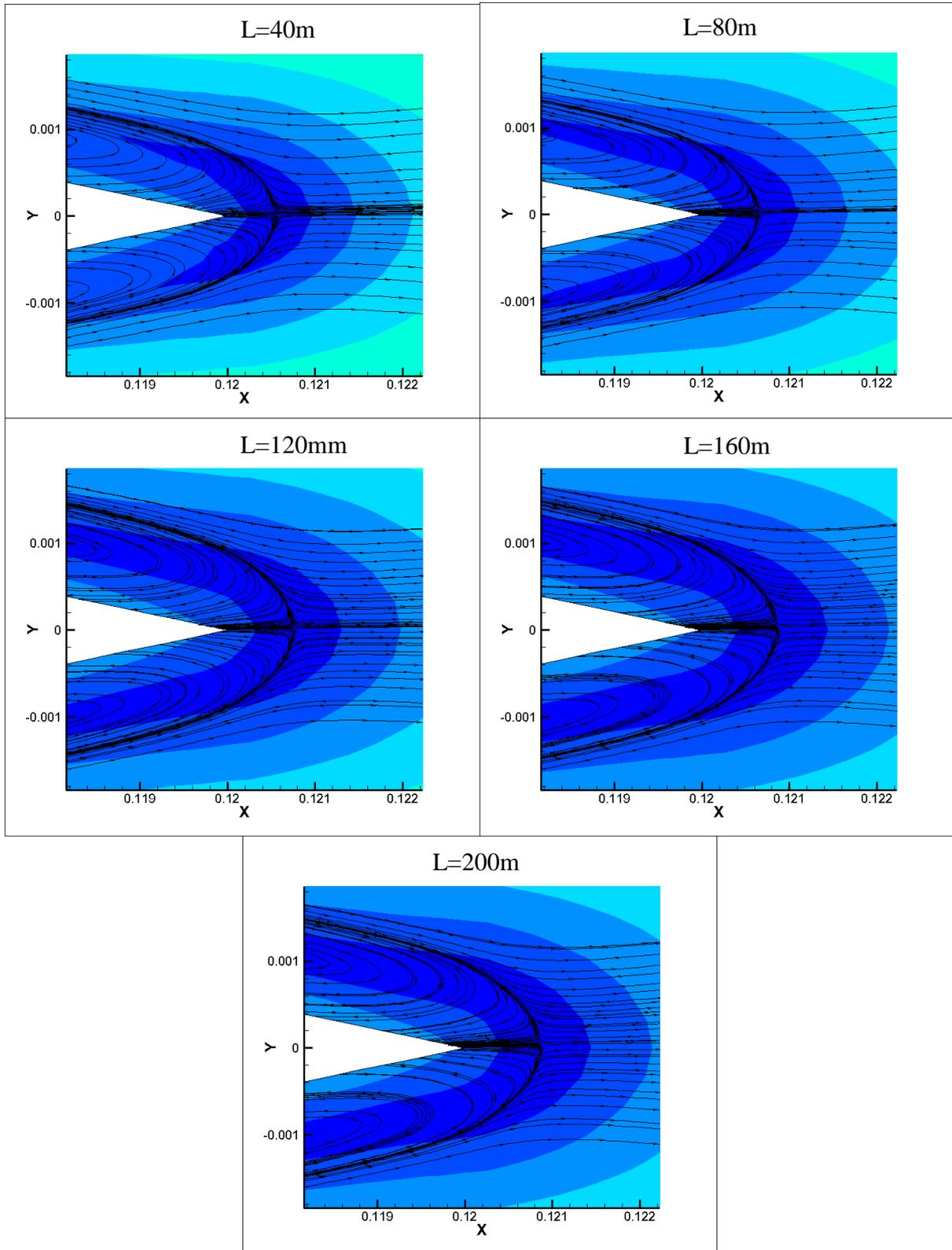
**Lampiran 14 Vektor Kecepatan Depan *Leading Edge* Variasi Jarak FFST.**



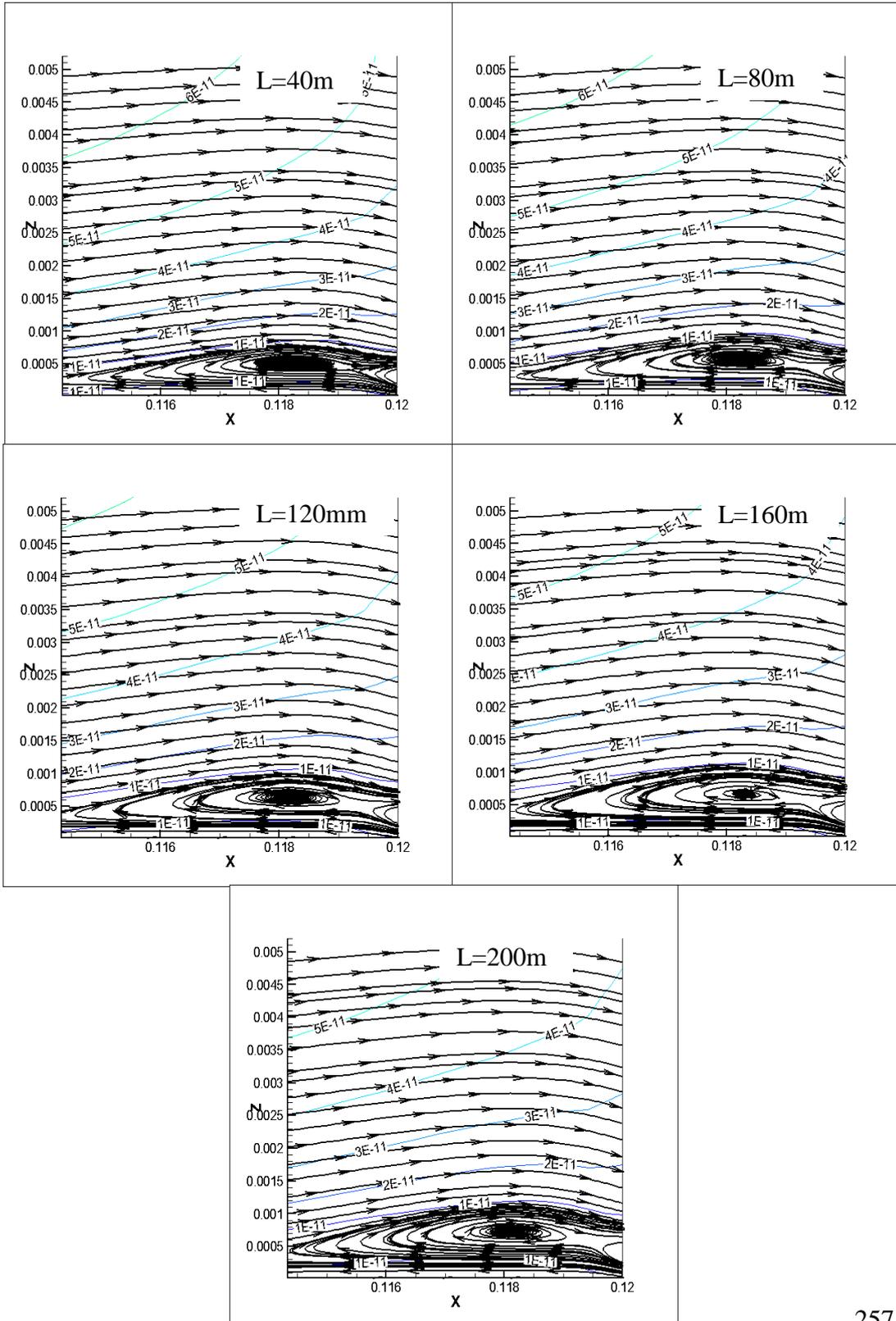
**Lampiran 15 Vektor Kecepatan Depan *Leading Edge* Variasi Jarak FFST.**



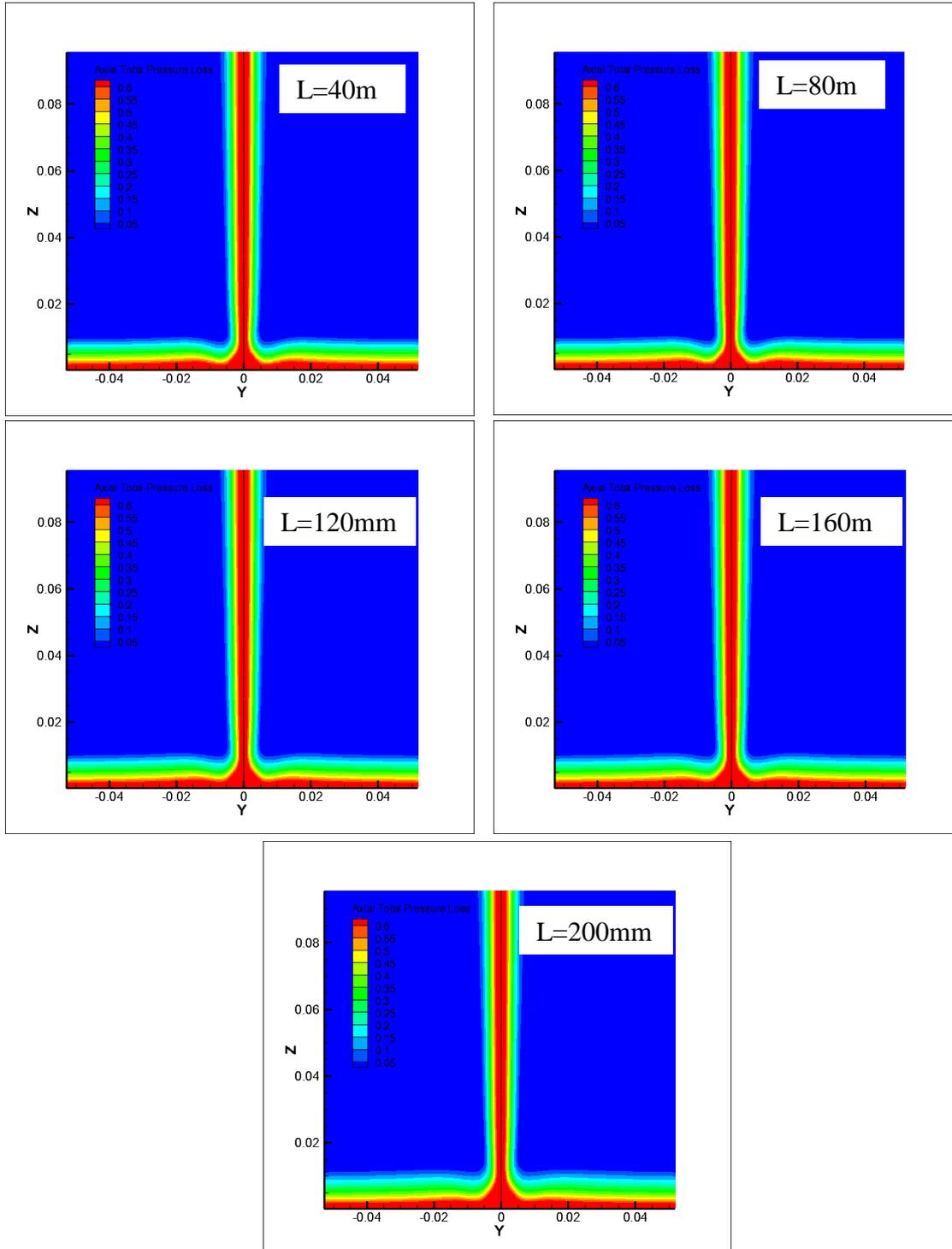
**Lampiran 16 Vektor Kecepatan Depan *Leading Edge* Variasi Jarak FFST.**



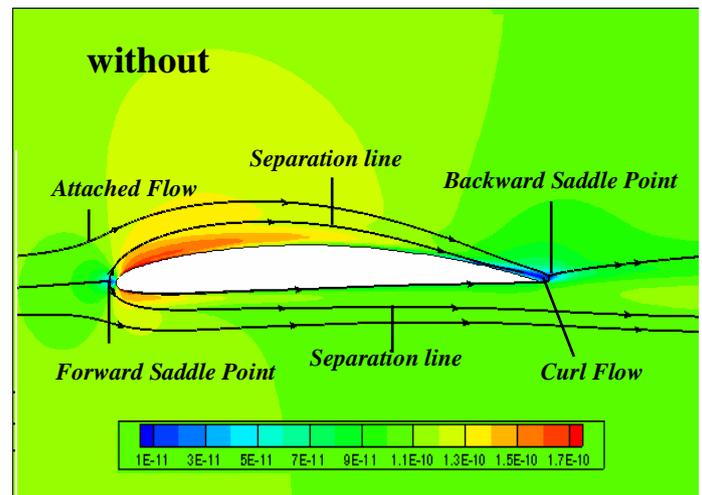
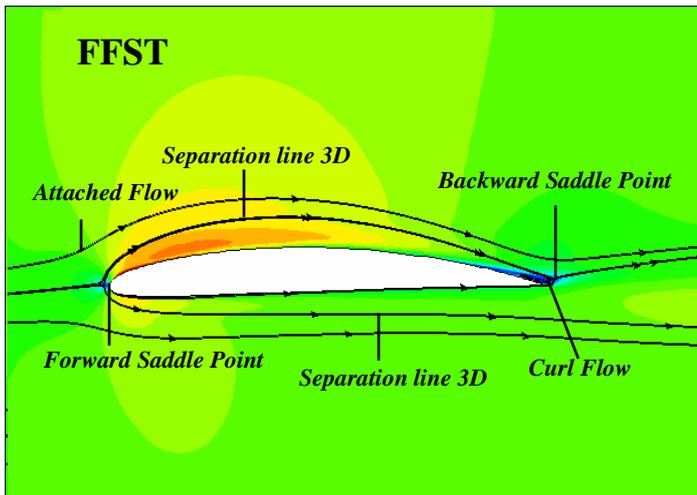
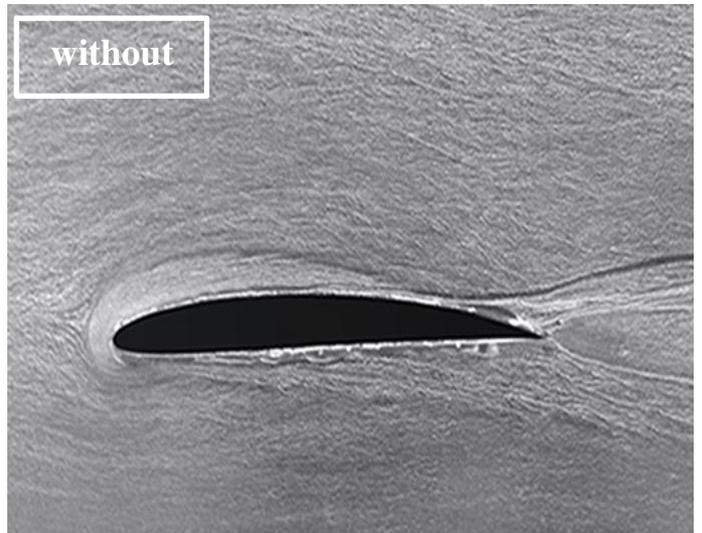
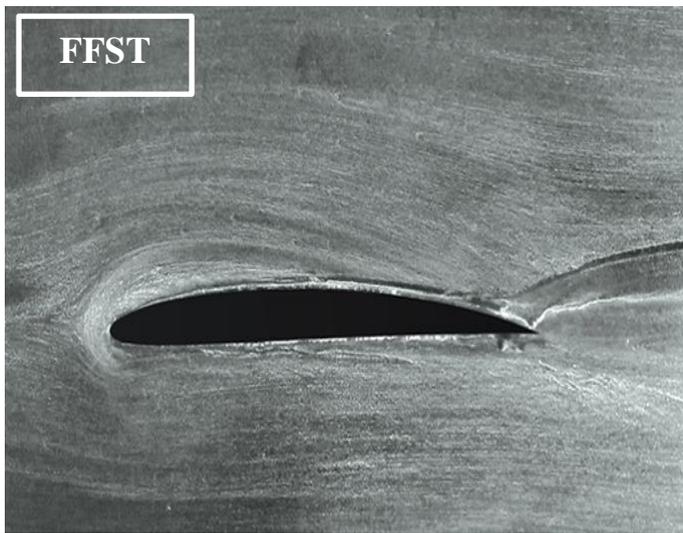
**Lampiran 17 Vektor Kecepatan Depan *Leading Edge* Variasi  
Jarak FFST.**



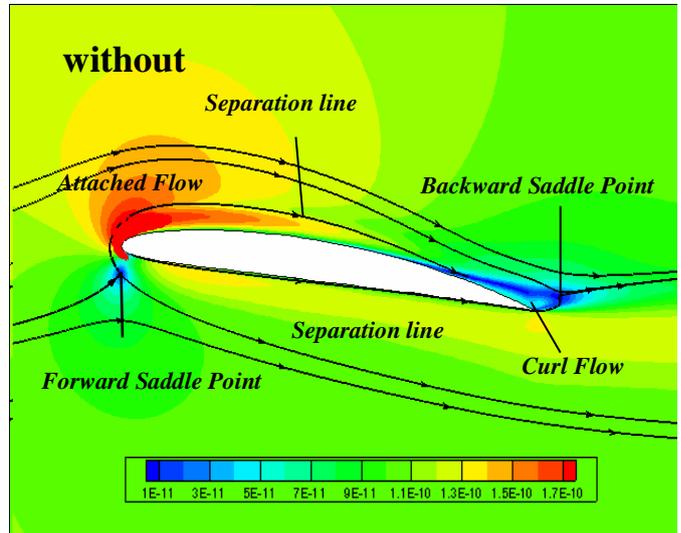
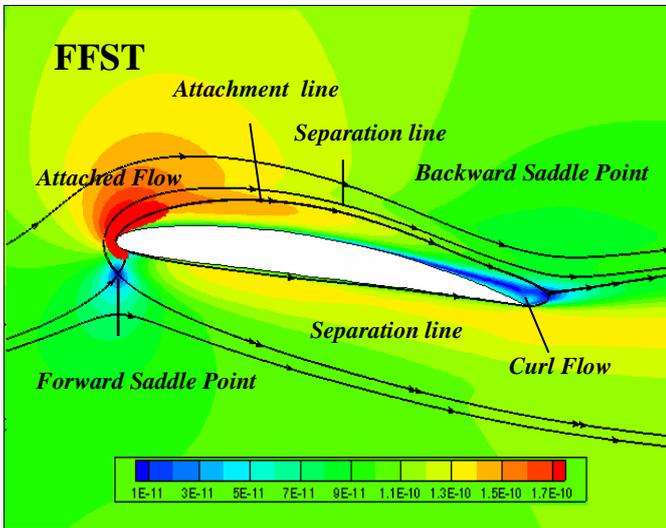
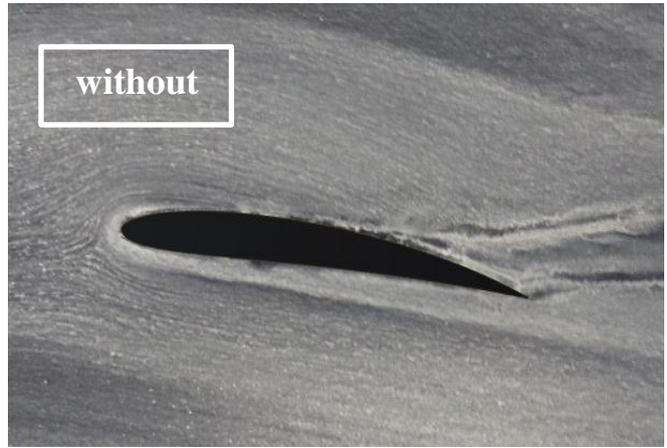
**Lampiran 18 Vektor Kecepatan Depan *Leading Edge* Variasi Jarak FFST.**



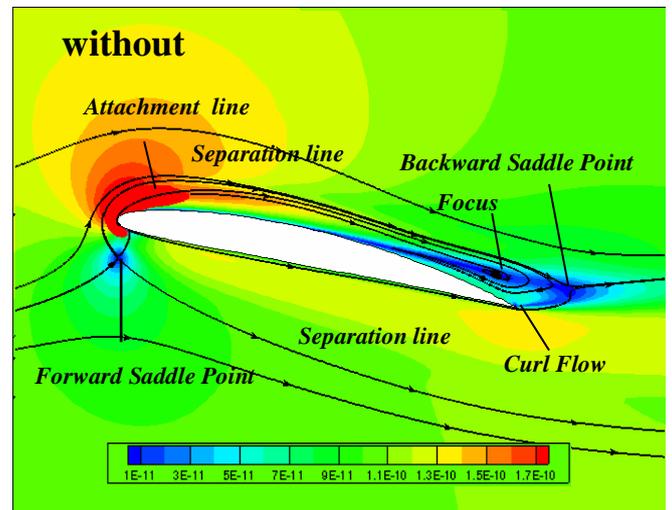
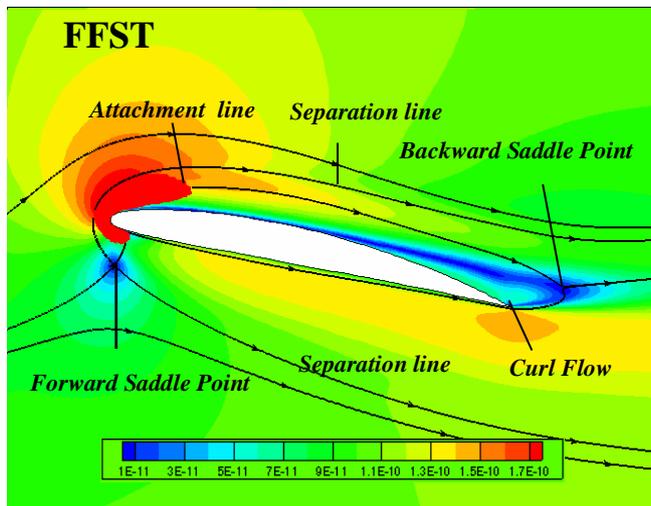
**Lampiran 19 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/22.5 AoA 0°**



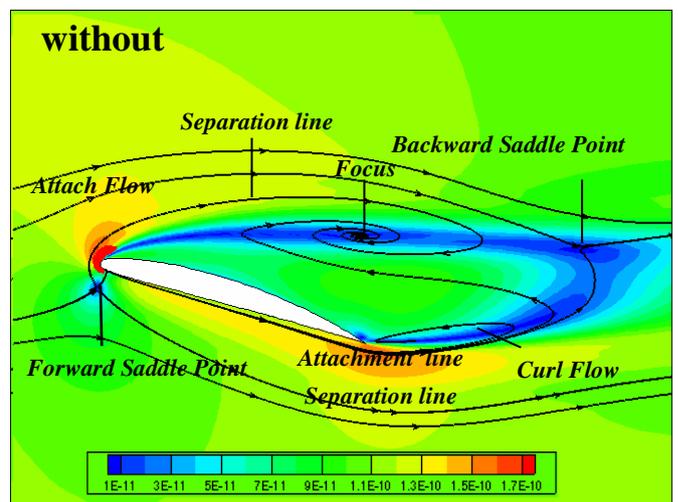
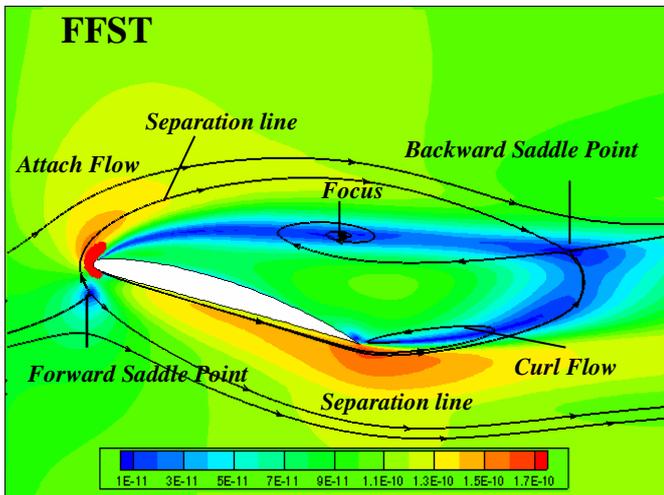
Lampiran 20 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/22.5 AoA 8°



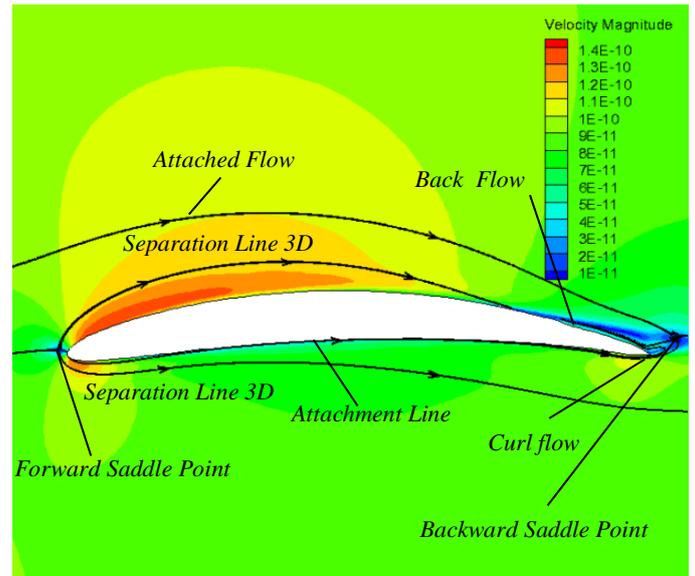
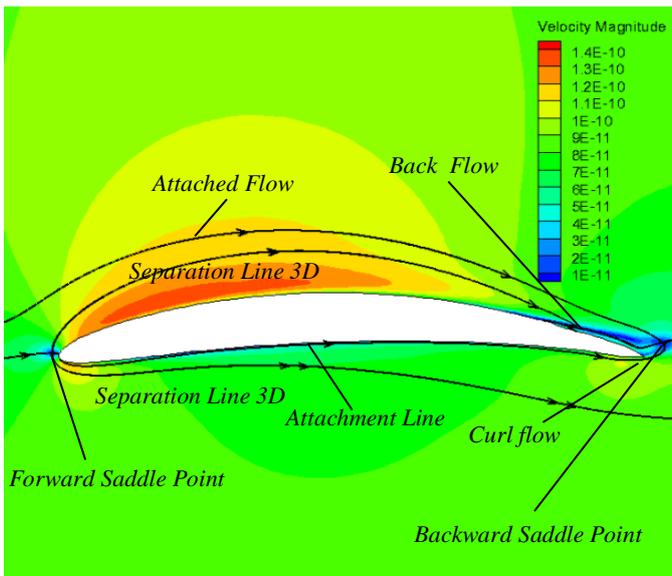
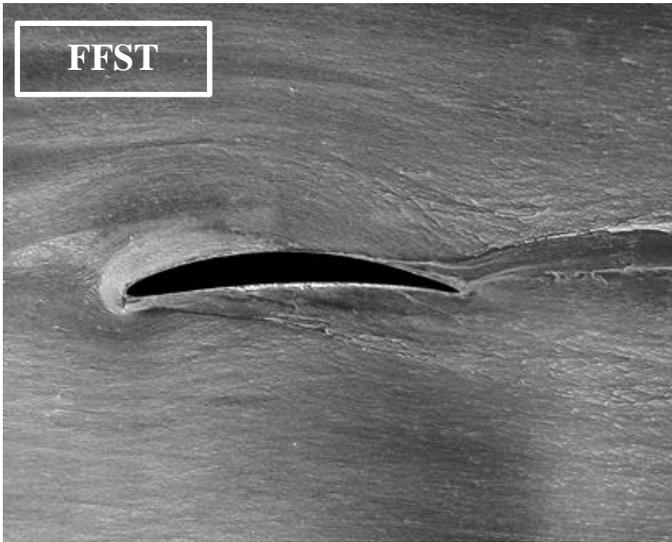
**Lampiran 21 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/22.5 AoA 12°**



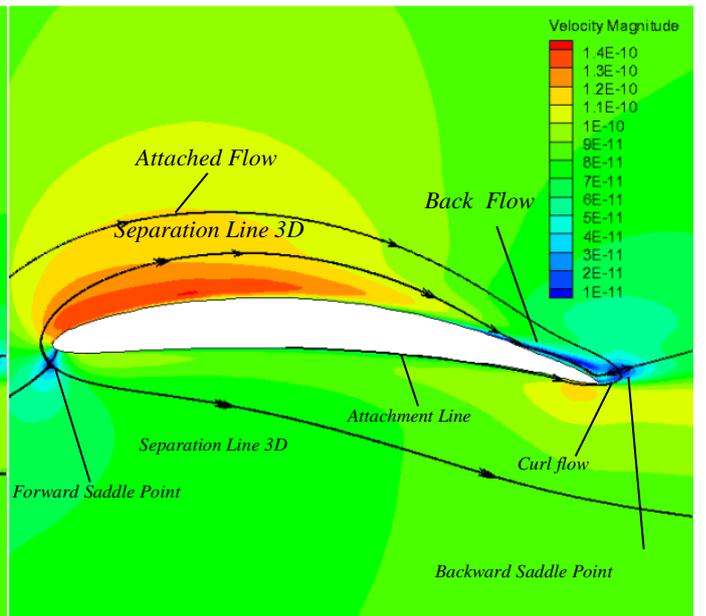
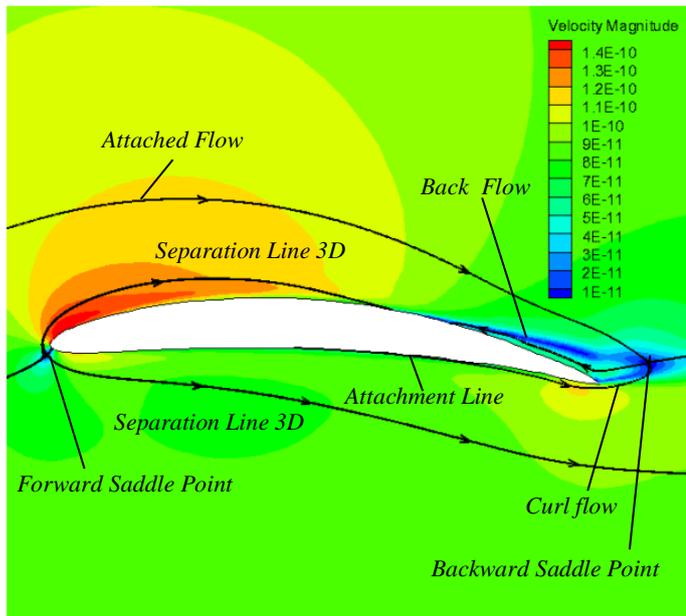
Lampiran 22 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/22.5 AoA 16°



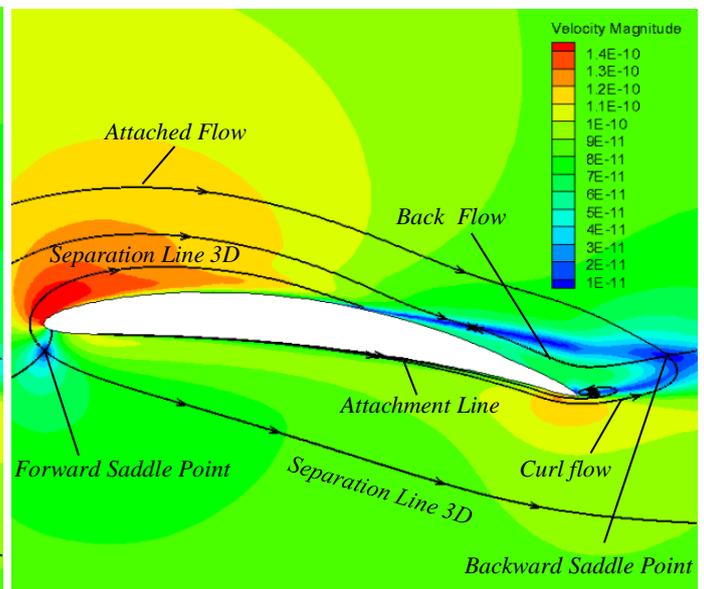
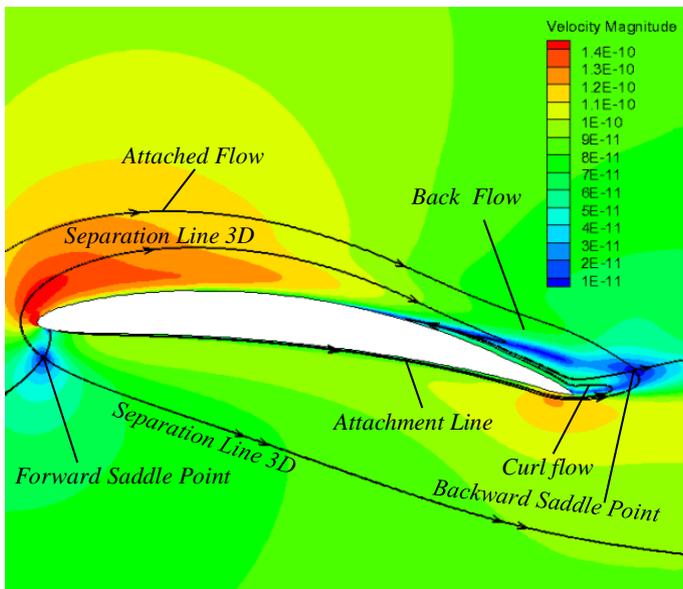
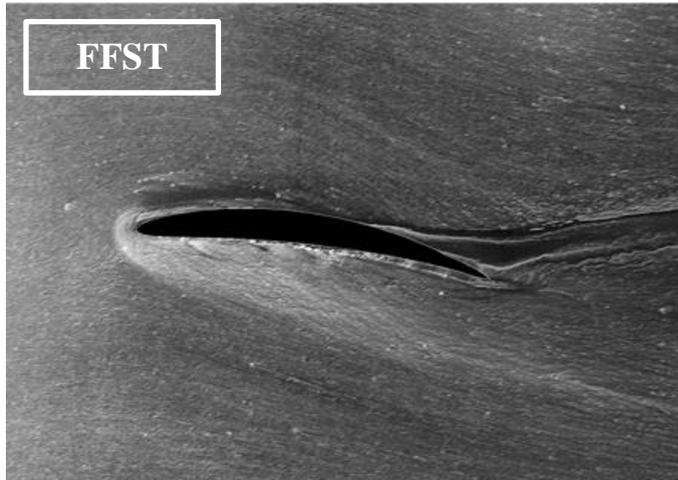
**Lampiran 23 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/32.5 AoA 0°**



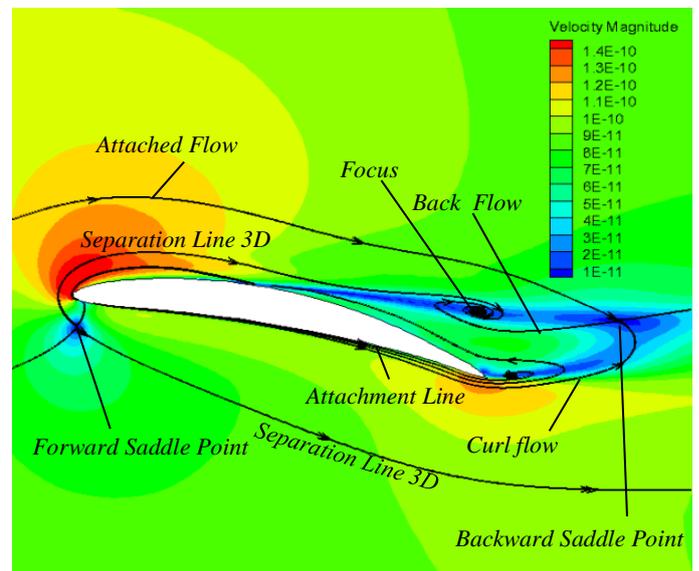
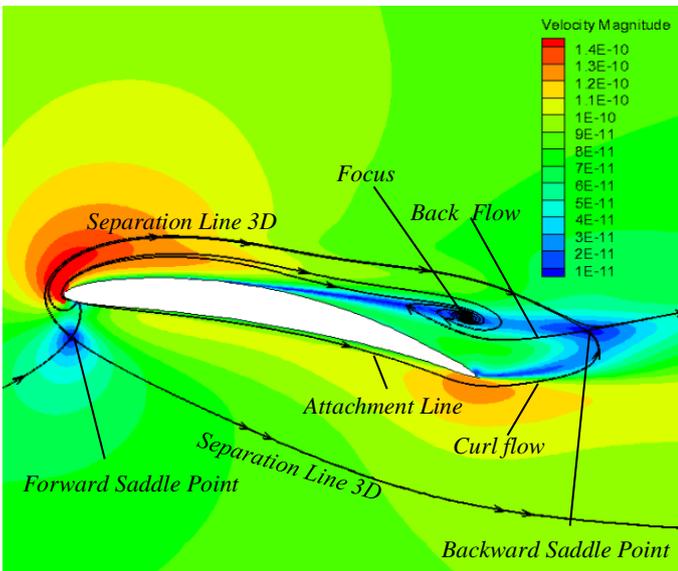
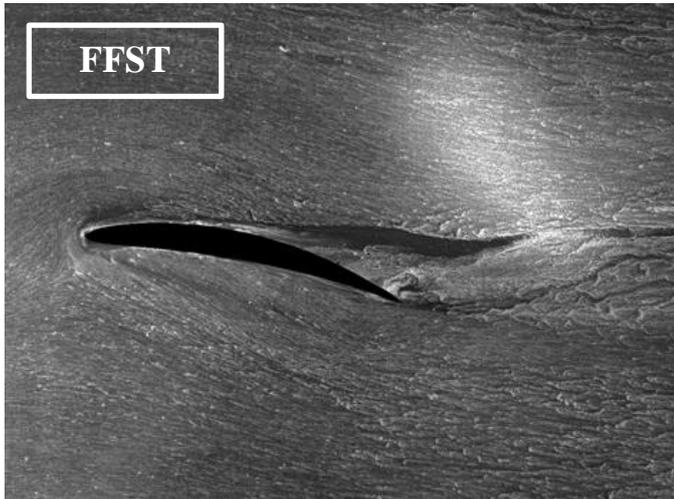
**Lampiran 24 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/32.5 AoA 4°**



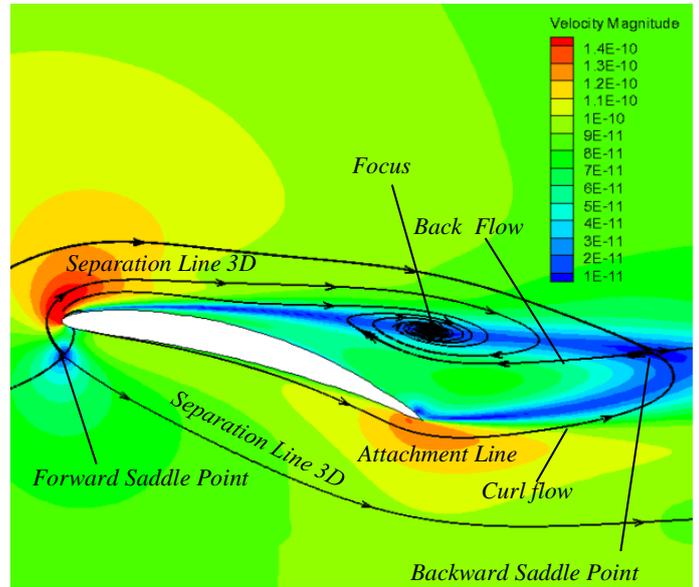
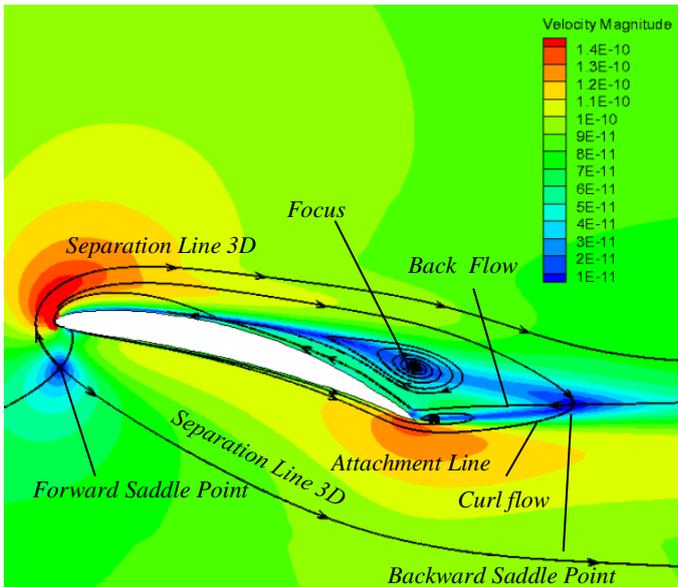
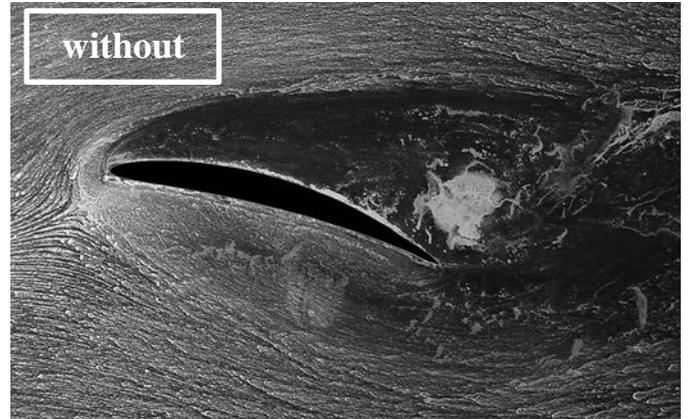
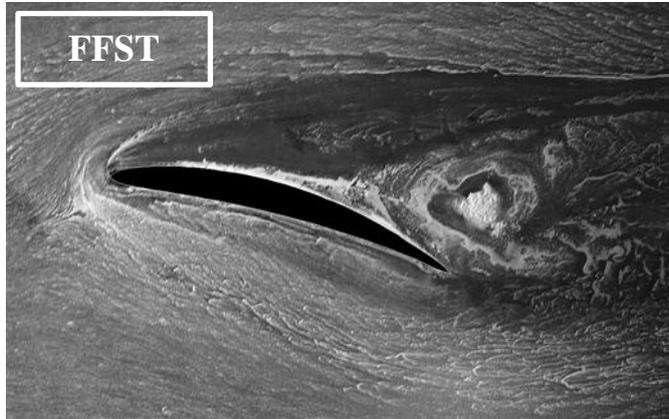
**Lampiran 25 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/32.5 AoA 8°**



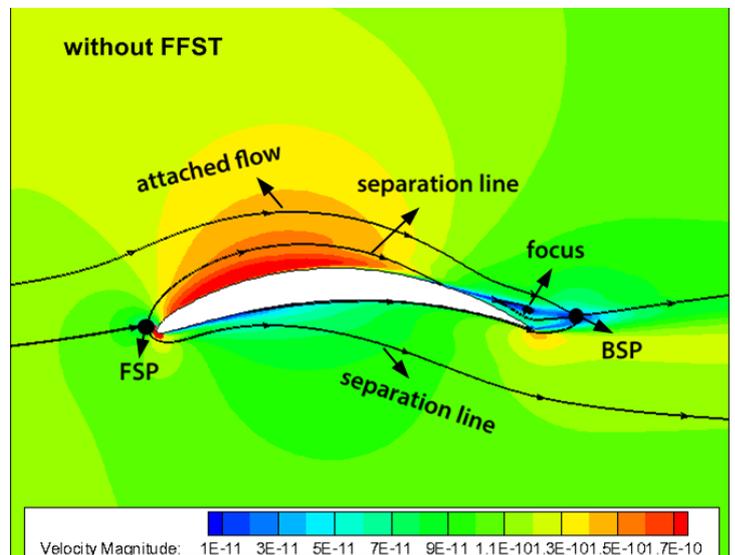
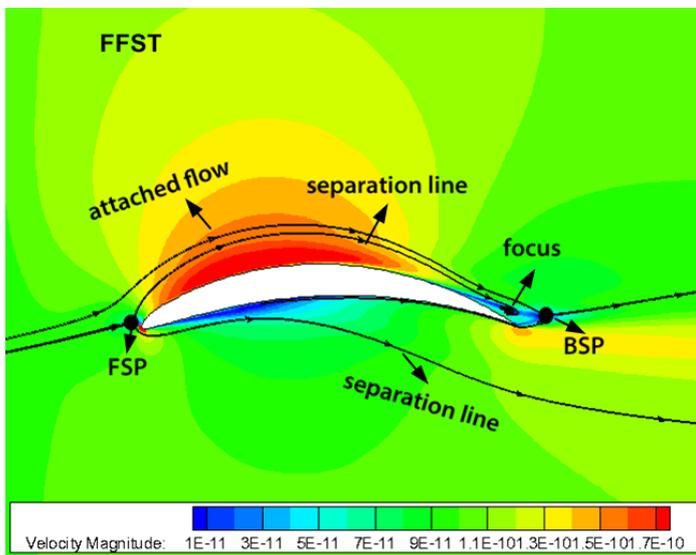
Lampiran 26 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/32.5 AoA 12°



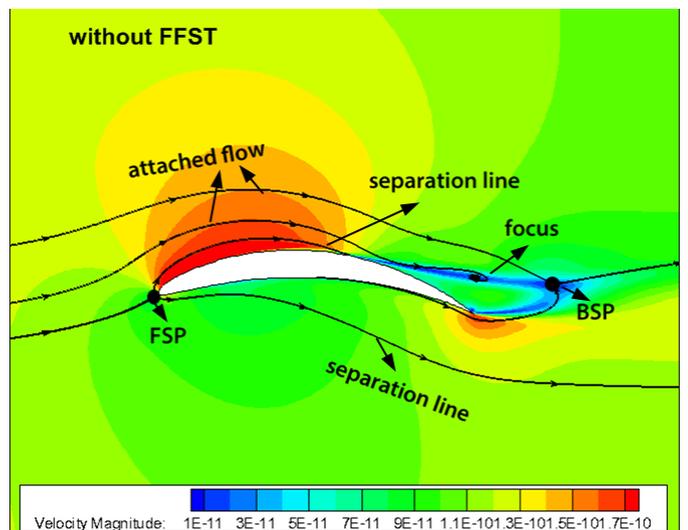
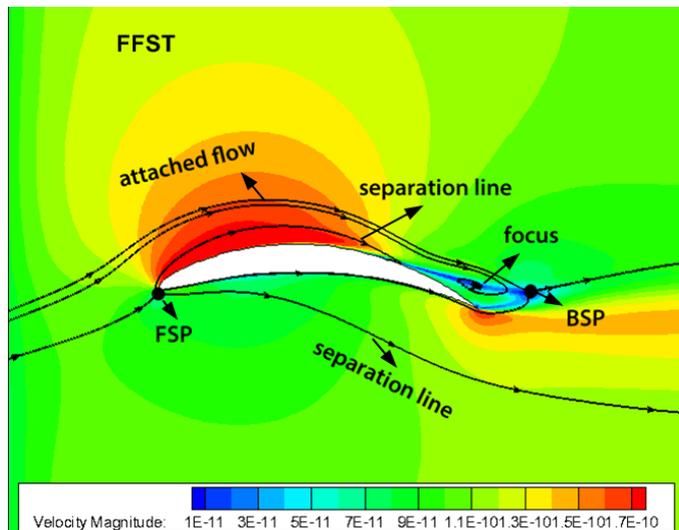
**Lampiran 27 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/32.5 AoA 16°**



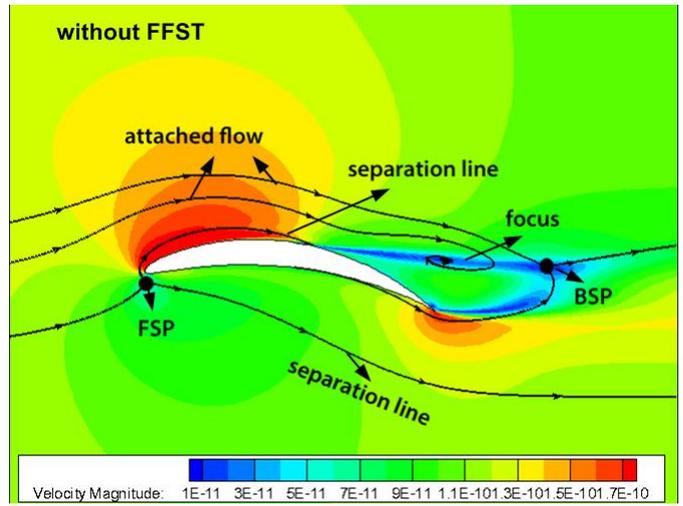
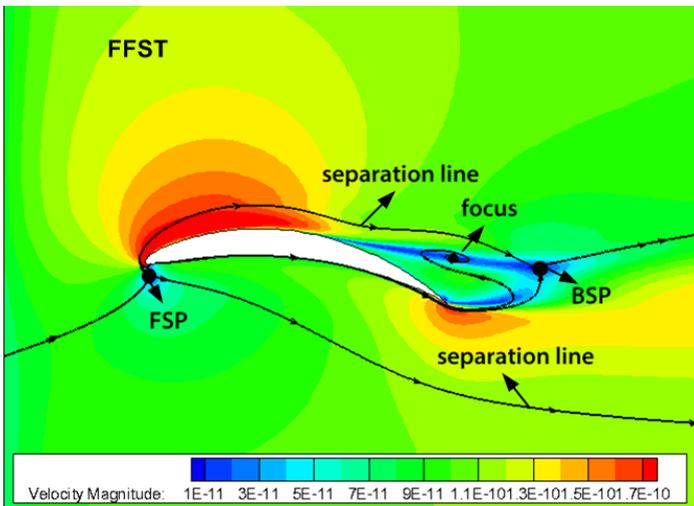
**Lampiran 28 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/42.5 AoA 0°**



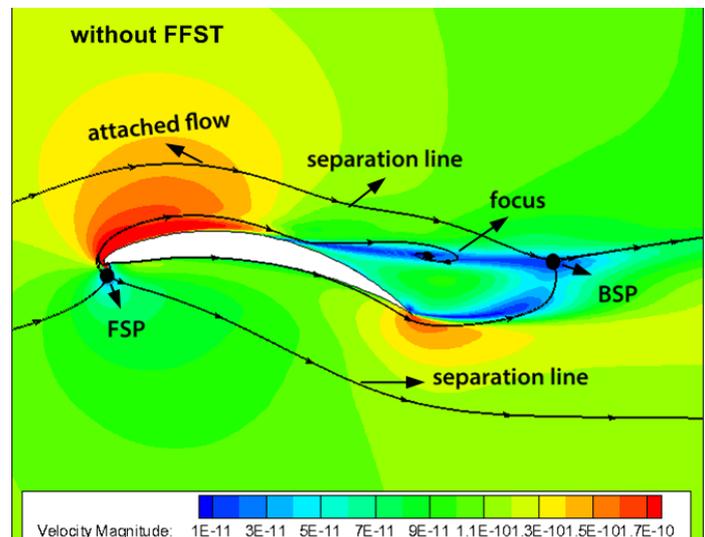
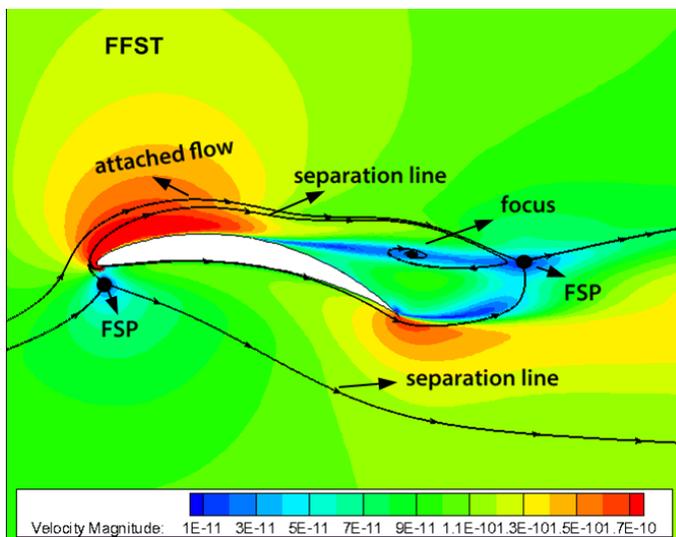
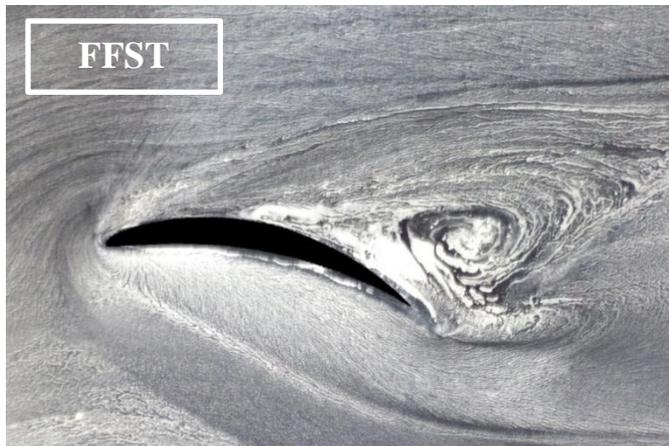
**Lampiran 29 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/42.5 AoA 8°**



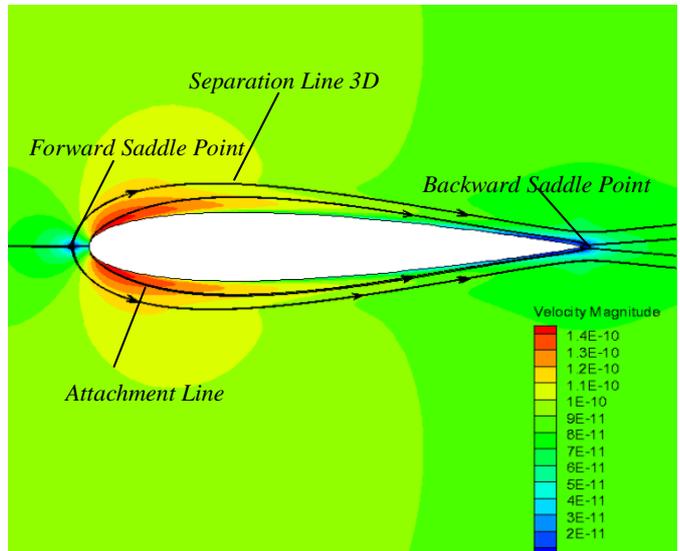
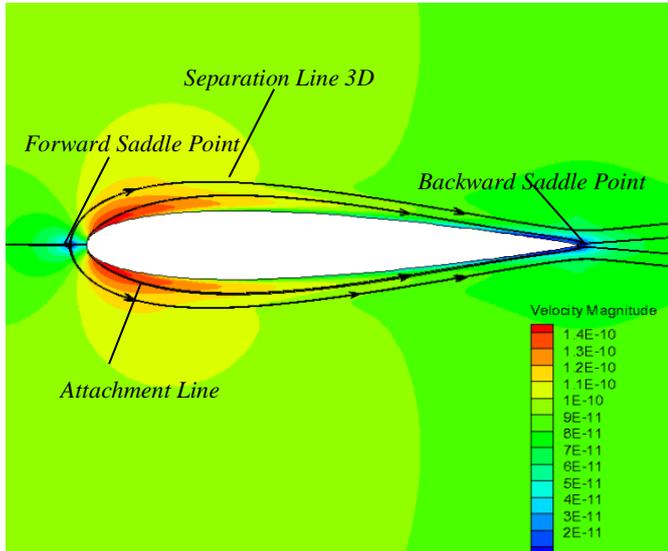
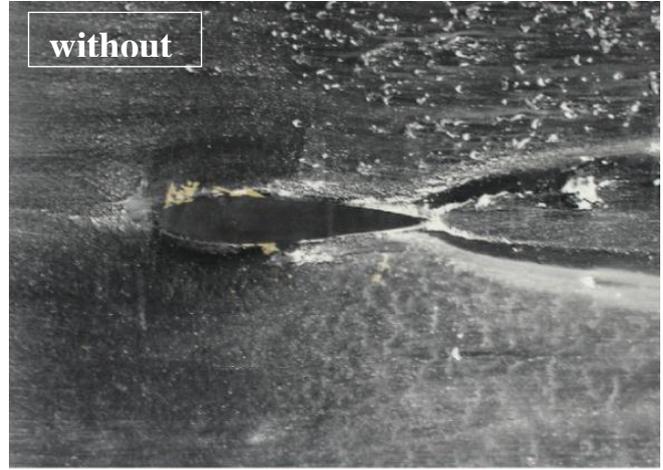
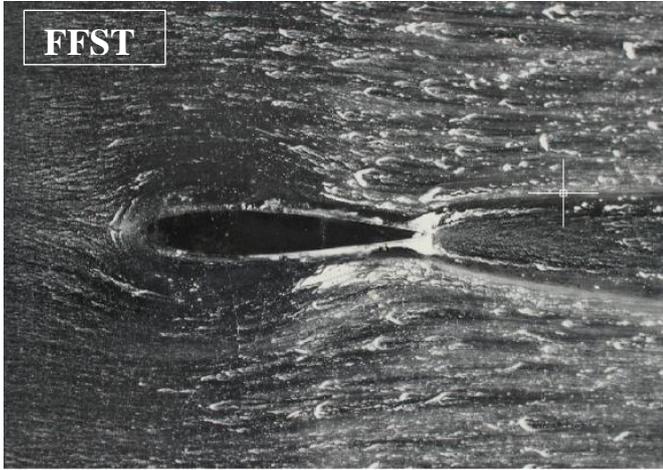
Lampiran 30 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/42.5 AoA 12°



**Lampiran 31 Topologi Aliran Sekunder Pada 9C7/42.5 AoA 16°**

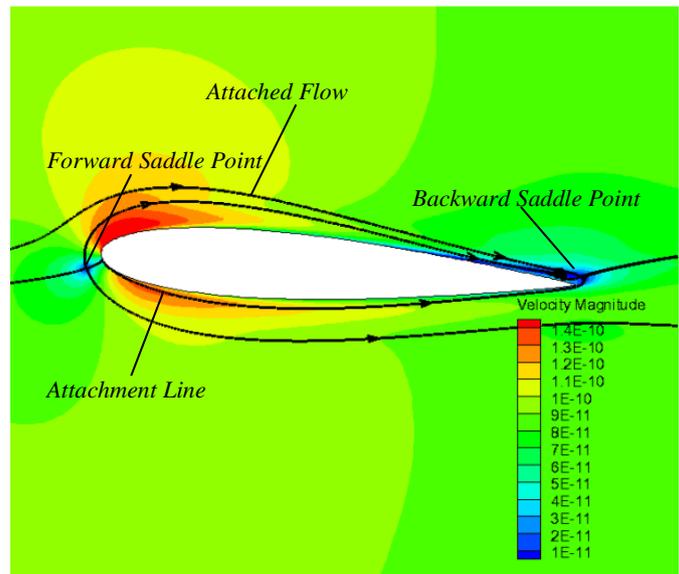
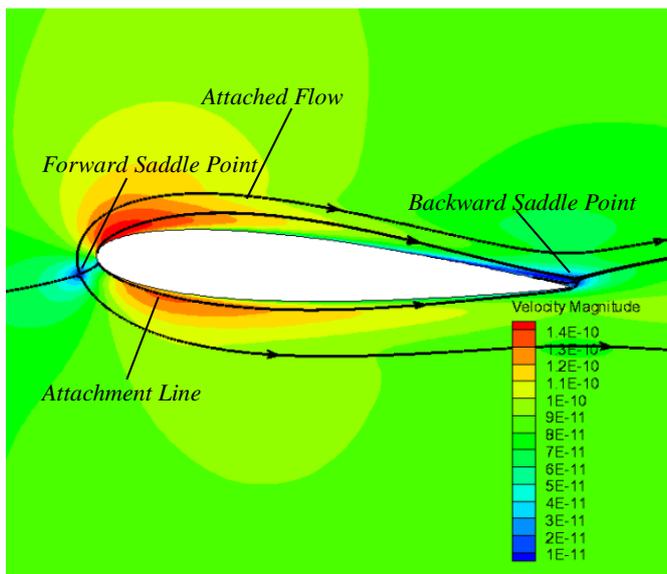
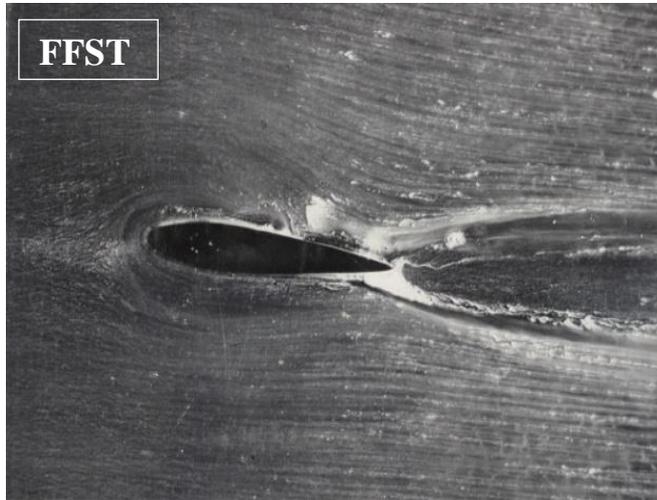


**Lampiran 32 Topologi Aliran Sekunder Pada NACA0015 AoA**  
**0°**



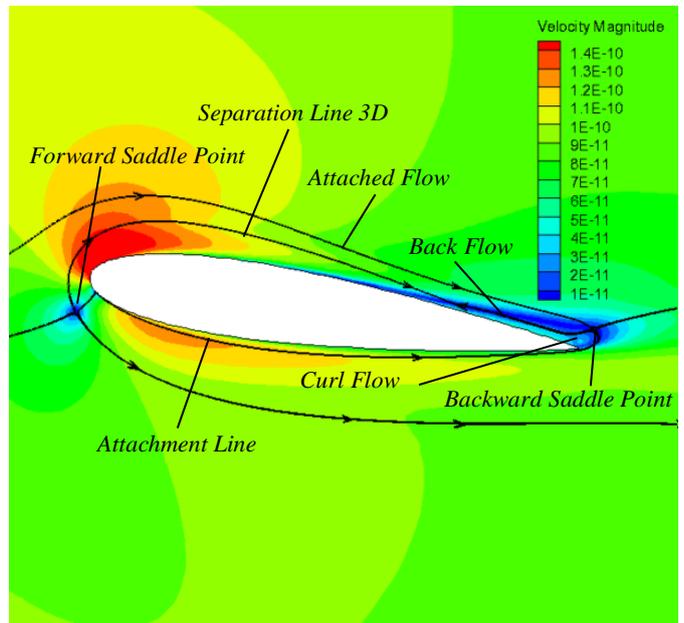
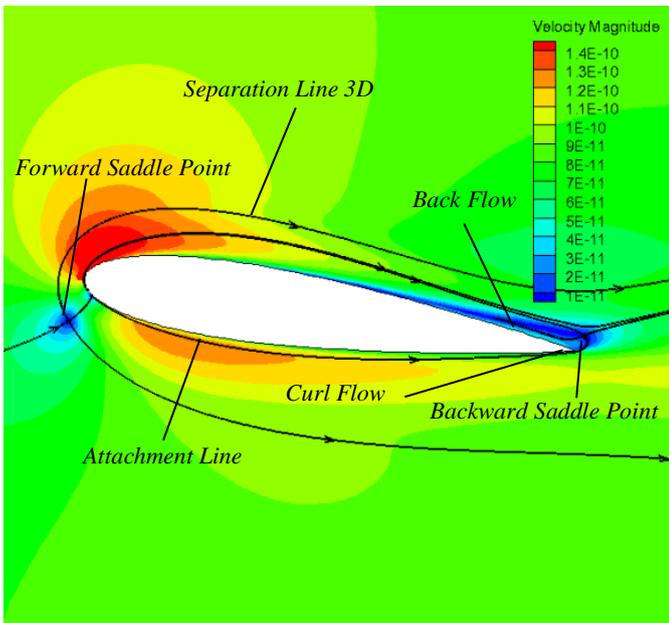
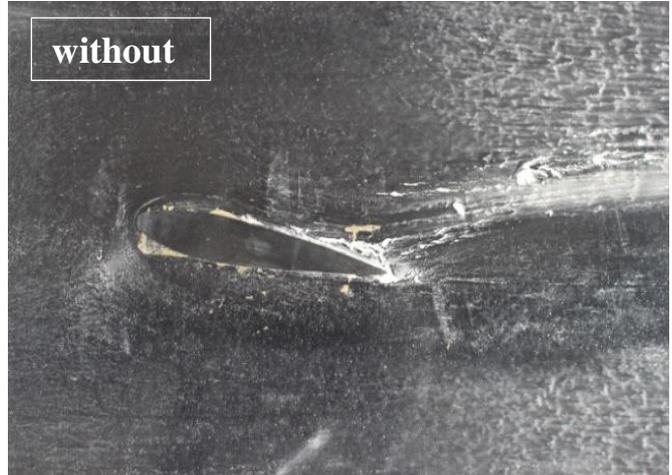
**Lampiran 33 Topologi Aliran Sekunder Pada NACA0015 AoA**

**4°**

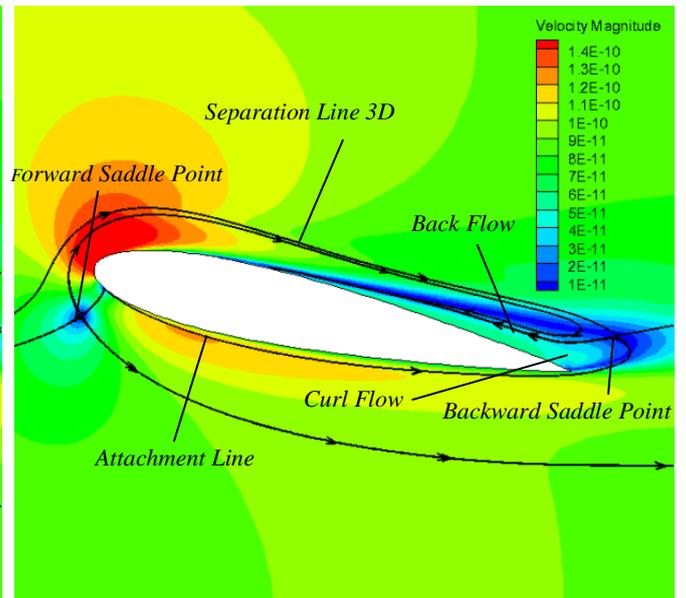
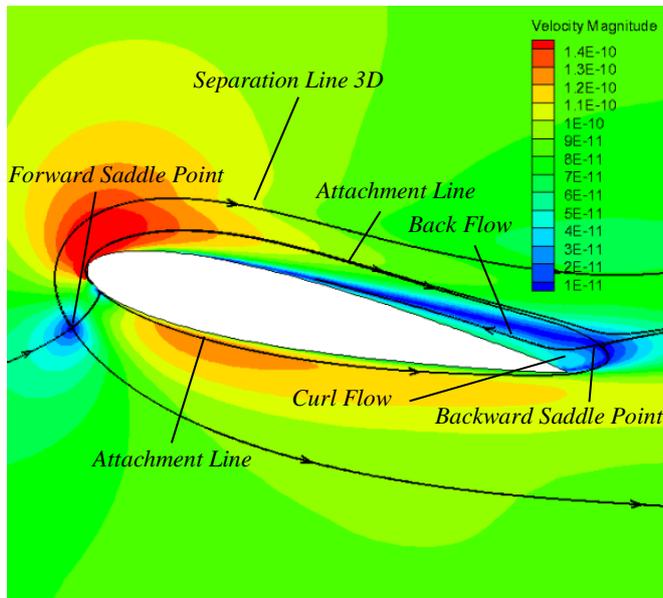
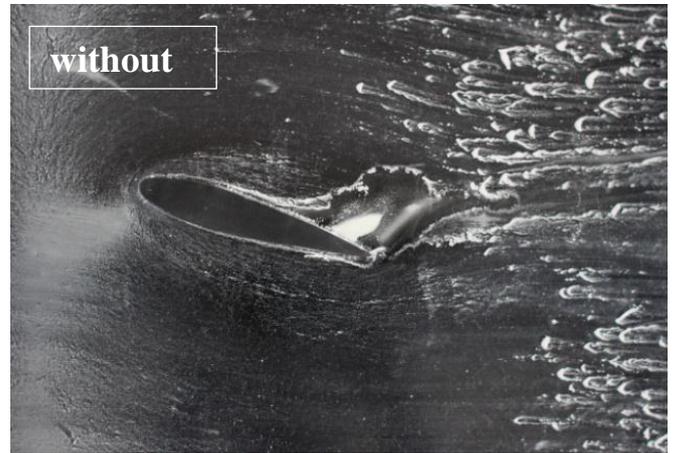


**Lampiran 34 Topologi Aliran Sekunder Pada NACA0015 AoA**

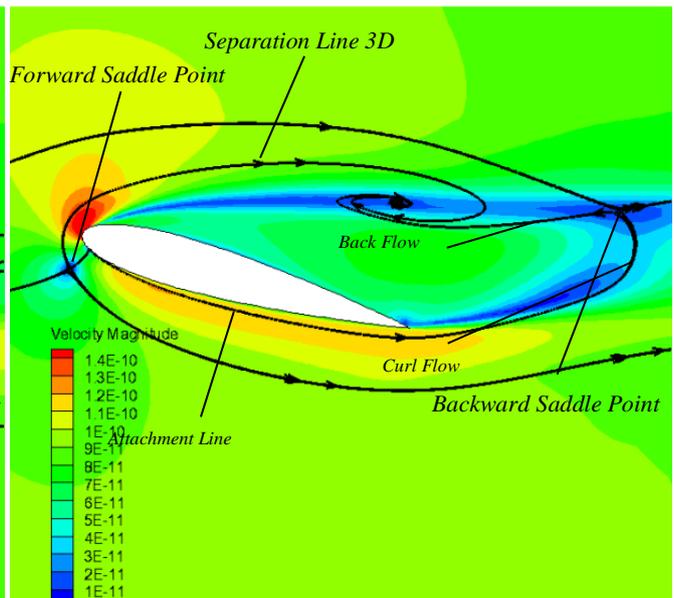
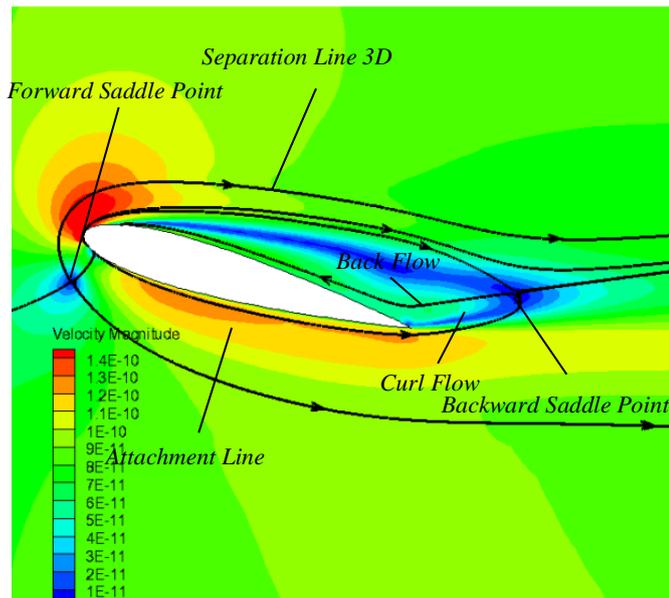
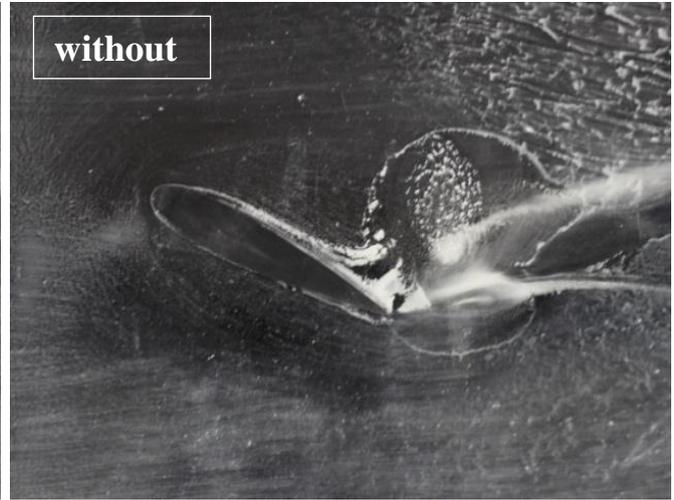
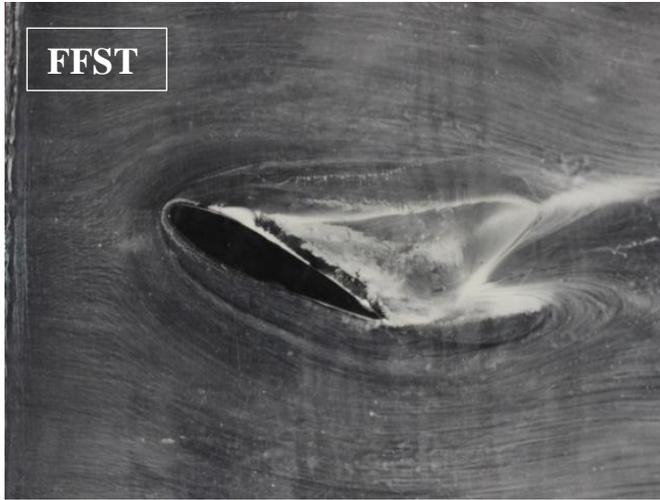
**8°**



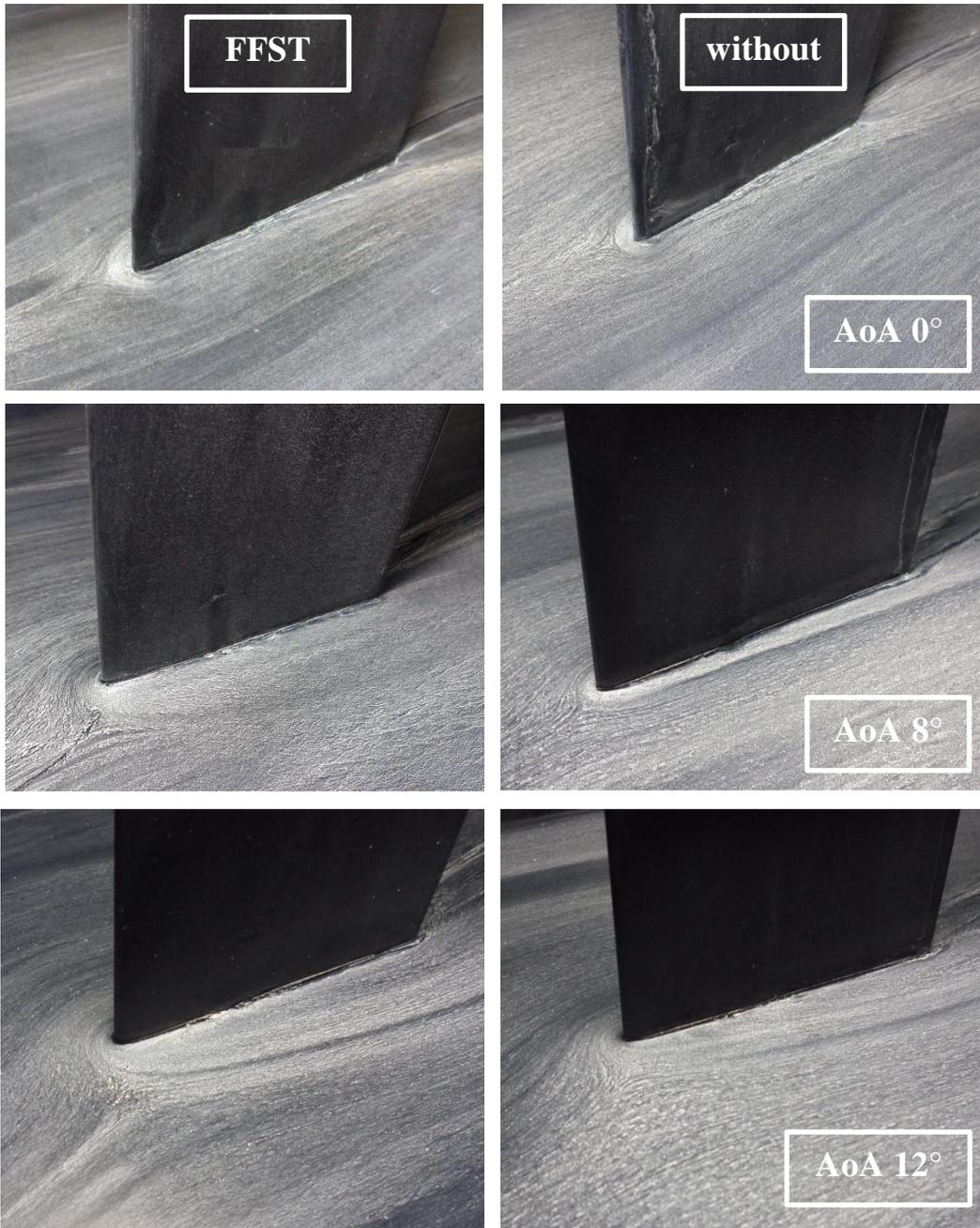
Lampiran 35 Topologi Aliran Sekunder Pada NACA0015 AoA  
12°



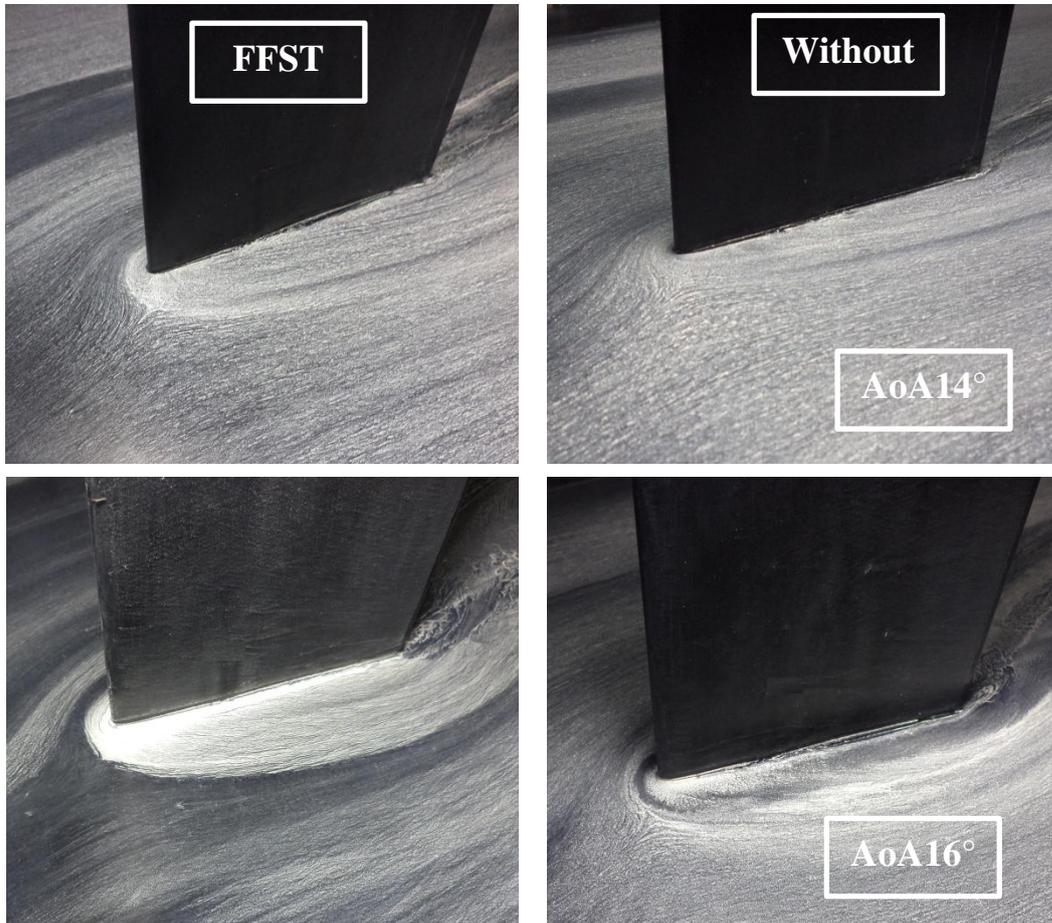
**Lampiran 36 Topologi Aliran Sekunder Pada NACA0015 AoA 16°**



**Lampiran 37 A Topologi Aliran Sekunder Lower Side Pada**  
**9C7/22.5C50**



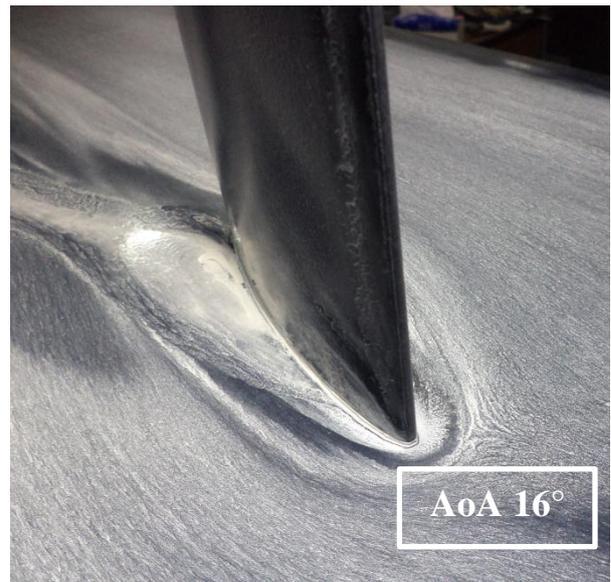
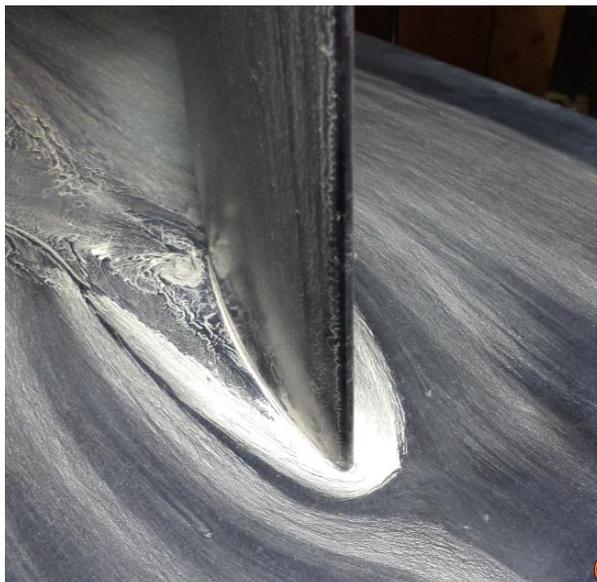
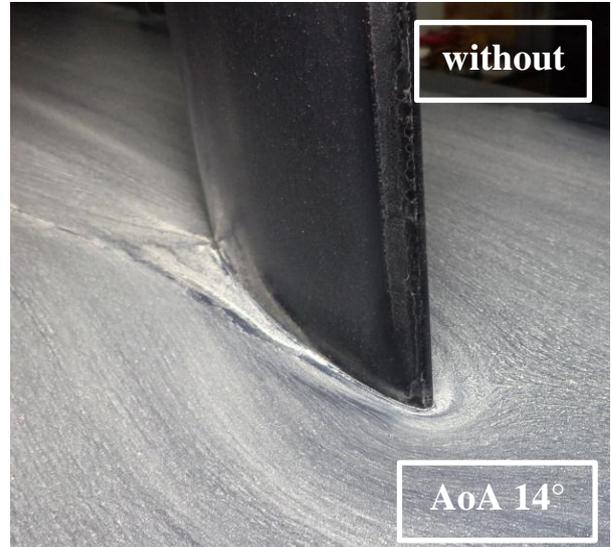
**Lampiran 37 B Topologi Aliran Sekunder Lower Side Pada**  
**9C7/22.5C50**



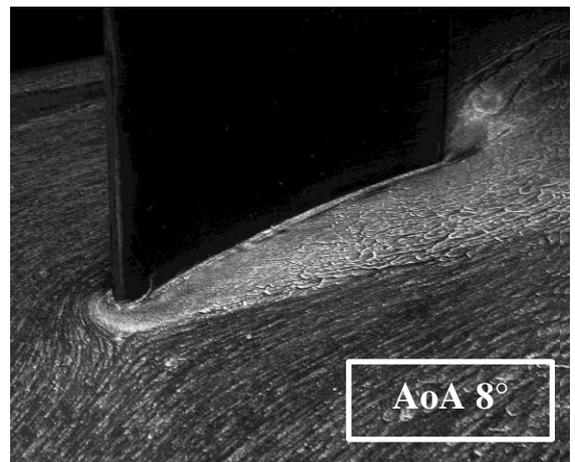
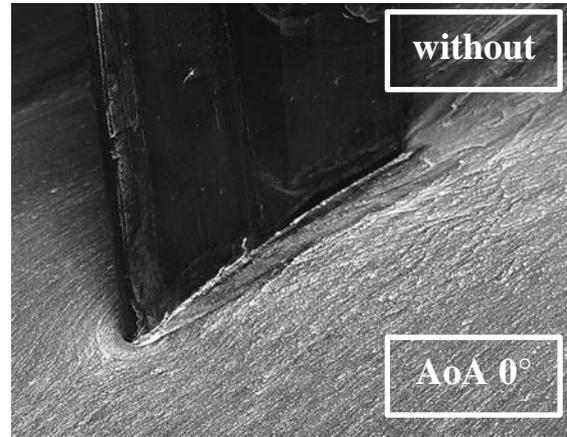
**Lampiran 38 A Topologi Aliran Upper Side Pada 9C7/22.5C50**



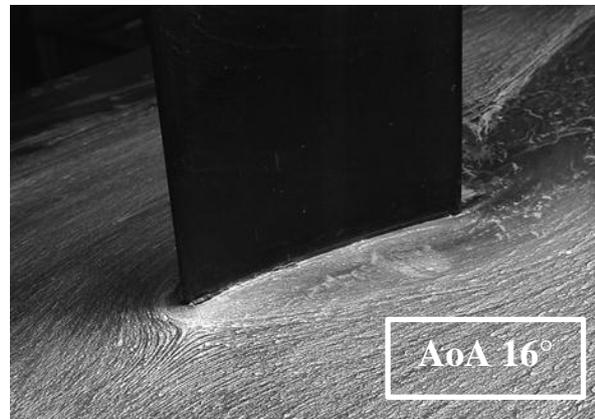
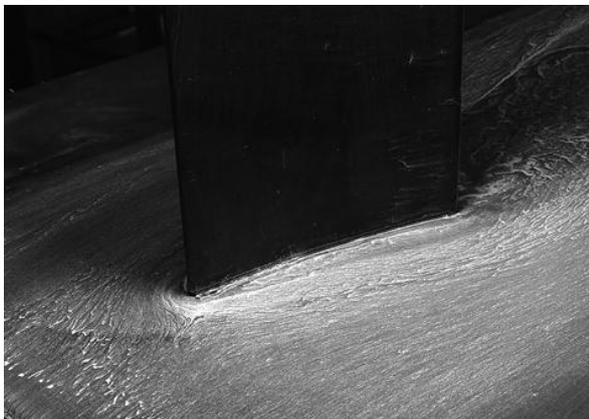
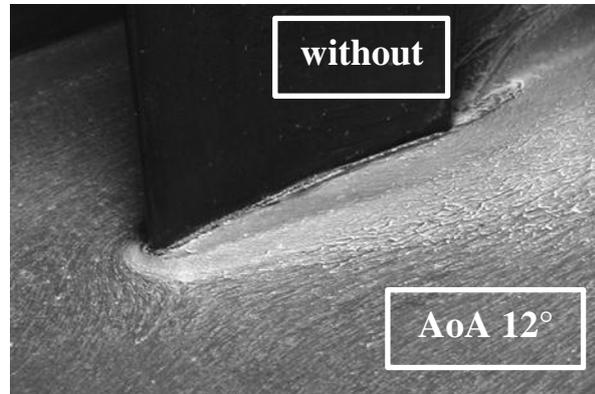
**Lampiran 38 B Topologi Aliran Sekunder Upper Side Pada**  
**9C7/22.5C50**



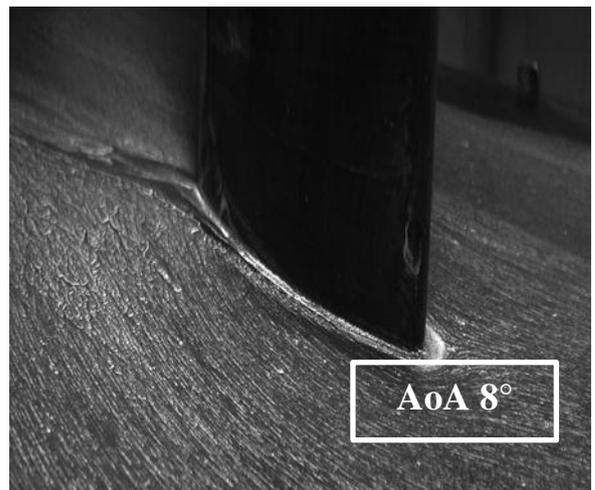
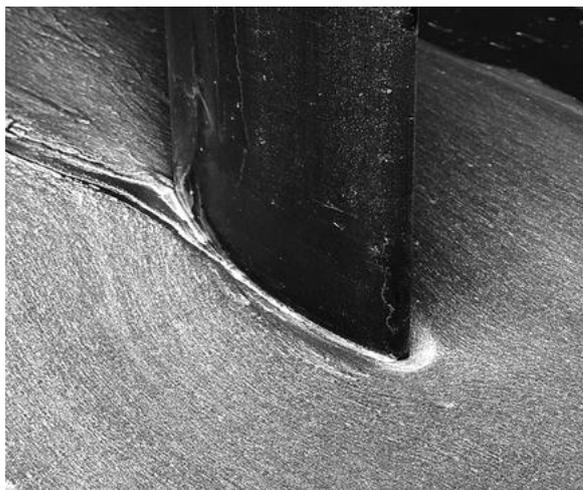
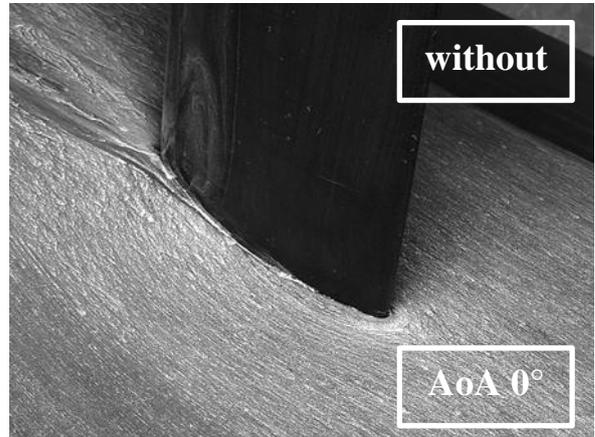
**Lampiran 39 A Topologi Aliran Sekunder Lower Side Pada**  
**9C7/32.5C50**



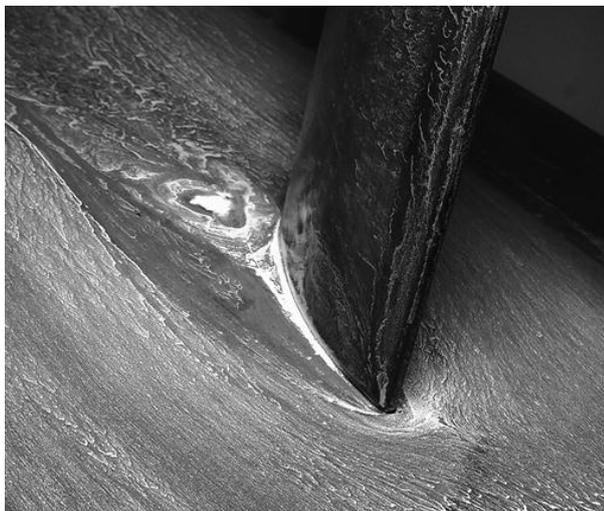
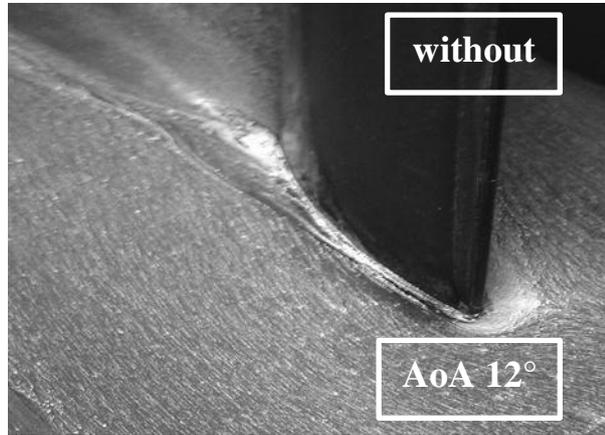
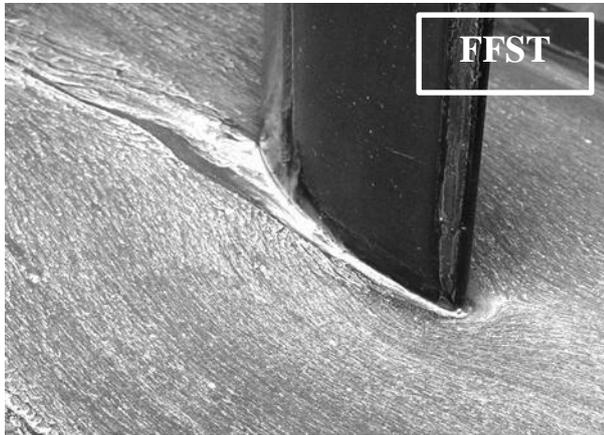
**Lampiran 39 B Topologi Aliran Sekunder Lower Side Pada**  
**9C7/32.5C50**



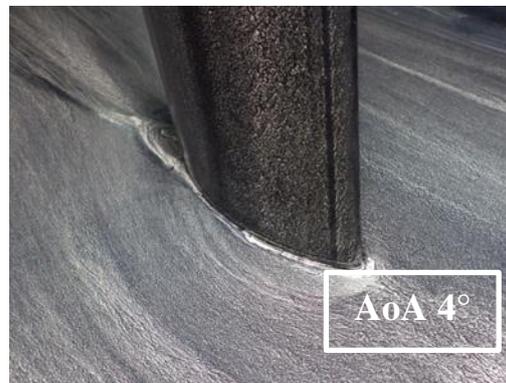
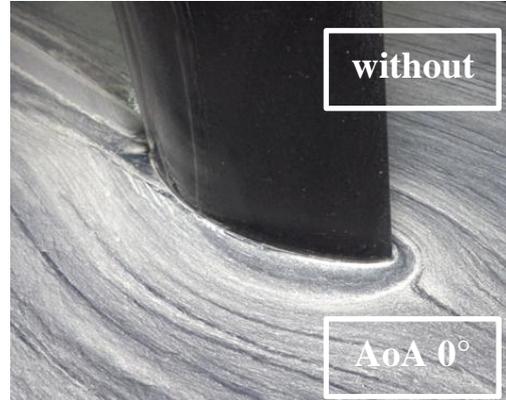
**Lampiran 40 A Topologi Aliran Sekunder Upper Side Pada**  
**9C7/32.5C50**



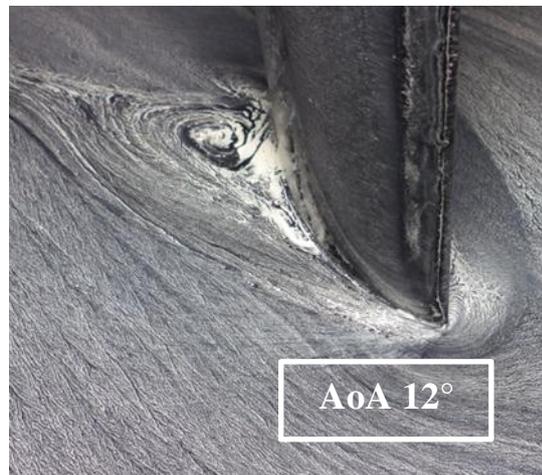
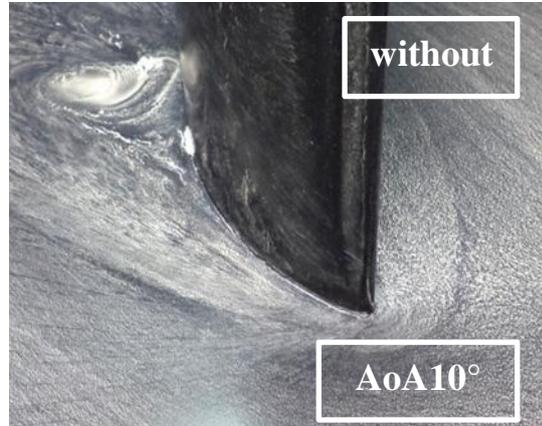
**Lampiran 40 B Topologi Aliran Sekunder Upper Side Pada**  
**9C7/32.5C50**



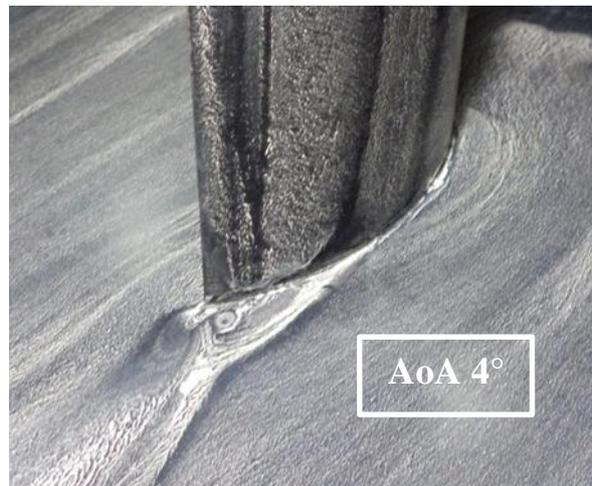
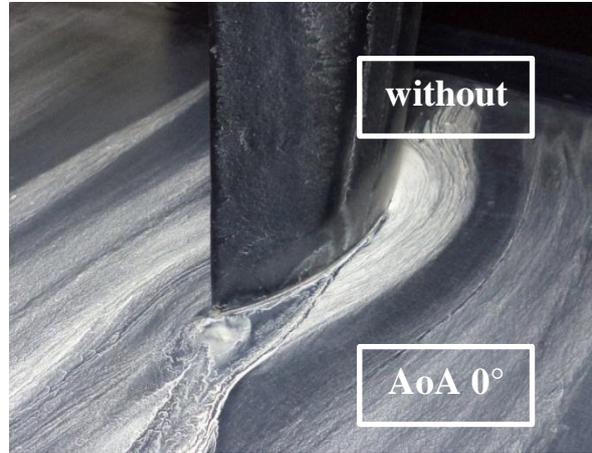
**Lampiran 41 A Topologi Aliran Sekunder Upper Side Pada**  
**9C7/42.5C50**



**Lampiran 41 B Topologi Aliran Sekunder Upper Side Pada**  
**9C7/42.5C50**



**Lampiran 42 A Topologi Aliran Sekunder Downstream Pada 9C7/42.5C50**



**Lampiran 42 B Topologi Aliran Sekunder Downstream Pada**  
**9C7/42.5C50**

