

TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK SEPARATION BUBBLE PADA ALIRAN DUA DIMENSI MELINTASI THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0,2) DENGAN PENGARUH REYNOLDS NUMBER (Ret = $5,08 \times 10^4$ DAN Ret = $8,46 \times 10^4$) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6,5 DAN c/t = 10)

CHOLIFATUS EKA RAHAYU NRP. 02111640000010

Dosen Pembimbing: Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK SEPARATION BUBBLE PADA ALIRAN DUA DIMENSI MELINTASI THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0,2) DENGAN PENGARUH REYNOLDS NUMBER (Ret = 5,08×10⁴ DAN Ret = 8,46×10⁴) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6,5 DAN c/t = 10)

CHOLIFATUS EKA RAHAYU NRP. 02111640000010

Dosen Pembimbing: Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2020 "Halaman ini sengaja dikosongkan"



FINAL PROJECT - TM184835

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF TWO-DIMENSIONAL FLOWS AND SEPARATION BUBBLE CHARACTERISTICS ALONG THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0.2) WITH THE EFFECT OF REYNOLDS NUMBER ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ AND $Re_t = 8.46 \times 10^4$) AND AXIAL LENGTH (c/t = 6.5 AND c/t = 10)

CHOLIFATUS EKA RAHAYU NRP. 02111640000010

Advisor: Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING Faculty of Industrial Technology and System Engineering Sepuluh Nopember Institute of Technology Surabaya 2020 "Halaman ini sengaja dikosongkan"

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK SEPARATION BUBBLE PADA ALIRAN DUA DIMENSI MELINTASI THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0,2) DENGAN PENGARUH REYNOLDS NUMBER (Ret = 5,08×10⁴ DAN Ret = 8,46×10⁴) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6.5 DAN c/t = 10)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember

> Oleh: Cholifatus Eka Rahavu NRP. 02111640000010



"Halaman ini sengaja dikosongkan"

$\begin{array}{l} \textbf{STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK} \\ \textbf{SEPARATION BUBBLE PADA ALIRAN DUA DIMENSI} \\ \textbf{MELINTASI THICK PLATE - ROUNDED LEADING EDGE} \\ \textbf{(r/t = 0,2) DENGAN PENGARUH REYNOLDS NUMBER} \\ \textbf{(Re}_t = 5,08 \times 10^4 \text{ dan Re}_t = 8,46 \times 10^4 \text{) DAN PANJANG} \\ \textbf{AKSIAL (c/t = 6,5 DAN c/t = 10)} \end{array}$

Nama mahasiswa	: Cholifatus Eka Rahayu
NRP	: 02111640000010
Departemen	: Teknik Mesin – FTIRS
Dosen Pembimbing	: Prof. Dr.Ing. Herman Sasongko

Abstrak

Berbagai penelitian untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar pada kendaraan terus dilakukan. Salah satu faktor konsumsi bahan bakar kendaraan adalah pada sisi desain aerodinamika kendaraan itu sendiri yang menentukan besar kecilnya drag force. Beberapa cara dalam menurunkan drag force diantaranya dengan mekanisme *flow control* yang dapat berupa active dan passive flow control yang membantu mencegah separasi bubble Fenomena terbentuknya separation dapat aliran. dimanfaatkan untuk menunda terjadinya separasi aliran permanen di daerah buritan. Penambahan panjang bidang tumpu aliran dapat juga dimaknai sebagai upaya memperbesar jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang diduga dapat mempermudah proses *reattachment* aliran yang terseparasi setelah *leading edge*.

Penelitian mengenai dugaan tersebut dilakukan secara analisa 2 dimensi melalui eksperimen dengan *wind tunnel* dan numerik dengan *Ansys (Fluent)* 19.1 dengan membandingkan model turbulen k- Ω SST dengan Transition k-kl- ω untuk mengetahui model yang paling tepat dalam menganalisa kasus ini. Benda uji yang digunakan berupa *thick plate-rounded leading* *edge* (r/t = 0,2) serta variasi panjang aksial c/t = 6,5 dan c/t = 10 dengan pengaruh *Reynolds number* $\text{Re}_t = 5,08 \times 10^4$ dan $\text{Re}_t = 8,46 \times 10^4$. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisa karakteristik *separation bubble* (tebal, panjang dan sudut), koefisien tekanan, profil kecepatan, *turbulent kinetic energy* dan *shape factor* serta titik *reattachment* dan *massive separation* di daerah buritan.

Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini adalah variasi Reynolds number dan panjang bidang tumpu aliran dapat mempengaruhi karakteristik separation bubble yang terbentuk. memperpanjang Sedangkan dengan bidang tumpu dan memperbesar Reynolds number akan mempercepat terjadinya reattachment dengan membentuk separation bubble yang lebih pendek. Dengan demikian aliran dapat lebih cepat bertransisi dari laminar ke turbulen yang mana akan menambah momentum aliran untuk melawan *adverse pressure*, yang kemudian dapat menunda separasi massif di buritan. Secara umum variasi panjang bidang tumpu aliran (c/t = 6.5 dan c/t = 10) memberikan pengaruh yang lebih signifikan dalam penundaan separasi massif di daerah buritan daripada variasi bilangan Reynolds ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t =$ $8,46 \times 10^4$).

Kata kunci: boundary layer transition, separation bubble, massive separation

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF TWO-DIMENSIONAL FLOWS AND SEPARATION BUBBLE CHARACTERISTIC ALONG THICK PLATE - ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0.2) WITH THE EFFECT OF REYNOLDS NUMBER ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ AND $Re_t = 8.46 \times 10^4$) AND AXIAL LENGTH (c/t = 6.5 AND c/t = 10)

Student name	: Cholifatus Eka Rahayu
NRP	: 02111640000010
Major	: Teknik Mesin – FTIRS
Supervisor	: Prof. DrIng. Herman Sasongko

Abstract

Various studies to improve the efficiency of fuel consumption in vehicles continue to be done. One of the factors of vehicle fuel consumption is on the aerodynamic design of the vehicle itself which determines the magnitude of the drag force. Some ways to reduce drag force include flow control mechanisms such as active and passive flow control. which helps to prevent flow separation. The phenomenon of the formation of bubble separation can be utilized to delay the occurrence of permanent flow separation on the downstream. The addition of the length of the fulcrum field can also be interpreted as an effort to enlarge the distance between the two potential points of the front and back separations allegedly can facilitate the process of reattachment of the after the leading edge.

This research was carried out in 2-dimensional analytics through experiments with wind tunnels and numerically with Ansys (Fluent) 18.1. The specimens used were thick plate - rounded leading-edge r/t = 0.2 and axial length c/t = 6.5 and c/t = 10. This research was conducted by analysing the characteristics of separation bubble (thickness, length, and angle), pressure coefficient, velocity profile, turbulent kinetic energy, and shape factor also reattachment point and massive separation at downstream.

The results obtained are the variation of the Reynolds number and axial length affect the characteristics of the separation bubble. By elongation of the axial length and increasement od Reynolds number will accelerate the reattachment by forming shorter separation bubble. This phenomenon causes the acceleration of laminar to turbulent boundary layer transition and increases the flow momentum to counter the adverse pressure, which is the massive separation at the downstream will be delayed. The variation of axial length has more significant effect on the delay of massive separation at the downstream than the variation of Reynolds number.

Keywords: boundary layer transition, separation bubble, massive separation

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, yang telah memberikan rahmat, hidayah dan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Studi Eksperimen dan Numerik Karakteristik Separation Bubble pada Aliran Dua Dimensi Melintasi Thick Plate– Rounded Leading Edge (r/t = 0,2) dengan Pengaruh Reynolds Number (Re_t = 5,08 × 10⁴ dan Re_t = 8,46 × 10⁴) dan Panjang Aksial (c/t = 6,5 dan c/t = 10)" dengan baik. Penulis menyadari dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

- 1. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan ilmu, waktu, arahan dan motivasi kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
- 2. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. selaku ketua Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS beserta seluruh dosen, tenaga pendidik dan karyawan yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama penulis berkuliah.
- 3. Keluarga tugas akhir bimbingan Bapak Herman, saudara Abdul Haris, Athalla dan Ali Wafa yang saling berbagi keluh kesah, serta memberikan bantuan dan motivasi selama penyelesaian tugas akhir ini serta senior Lab. Mekanika Fluida.
- Teman-teman LBMM 2016 (B-Nalz), Divisi Umum beserta Teknik Mesin Angkatan 2016 (M59) yang memberikan banyak bantuan dan pengalaman kepada penulis selama berproses di Departemen Teknik Mesin.

- 5. Bapak Sukarji, Ibu Yayuk Lukita Ningsih, dan Yulike beserta segenap keluarga besar yang selalu memberikan doa, motivasi dan bantuan baik moral maupun finansial kepada penulis selama ini.
- 6. Sahabat penulis, Ipeb, Betsi dan Atun yang selalu bersedia mendengarkan keluh kesah penulis dan saran-saran membangun selama ini. Serta M. Fahjrin Andriansyah yang menemani penulis selama penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, baik dalam penulisan maupun analisa yang dikemukakan. Oleh sebab itu penulis berharap kepada mahasiswa yang melakukan penelitian terkait *separation bubble* pada *thick plate-rounded leading edge* untuk menyempurnakan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberkan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Abstract	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	XV
NOMENKLATUR	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Dasar Teori	7
2.1.1 Boundary Layer	7
2.1.1.1 Boundary layer thickness	9
2.1.1.2 Displacement Thickness	10
2.1.1.3 Momentum Thickness	12
2.1.1.4 Shape factor	13
2.1.2 Separasi Aliran	14
2.1.3 Bubble Separation	15

2.2 Penelitian Terdahulu	17
2.3 Numerical Modelling	26
2.3.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)	26
2.3.2 Klasifikasi Turbulence Modelling	27
2.3.3 RANS Turbulence Modelling	29
2.3.4 Grid Independence	31
BAB III METODOLOGI	35
3.1 Konfigurasi Uji	35
3.2 Analisa Dimensi	37
3.3 Metode Eksperimen	38
3.3.1 Peralatan Eksperimen	38
3.3.2 Pengambilan Data Eksperimen	40
3.3.2.1 Proses kalibrasi <i>pressure tranducer</i> manometer	dan 40
3.3.2.2 Pengukuran tekanan statis	42
3.4 Metode Numerik	42
3.4.1 Mesh	43
3.4.2 Grid Independence	44
3.4.3 Boundary Condition	44
3.4.4 Post Processing	45
3.5 Jadwal Penelitian	46
3.6 Diagram Alir Penelitian	47
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	49

4.2 Analisa Grid Independency	. 53
4.3 Gambaran Umum Karakteristik Aliran	. 54
4.4 Analisa Karakteristik Aliran dan Separation Bubble	. 56
4.4.1. Konfigurasi c/t = 6,5 dengan Re_t = 5,08 x 10 ⁴	. 56
4.4.2. Konfigurasi c/t = 6,5 dengan $Re_t = 8,46 \times 10^4$. 61
4.4.3. Konfigurasi c/t = 10 dengan $Re_t = 5,08 \times 10^4$. 66
4.4.4. Konfigurasi c/t = 10 dengan $Re_t = 5,08 \times 10^4$.71
4.5 Analisa Perbandingan tiap Konfigurasi	.76
4.5.1. Perbandingan konfigurasi c/t = 6,5 dengan $Re_t = 5 x 10^4$ dan $Re_t = 8,46 x 10^4$,08 .77
4.5.2. Perbandingan konfigurasi $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5$ x 10^4 dan $Re_t = 8,46$ x 10^4	,08 . 80
4.5.3. Perbandingan konfigurasi $Re_t = 5,08 \times 10^4 \text{ dan c}/6,5 \text{ dan c}/t = 10$	′t = . 84
4.5.4. Perbandingan konfigurasi $\text{Re}_t = 8,46 \text{ x } 10^4 \text{ dan c/} 6,5 \text{ dan c/t} = 10$	′t = . 88
4.6 Diskusi	. 92
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	.99
5.1.Kesimpulan	. 99
5.2.Saran	100
DAFTAR PUSTAKA	101
BIODATA PENULIS	103

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Keberadaan boundary-layer (sumber: J. D. Anderson,
2005)
Gambar 2.2 Mekanisme laminar dan turbulen boundary-layer
(sumber: J. M. McDonough, 2009)
Gambar 2.3 Boundary layer thickness (Sumber: Munson, 2002)9
Gambar 2.4 Displacement thickness (sumber: J. M. McDonough,
2009)
Gambar 2.5 Momentum thickness (Sumber: Munson, 2002)12
Gambar 2.6 Separasi aliran pada sisi downstream (sumber: J. D.
Anderson, 2005)
Gambar 2.7 Proses terbentuknya bubble (sumber: J. M.
McDonough, 2009)16
Gambar 2.8 Variasi geometri bulge dan Reynolds Number
(sumber: Mollicone et al, 2017)17
Gambar 2.9 Kontur tekanan statis aliran (sumber: Mollicone et al,
2017)
Gambar 2.10 Grafik Cp aliran, (a) simulasi A1, B1 dan C1 (solid,
dashed, dashed-dotted, berurutan), (b) simulasi A2 dan A3 (hijau
dan merah, berurutan) (sumber: Mollicone et al, 2017)18
Gambar 2.11 Sketsa model; (a) leading edge berbentuk datar,
dengan Panjang reattachment x _R , tinggi bubble W dan Panjang
transisi x _{Tr} ; (b) <i>leading edge</i> berbentuk setengah lingkaran; (c)
leading edge berbentuk konis (sumber: Alam et al, 2018)19
Gambar 2.12 Visualisasi aliran yang melalui silinder dengan
geometri <i>nose</i> yang berbeda pada kasus $\alpha = 0^{\circ}$ (sumber: Alam et al,
2018)20
Gambar 2.13 Pengaruh angle of attack terhadap Cp pada geometri
nose (a) datar, (b) konis, dan (c) setengah lingkaran(sumber: Alam
et al, 2018)21

Gambar 2.14 Skema model konfigurasi aliran (sumber: Gambar 2.15 Perbandingan profil bubble separation pada body 2 dimensi dan 3 dimensi (sumber: Lamballais et al, 2009)......22 Gambar 2.16 Perbandingan profil kecepatan pada body 2 dimensi (kanan) dan 3 dimensi (kiri) (sumber: Lamballais et al, 2009) ...23 Gambar 2.17 Perbandingan (a) panjang recirculation, (b) tinggi bubble separation, (c) sudut bubble separation pada body 2 dimensi dan 3 dimensi (sumber: Lamballais et al. 2009)......24 **Gambar 2.18** Konvigurasi benda uji (a) a/t=0.2; (b) a/t=0.5; (c) a/t=1 (sumber: Erlangga, 2009).....25 Gambar 2.19 Diagram simulasi dengan CFD (sumber: Versteeg dan Malalasekera)......27 Gambar 2.20 Karakteristik Eddy dalam turbulensi (sumber: Gambar 2.21 Energy Cascade antara Large Eddy dengan Small Eddy (sumber: Versteeg dan Malalasekera)......28 Gambar 2.22 Pendekatan Turbulence Modeling (sumber: Gambar 2.23 Pendekatan Turbulence Modeling (sumber: Gambar 3.6 Skema validasi manometer value dengan nilai Gambar 3.7 Model meshing thick plate-rounded leading edge Gambar 3.8 Penentuan parameter boundary condition......45

Gambar 3.11 Diagram alir metode penelitian47
Gambar 4.1 (a) Perbandingan Grafik koefisien tekanan model k-
Ω SST dan eksperimen (b) Perbandingan Grafik koefisien tekanan
model k - kl - ω dan eksperimen
Gambar 4.2 Grafik perbandingan koefisien tekanan pada c/t 10
dengan Re _t 8,46 x 10 ⁴ hasil eksperimen dan numerik (k-kl- ω) 50
Gambar 4.3 Grafik perbandingan koefisien tekanan pada c/t 6,5
dengan Re _t 5,08 x 10 ⁴ hasil eksperimen dan numerik (k-kl- ω) 51
Gambar 4.4 Grafik perbandingan koefisien tekanan pada c/t 6,5
dengan Ret 8,46 x 10 ⁴ hasil eksperimen dan numerik (k-kl- ω) 51
Gambar 4.5 Titik pengamatan profil kecepatan
Gambar 4.6 Profil kecepatan model k - Ω SST dan k - kl - ω
Gambar 4.7 Kontur tekanan pada semua konfigurasi54
Gambar 4.8 Kontur kecepatan dan streamline pada semua
konfigurasi55
Gambar 4.9 Kontur kecepatan dan streamline pada separation
bubble
Gambar 4.10 Kontur kecepatan dan streamline pada massive
separation56
Gambar 4.11 Grafik koefisien tekanan c/t 6,5 dan 5,08x10 ⁴ 57
Gambar 4.12 Profil kecepatan c/t 6,5 dan 5,08x10 ⁴ 58
Gambar 4.13 Turbulent kinetic Energy c/t 6,5 dan 5,08 x 10 ⁴ 59
Gambar 4.14 Vektor kecepatan pada c/t 6,5 dengan 5,08x10 ⁴ 60
Gambar 4.15 Grafik koefisien tekanan c/t 6,5 dan 8,46x10 ⁴ 62
Gambar 4.16 Profil kecepatan pada c/t 6,5 dan 8,46x10 ⁴ 63
Gambar 4.17 Turbulent kinetic Energy c/t 6,5 dan 8,46 x 10 ⁴ 64
Gambar 4.18 Vektor kecepatan pada c/t 6,5 dan 8,46x10 ⁴ 65
Gambar 4.19 Grafik koefisien tekanan c/t 10 dan Re_t 5,08x10 ⁴ 67
Gambar 4.20 Profil kecepatan pada c/t 10 dan Ret 5,08x10 ⁴ 68
Gambar 4.21 Turbulent kinetic Energy c/t 10 dan Re _t 5,08x10 ⁴ 69
Gambar 4.22 Vektor kecepatan pada c/t 10 dan $Re_t 5,08 \times 10^4 \dots 70$
Gambar 4.23 Grafik koefisien tekanan c/t 10 dan Re ₁ 8,46x10 ⁴ 72
Gambar 4.24 Profil kecepatan c/t 10 dengan Re_t 8,46x10 ⁴ 73

Gambar 4.25	<i>Turbulent kinetic Energy</i> c/t 10 dan <i>Ret</i> 8,46x10 ⁴ 7	74
Gambar 4.26	Vektor kecepatan c/t 10 dengan Re_t 8,46x10 ⁴ 7	75
Gambar 4.27	Grafik koefisien tekanan pada c/t 6,5	77
Gambar 4.28	Profil kecepatan pada c/t 10	79
Gambar 4.29	Turbulent kinetic Energy pada c/t 10	79
Gambar 4.30	Grafik koefisien tekanan pada c/t 10	31
Gambar 4.31	Profil kecepatan pada c/t 10	33
Gambar 4.32	Turbulent kinetic Energy pada c/t 10	33
Gambar 4.33	Grafik koefisien tekanan pada Ret 5,08 x 10 ⁴ 8	35
Gambar 4.34	Profil kecepatan pada Ret 5,08 x 10 ⁴	37
Gambar 4.35	Turbulent kinetic Energy pada Ret 5,08 x 10 ⁴ 8	37
Gambar 4.36	Grafik koefisien tekanan pada Ret 8,46 x 10 ⁴ 8	39
Gambar 4.37	Profil kecepatan pada Ret 8,46 x 10 ⁴	91
Gambar 4.38	Turbulent kinetic energy pada Ret 8,46x10 ⁴	91
Gambar 4.39	Grafik koefisien tekanan pada semua konfigurasis	93
Gambar 4.40	Profil kecepatan pada semua konfigurasi9	94
Gambar 4.41	Turbulent kinetic Energy semua konfigurasi9	94

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Analisis grid independensi dengan koefisien drag o	dan
koefisien lift	.32
Tabel 3.1 Konfigurasi uji	.36
Tabel 3.2 Mesh Quality	.44
Tabel 3.3 Jadwal penelitian	.46
Tabel 4.1 Grid independency pada c/t 6,5	.53
Tabel 4.2 Grid independency pada c/t 10	.53
Tabel 4.3 Karakteristik Bubble pada c/t 6,5 $Re_t = 5,08 \times 10^4$.61
Tabel 4.4 <i>Shape factor</i> pada c/t 6,5 $Re_t = 5,08 \times 10^4$.61
Tabel 4.5 Karakteristik <i>Bubble c/t</i> 6,5 $Re_t = 8,46 \ge 10^4$.66
Tabel 4.6 <i>Shape factor</i> pada c/t 6,5 $Re_t = 8,46 \ge 10^4$.66
Tabel 4.7 Karakteristik Bubble c/t 10 dengan Re_t 5,08 x 10 ⁴	.71
Tabel 4.8 Shape factor pada c/t 10 dengan Re_t 5,08 x 10 ⁴	.71
Tabel 4.9 Karakteristik Bubble c/t 10 dengan Re_t 8,46 x 10 ⁴	.76
Tabel 4.10 <i>Shape factor</i> pada c/t 10 $Re_t = 8,46 \ge 10^4$.76
Tabel 4.11 Karakteristik Bubble c/t 6,5	.80
Tabel 4.12 Shape factor pada c/t 6,5	.80
Tabel 4.13 Karakteristik Bubble c/t 10	.84
Tabel 4.14 Shape factor pada c/t 10	.84
Tabel 4.15 Karakteristik Bubble $Re_t = 5.08 \times 10^4$.88
Tabel 4.16 <i>Shape factor</i> pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$.88
Tabel 4.17 Karakteristik Bubble $Re_t = 8,46 \times 10^4$.92
Tabel 4.18 <i>Shape factor</i> pada $Re_t = 8,46 \times 10^4$.92
Tabel 4.19 Karakteristik bubble semua konfigurasi	.95
Tabel 4.20 Shape factor pada semua konfigurasi	.95
Tabel 4.21 Perbandingan dengan penelitian lain pada c/t 6,5	.96
Tabel 4.22 Perbandingan r dengan penelitian lain pada c/t 10	.96
Tabel 4.23 Perbandingan karakteristik separation bubble den	gan
penelitian lain $(r/t = 0, 1)$.96

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

NOMENKLATUR

b	:	jarak antar <i>wall pressure tap</i> (mm)
c	:	panjang <i>chord</i> (mm)
c/t	:	rasio panjang chord terhadap tebal body
C _P	:	koefisien tekanan
d	:	diameter wall pressure tap (mm)
1	:	panjang <i>trailing edge</i> (mm)
l/t	:	rasio panjang <i>trailing edge</i> terhadap tebal <i>body</i>
L	:	panjang bidang tumpu aliran (mm)
L/t	:	rasio panjang bidang tumpu aliran terhadap tebal
		body
r	:	jari-jari <i>leading edge</i> (mm)
r/t	:	rasio besar rounded terhadap tebal body
Re	:	bilangan Reynolds
Re_t	:	bilangan Reynolds terhadap tebal body
S	:	panjang <i>span</i> /lebar <i>body</i> (mm)
t	:	tebal <i>body</i> (mm)
и	:	kecepatan lokal (m/s)
U	:	kecepatan maksimal (m/s)
v	:	tegangan (v)
V	:	kecepatan <i>blower</i> (m/s)
Х	:	titik/posisi lokal (mm)
x/c	:	rasio posisi lokal terhadap panjang chord
Δh	:	perbedaan ketinggian (mm)
δ	:	tebal boundary layer
δ^*	:	displacement thickness
θ	:	momentum thickness

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

penelitian untuk meningkatkan Sejumlah efisiensi penggunaan bahan bakar pada kendaraan terus dilakukan, salah satunya dengan cara menurunkan gaya drag dan optimasi desain bentuk kendaraan. Usaha yang perlu dilakukan adalah dengan mekanisme flow control yang membantu memperhatikan mencegah separasi aliran. Mekanisme flow control tersebut dapat berupa aktif atau pasif. Active flow control bekerja dengan menggunakan aktuator yang mengkonsumsi daya dari kendaraan, seperti penambahan komponen bergerak (rotating cylinder) atau lubang (cekungan) pada permukaan kendaraan. membuat Sementara passive flow control dapat berupa modifikasi geometri pada *body* kendaraan atau penambahan perangkat statis tambahan. Sistem passive flow control ini dinilai dapat memberikan keuntungan yang lebih signifikan dibanding active flow control, sebab hanya membutuhkan sedikit biaya dan tidak mengkonsumsi energi dari kendaraan, Mukut dan Abedin [1].

Penelitian mengenai hal tersebut tidak hanya dilakukan pada kendaraan, peralatan teknis seperti rudal dan *airfoil* juga tak luput dari perhatian terutama mengenai *leading edge separation*. Ketika Bilangan *Reynolds*, yang berbasis pada *boundary layer thickness* melebihi nilai tertentu, maka gelembung separasi akan terbentuk. Mekanisme terbentuknya gelembung tersebut diawali dengan terjadinya separasi aliran yang kemudian kembali *attack* dan diakhiri dengan terbentuknya *turbulent boundary layer*. Fenomena tersebut diamanfaatkan untuk menunda atau pun mencegah terjadinya separasi aliran permanen di sisi buritan.

Penelitian dengan manipulasi pintas *turbulent boundary layer* melalui terbentuknya *bubble separation* antara lain dilakukan oleh **Lamballais et al [2].** Simulasi dilakukan pada *leading edge* yang melengkung secara dua dimensi dan tiga dimensi. Variasi dilakukan dengan membandingkan lebar dan tebal benda kerja serta radius kelengkungan *leading edge* dan tebal benda kerja. Hasil simulasi menunjukaan semakin kecil radius kelengkungan *leading edge* mengakibatkan semakin besarnya *separation angle*, yang selanjutnya dapat mempertebal ukuran *bubble* yang terbentuk. Dengan semakin tebalnya *bubble*, maka semakin membesar pula ukuran *bubble separation*.

Alam et al [3] melakukan penelitian dengan mengalirkan udara sejajar silinder dengan geometri ujung yang berbeda. Varisasi dilakukan dengan penggunaan bentuk tumpul, konis dan setengah lingkaran pada leading edge serta angle of attack dan Bilangan Reynolds. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa Bilangan Reynolds menentukan ukuran bubble yang terbentuk. Shear layer reattachment length (X_R) , shear layer transition leng (X_T) dan ketebalan bubble (W) menyusut seiring dengan bertambahnya Bilangan *Reynolds* hingga $Re_D = 10^4$. Untuk $Re_D >$ 10^4 , variasi pada X_R dan W tidak terlalu signifikan, tetapi faktor X_T tetap mengalami penyusutan. Untuk nilai Re_D yang sama, X_R dan W mengalami penyusutan secara berurutan dari yang terbesar dengan bentuk tumpul, konis dan setengah lingkaran. Sementara pertambahan besar separation angle sejalan dengan itu penambahan panjang X_R dan W serta penyusutan X_T untuk semua variasi bentuk. Sehingga dapat dikatakan profil setengah lingkaran dapat menunda separasi lebih baik daripada geometri lainnya.

Dari sejumlah penelitian yang telah dilakukan tersebut, pengaruh dynamic force oleh Bilangan Reynolds dengan bentuk leading edge berbeda dan terkombinasi dengan panjang jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang jarang diamati. Penambahan panjang bidang tumpu aliran dapat juga dimaknai sebagai upaya memperbesar jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang, hal ini diduga dapat mempermudah proses reattachment aliran yang terseparasi setelah leading edge. Sehingga timbul gagasan untuk melakukan penelitian terkait dugaan tersebut guna mengoptimalkan penundaan separasi aliran. Penelitian dilakukan melalui simulasi dan divalidasi dengan eksperimen pada wind tunnel.

1.2 Rumusan Masalah

Saat Bilangan *Reynolds* fluida yang melalui *body*, yang berbasis pada *boundary layer thickness*, melebihi nilai tertentu, *bubble separation* akan terbentuk. Mekanisme terbentuknya *bubble* tersebut diawali dengan terjadinya separasi aliran yang kemudian kembali *attack* dan diakhiri dengan terbentuknya *turbulent boundary layer*. Kesempatan aliran untuk kembali *reattach* sendiri dipengaruhi oleh adanya *entrainment energy* yang didapatkan dari *primary flow* serta adanya bidang tumpu di belakang yang cukup panjang. Apabila *entrainment energy* terlalu kecil, maka aliran yang terseparasi tidak akan *reattach*. Namun apabila *entrainment energy* terlalu besar, maka aka nada kemungkinan terjadinya separasi aliran secara *massive* setelah melalui *leading edge*. Dengan demikian dibutuhkan kombinasi yang tepat antara Bilangan Reynolds dengan bentuk *leading edge* tertentu agar terjadi reattachment.

Adanya *bubble separation* menyebabkan terjadinya transisi pintas dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Karena *turbulent boundary layer* terbentuk lebih cepat, maka kecepatan aliran fluida di dekat permukaan nilainya akan semakin besar. Akibat yang ditimbulkan dari penambahan kecepatan tersebut turut memperbesar energi kinetik dan momentum fluida sehingga fluida dapat melawan *adverse pressure* dan *shear stress*. Sebagai konsekuensi, titik separasi pada *upper surface* tertunda lebih ke belakang yang selanjutnya akan memperkecil daerah *wake* yang ditimbulkan. Penambahan panjang bidang tumpu aliran di belakang *leading edge* diduga dapat mempermudah proses *reattachment* aliran terseparasi sehingga akan menunda separasi *massive* di belakangnya

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik aliran dua dimensi pada *thick* plate-rounded leading edge dengan pengaruh Reynolds Number ($Re_t = 5,08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8,46 \times 10^4$) terhadap panjang bidang tumpu aliran (c/t = 6,5 dan c/t = 10), sehingga diperoleh:

- a. *Post processing* kuantitatif yang ditinjau secara 2D *flow* berupa distribusi koefisien tekanan, profil kecepatan, *turbulent kinetic energy* dari hasil numerik.
- b. *Post processing* kualitatif berupa visualisasi aliran meliputi tampilan kontur kecepatan dan kontur tekanan statis, tampilan *streamline*, tampilan vektor kecepatan, profil kecepatan dan tampilan profil *bubble separation* dengan perangkat lunak *ANSYS* (*Fluent*) 19.1.
- 2. Mengetahui karakteristik *separation bubble* berupa panjang, tebal dan sudut *separation bubble*.
- 3. Mengetahui posisi *stagnation point dan massive separation* di daerah buritan beserta *shape factor* pada daerah tertentu.
- 4. Mengetahui konfigurasi yang paling optimal dalam menunda *massive separation* di daerah buritan.

1.4 Batasan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini akan dibatasi pada hal-hal berikut:

- 1. Penelitian menggunakan model uji *thick plate-rounded leading edge*, dimana bentuk *leading edge* dengan *rounded* 20 mm yang terkorelasi dengan panjang bidang tumpu aliran sepanjang 650 mm dan 1000 mm.
- 2. Karakteristik aliran yang dikaji hanya pada bagian *upperside*
- Kajian eksperimen dilakukan pada terowongan angin dan dipertegas melalui pemodelan numerik (CFD) menggunakan perangkat lunak ANSYS (Fluent) 19.1 dengan model turbulen k-Ω SST dan Transition k-kl-ω.

- 4. Fluida kerja yang digunakan adalah udara, dengan sifat aliran pada *upstream* adalah *steady flow*, *incompressible viscous flow*, *uniform*, dan tanpa *heat transfer*.
- Kondisi *freestresm velocity* sebesar 7,5 m/s atau *Reynolds* number sebesar 5,08×10⁴ dan 12,5 m/s atau *Reynolds* Number sebesar 8,46×10⁴, density sebesar 1,225 kg/m², dan absolut viscosity sebesar 1,81×10⁻⁵N s/m².
- 6. Kekasaran permukaan sepanjang *thick plate-rounded leading edge* diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan membawa manfaat yaitu:

- 1. Mampu memahami, menjelaskan, dan membandingkan karakteristik *separation bubble* pada aliran dua dimensi yang melalui *thick plate-rounded leading edge* dengan pengaruh *Reynolds Number* ($Re_t = 5,08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8,46 \times 10^4$) terhadap panjang bidang tumpu aliran (c/t = 6,5 dan c/t = 10) yang ditinjau secara analisa eksperimen maupun numerik.
- 2. Mengetahui fenomena aliran secara fisis dan karakteristik *separation bubble* dari analisa numerik disekitar *thick plate-rounded leading edge* melalui visualisasi aliran dengan perangkat lunak *ANSYS* (*Fluent*) 19.1 akibat pengaruh *Reynolds number* ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$) dan panjang bidang tumpu aliran (c/t = 6.5 dan c/t = 10).

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan metode penulisan sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bagian ini diuraikan latar belakang pemilihan judul permasalahan dan batasan masalah serta tujuan dilakukannya penelitian.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini membahas hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan terbentuknya *bubble separation* sebagai acuan terhadap hasil penelitian yang akan dilakukan.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan informasi konfigurasi uji, skema penelitian, permodelan, langkah-langkah pengujian yang disertai dengan *flow chart* baik untuk metode eksperimen maupun metode numerik.

BAB IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini diuraikan hasil dari penelitian yang dilakukan dan pengolahan dari hasil tersebut beserta dengan pembahasannya. Selanjutnya data-data tersebut akan dibandingkan dengan teor-teori yang ada dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bagian ini diuraikan kesimpulan yang dapat diambil yaitu merupakan jawaban/solusi dari permasalahan yang diangkat serta berisikan beberapa saran dari penulis untuk penelitian selanjutny

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Boundary Layer

Teori mengenai boundary-layer seperti vang dikemukakan oleh Tani [5] dan didukung oleh Anderson [6] dimulai dengan paper oleh Ludwig Prandtl yang berjudul "On the motion of a fluid with very small viscosity". Dalam papernya Prandtl lebih banyak menyebut mengenai transition layer (*Übergangsschicht*), penyebutan boundary-layer (Grenzschicht) baru dipopulerkan oleh Blasius seperti pada gambar 2.1. Dalam teorinya, Prandtl menyebutkan bahwa efek dari gesekan (tegangan geser) menyebabkan partikel fluida yang berbatasan langsung dengan permukaan terhambat menempel ke permukaan tersebut. Dengan kata lain Prandtl mengasumsikan kondisi no-slip terhadap permukaan. Efek gesekan tersebut hanya dialami oleh fluida di dalam lapisan batas (boundary-layer), yang berupa daerah tipis di dekat permukaan. Sedangkan fluida di luar daerah tersebut berupa inviscid flow.



Gambar 2.1 Keberadaan *boundary-layer* (sumber: J. D. Anderson, 2005)

Proses fisik di dalam *boundary-layer* antara fluida dan permukaan padat dapat diperoleh dengan hipotesis mengenai sifat adhesi antara fluida dan permukaan, dengan kata lain kecepatan relative antara fluida dan permukaan dianggap nol. Jika viskositas fluida sangat kecil dan dengan jalur laluan yang pendek, kecepatan fluida akan kembali normal pada jarak yang sangat dekat dengan dinding. Pada *transition layer* yang tipis, perubahan gradien kecepatan yang besar, meskipun dengan koefisien gesekan yang kecil, akan memberikan hasil yang nyata, yang mana sebanding dengan besar gaya inersia, ketika ketebalan dari *transition layer* proporsional terhadap akar kuadrat dari viskositas kinematik. Dengan demikian efek viskositas hanya akan berpengaruh di dalam lapisan tipis *transition layer* yang disebut dengan *boundary-layer*. Teori Prandtl tersebut diilustrasikan dalam gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mekanisme laminar dan turbulen *boundarylayer* (sumber: J. M. McDonough, 2009)

Pada lapisan batas tersebut terjadi perubahan kecepatan dari nol tepat di permukaan dinding hingga mencapai kecepatan normal (U) pada jarak δ . Lapisan batas dibedakan menjadi dua, yaitu laminar dan turbulen sesuai dengan besarnya bilangan *Reynolds*-nya. Proses peralihan dari laminar ke turbulen disebut dengan keadaan transisi. Faktor yang mempengaruhi lamanya transisi adalah gradient tekanan, kekasaran permukaan, gaya bodi dan gangguan aliran bebas. Ketika *boundary-layer*

menebal, ketidakstabilan pun terjadi dan mengakibatkan percampuran partikel dan perubahan momentum dalam fluida hingga terbentuknya *turbulent boundary-layer*. Pada lapisan batas turbulen, profil kecepatan yang terbentuk lebih tebal dengan gradien kecepatan di permukaan dan tegangan geser yang lebih tinggi daripada kondisi laminar maupun transisi.

2.1.1.1 Boundary layer thickness

Boundary layer thickness, δ , yang diilustrasikan pada gambar 2.3 adalah jarak normal dinding dengan suatu titik dimana kecepatan aliran telah mencapai kecepatan assymtotic, u_e . Sebelum dikembangkannya moment method, boundary layer thickness didefinisikan secara matematis melalui y_{99} , dilambangkan dengan δ_{99} dalam bentuk

$$u(x, y_{99}) = 0,99u_e(x)$$



Gambar 2.3 Boundary layer thickness (Sumber: Munson, 2002)

Untuk *laminar boundary layer thickness* yang mengalir di sepanjang pelat datar yang berperilaku sesuai dengan kondisi *Blasius solution*, δ_{99} didekati dengan

$$\delta_{99}(x) \approx 5.0 \sqrt{\frac{vx}{u_0}} = 5.0 \frac{x}{\sqrt{Re_x}}$$

Dimana $u_e \approx u_0$ konstan, dan dimana Re_x adalah Reynolds number u_0 adalah freestream velocity u_e adalah asymptotic velocity x adalah jarak jilir dari awal *boundary layer* v adalah kinematic viscosity

Sementara untuk *turbulent boundary layer thickness* di sepanjang saluran pelat datar, δ , didekati diberikan oleh

$$\delta(x) \approx 0.37 \frac{x}{Re_x^{1/5}}$$

Persamaan *turbulent boundary layer thickness* di atas mengasumsikan 1) aliran turbulen sejak awal *boundary layer*, dan 2) *turbulent boundary layer* berperilaku secara geometris, yaitu profil kecepatan secara geometris serupa di sepanjang aliran *x*-direction, yang membedakan hanya dengan skala parameter di dalam y dan u(x,y).

2.1.1.2 Displacement Thickness

Displacement thickness, δ_1 atau δ^* , seperti pada gambar 2.4 adalah jarak normal antara bidang referensi yang mewakili sisi bawah dari *inviscid fluid* dengan *uniform velocity u*_e yang memiliki laju aliran yang sama seperti pada fluida di *boundary layer*.
Displacement thickness pada aliran kompresibel yang berdasar mass flow rate didefinisikan sebagai



Gambar 2.4 Displacement thickness (sumber: J. M. McDonough, 2009)

$$\delta^*(x) = \int_0^{H/2} \left(1 - \frac{\rho(x, y)u(x, y)}{\rho_e u_e(x)} \right) dy$$

Sedangkan untuk aliran inkompresibel, densitas $\rho(x, y)$ bernilai konstan, sehingga definisi di atas menjadi

$$\delta^{*}(x) = \int_{0}^{H/2} \left(1 - \frac{u(x, y)}{u_{e}(x)} \right) dy$$

Untuk *turbulent boundary layer*, perhitungan didasarkan pada *time average density and velocity*. Sementara untuk *laminar boundary layer* yang melalui pelat datar, berlaku *Blasius solution*, sehingga persamaan menjadi

$$\delta^*(x) \approx 1.72 \sqrt{\frac{vx}{u_0}}$$

Dimana $u_e \approx u_0$ konstan.

Displacement thickness tidak memiliki hubungan langsung dengan boundary layer thickness, tetapi dapat didekati dengan $\delta^* \approx \delta/3$.

2.1.1.3 Momentum Thickness

Momentum thickness, δ_2 atau θ , pada gambar 2.5 adalah jarak normal antara bidang referensi yang mewakili sisi bawah dari *inviscid fluid* dengan *uniform velocity* u_e yang memiliki *momentum flow rate* yang sama seperti pada fluida di *boundary layer*.



Gambar 2.5 Momentum thickness (Sumber: Munson, 2002)

Momentum thickness pada aliran kompresibel yang berdasar mass flow rate didefinisikan sebagai

$$\theta(x) = \int_0^{H/2} \frac{\rho(x, y)u(x, y)}{\rho_0 u_e(x)} \left(1 - \frac{u(x, y)}{u_e(x)}\right) dy$$

Sedangkan untuk aliran inkompresibel, densitas $\rho(x, y)$ bernilai konstan, sehingga definisi di atas menjadi

$$\theta(x) = \int_0^{H/2} \frac{u(x, y)}{u_e(x)} \left(1 - \frac{u(x, y)}{u_e(x)} \right) dy$$

Untuk *turbulent boundary layer*, perhitungan didasarkan pada *time average density and velocity*. Sementara untuk *laminar boundary layer* yang melalui

pelat datar, berlaku *Blasius solution*, sehingga persamaan menjadi

$$\theta(x) \approx 0,664 \sqrt{\frac{vx}{u_0}}$$

Dimana $u_e \approx u_0$ konstan.

Momentum thickness tidak memiliki hubungan langsung dengan boundary layer thickness, tetapi dapat didekati dengan $\delta_1 \approx \delta/6$

2.1.1.4 Shape factor

Shape factor, H, adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk membedakan *laminar* dan *turbulent* flow di boundary layer. Shape factor didefinisikan sebagai

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

Dimana *H* adalah *shape factor*, δ^* adalah *displacement thickness* pada sub bab 2.1.1.2 dan θ adalah *momentum thickness* pada sub bab 2.1.1.3. *Shape factor* dengan nilai H = 2,59 (*Blassius boundary layer*) dikategorikan sebagai *laminar flow*, sementara H = 1,3 - 1,4 dikategorikan sebagai *turbulent flow* di dekat transisi *laminar-turbulent*. Sementara untuk *turbulent flow* di dekat seoarasi, $H \approx 2,7$. Nilai ini tidak bersifat mutlak untuk setiap kondisi.

Adapun data yang akan didapat dari penelitian ini berupa data diskrit dan dalam bentuk kurva, sehingga diperlukan integrasi numerik untuk mendapatkan nilai shape factor dengan menurunkan persamaan displacement thickness dan momentum thickness. Berdasarkan karakteristik data yang didapat, penggunaan metode integrasi trapezium dirasa lebih tepat. Dengan demikian akan didapatkan penurunan persamaan sebagai berikut. • Integrasi trapezium untuk displacement thickness

$$\delta^*(x) = \int_0^{H/2} \left(1 - \frac{u(x, y)}{u_e(x)}\right) dy$$
$$\delta^*(x) = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \delta \int_0^1 \left(1 - \frac{u}{U}\right) d\left(\frac{y}{\delta}\right)$$
$$\delta^* = \delta \sum_{i=1}^N \left[1 - \left(\frac{u}{U}\right)_i \Delta\left(\frac{y}{\delta}\right)_i\right]$$

• Integrasi trapezium untuk momentum thickness

$$\theta(x) = \int_{0}^{H/2} \frac{u(x, y)}{u_{e}(x)} \left(1 - \frac{u(x, y)}{u_{e}(x)}\right) dy$$
$$\theta(x) = \int_{0}^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \delta \int_{0}^{1} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) d\left(\frac{y}{\delta}\right)$$
$$\theta = \delta \sum_{i=1}^{N} \left[\left(\frac{u}{U}\right)_{i} \left\{1 - \Delta\left(\frac{y}{\delta}\right)_{i} \right\} \right]$$

Dimana:

2.1.2 Separasi Aliran

Konsep awal mengenai separasi aliran ditujukan untuk aliran dua dimensi dan *axisymmetric steady flow*. Prandtl menyatakan bahwa kondisi yang diperlukan untuk separasi aliran dari permukaan dinding adalah dengan meningkatkan tekanan pada *streamwise direction*, yang berupa *positive* (adverse) pressure gradient. Hal tersebut berlaku untuk compressible maupun incompressible flow. Secara umum, separasi aliran terjadi di bawah adverse pressure gradient dan dengan efek viskositas laminar atau turbulen. Jika salah satu diantaranya tidak terpenuhi maka separasi tidak akan terjadi. Pada suatu titik, sebagai akibat adanya adverse pressure gradient, akan terjadi reverse flow. Mekanisme terjadinya separasi aliran terdapat pada gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Separasi aliran pada sisi *downstream* (sumber: J. D. Anderson, 2005)

Ketika aliran mendekati *downstream*, ketidakstabilan aliran yang sebelumnya terjadi dan menjadi sebab terbentuknya *turbulent boundary-layer* perlahan menghilang dan mencapai kestabilan. Kondisi tersebut diakibatkan oleh cukup panjangnya bidang tumpu yang dilalui yang selanjutnya menghentikan fenomena *reverse flow*. Dengan demikian *boundary-layer* akan kembali menempel pada permukaan atau disebut dengan *reattachment* seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.6 di atas.

2.1.3 Bubble Separation

Bubble separation adalah separasi yang tidak berlanjut permanen. Selain itu bubble separation mengakibatkan terjadinya transisi pintas boundary layer dari laminar ke turbulen. Proses terbentuknya bubble separation yang diiringi dengan keadaan transisi terbentuknya turbulent boundary *layer* dimanfaatkan untuk menunda bahkan meniadakan terjadinya separasi aliran permanen di daerah buritan. Contohnya pada aliran laminar. Pada aliran laminar Proses terbentuknya *bubble separation* pada aliran laminar dijelaskan pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Proses terbentuknya *bubble* (sumber: J. M. McDonough, 2009)

Terbentukya *bubble separation* diawali dengan terpisahnya *boundary layer* laminar dari dinding. Tepi *boundary layer* terangkat dan *shear layer* laminar yang terseparasi akan berinteraksi dengan *free stream*. Aliran mendapat injeksi energi dari *free stream* yang kemudian memaksa *shear layer* untuk *reattach* pada *solid surface*. Setelah melewati *reattachment point*, aliran diperlambat lagi karena adanya gesekan dan *adverse pressure gradient* yang lebih kuat, sehingga terjadi separasi *massive*.

Daerah dibawah shear layer laminar yang merupakan downstream dari titik separasi (dimulai dari titik dimana dividing streamline meninggalkan dinding) adalah daerah tertutup berisi recirculating flow dengan kecepatan lambat. Sedangkan fluida yang didekat dinding seolah-olah diam sehingga disebut "dead-air" region. Selain itu nilai wall pressure pada daerah aliran yang terseparasi adalah konstan kecuali daerah belakang bubble dimana terjadi osilasi tekanan yang kuat. Hal ini dikarenakan pusat recirculating flow berada dekat bagian belakang *bubble*. Distribusi tekanan statis cenderung bernilai konstan selama *downstream* dari titik separasi. Hal ini dikarenakan kecepatan partikel fluida di daerah *separated flow* sangat lambat. Tekanan akan meningkat kembali setelah terjadinya *bubble separation*.

2.2 Penelitian Terdahulu

Mollicone et al [7] meneliti mengenai separasi aliran yang tonjolan disebabkan oleh (bulge) pada permukaan rata menggunakan DNS (Direct Numerical Simulation) secara 2 dimensi. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan geometri bulge seperti pada gambar 2.8 di bawah dan Reynolds Number. Hal tersebut ditujukan untuk mengetahui curvature effect dari suatu bidang planar dan besar *Revnolds Number* terhadap *recisculating* bubble di belakang bulge. Berbagai penelitian sebelumnya menyatakan bahwa timbulnya drag lebih disebabkan oleh geometri bidang daripada kontribusi gesekan. Ukuran dan posisi separation bubble sangat bergantung pada geometri bulge dan Reynolds Number. Geometri yang paling pepat memiliki recirculation region lebih besar, sedang peningkatan Reynolds Number menghasilkan recirculation bubble yang lebih kecil serta shear laver vang lebih dekat dengan permukaan.



Gambar 2.8 Variasi geometri *bulge* dan *Reynolds Number* (sumber: Mollicone et al, 2017)



Gambar 2.9 Kontur tekanan statis aliran (sumber: Mollicone et al, 2017)



Gambar 2.10 Grafik Cp aliran, (a) simulasi A1, B1 dan C1 (*solid, dashed, dashed-dotted*, berurutan), (b) simulasi A2 dan A3 (hijau dan merah, berurutan) (sumber: Mollicone et al, 2017)

Gambar 2.9 menunjukkan kontur tekanan statis untuk semua simulasi. Daerah bertekanan tinggi terjadi tepat sebelum *bulge* dimana titik stagnasi berada. Semakin menuju downstream, tekanan berkurang hingga mencapai batas minimum di daerah dengan kecepatan tertinggi yaitu di puncak *bulge*. Tekanan di belakang *bulge* sangat dipengaruhi oleh bentuk dan dimensi *recirculation bubble*. Ketika *separation region* cukup besar, tekanan minimum kedua berkembang di dalam *recirculating* *bubble*. Sementara dengan meningkatnya *Reynolds Number* aliran lebih mudah menghadapi *adverse pressure gradient* yang merugikan karena bercampur dengan aliran turbulen, yang mengakibatkan tertundanya separasi. Distribusi tekanan tersebut lebih mudah diamati dalam bentuk *pressure coefficient* yang ditunjukkan pada gambar 2.10.

Penelitian untuk *separation bubble* yang mengacu pada aspek geometri bidang yang dilalui diantaranya dilakukan oleh **Alam et al [4]** Penelitian tersebut dilakukan dengan mengalirkan fluida (udara) sejajar dengan sumbu silinder dengan geometri ujung yang berbeda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.11 di bawah ini. Variasi dilakukan dengan penggunaan ujung berbentuk tumpul (datar), konis dan setengah lingkaran pada *leading edge* serta variasi *angle of attack* dari 0° (axial) hingga 3,5° dan variasi Bilangan *Reynolds* 1,0 x 10⁴ dan 2,6 x 10³. Sedangkan untuk *pressure coefficient* rata-rata (C_p) dan tekanan rms pada permukaan silinder diukur pada x/D= 0,15, 1,0 dan 2,5.



Gambar 2.11 Sketsa model; (a) *leading edge* berbentuk datar, dengan Panjang *reattachment* $x_{\rm R}$, tinggi *bubble* W dan Panjang transisi $x_{\rm Tr}$; (b) *leading edge* berbentuk setengah lingkaran; (c) *leading edge* berbentuk konis (sumber: Alam et al, 2018)

Dari penelitian tersebut dapat diketahui pengaruh geometri nose pada pembentukan bubble di belakangnya seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.12 pada kasus angle of attack, $\alpha = 0^{\circ}$. ditimbulkan Ketinggian yang menyusut, bubble posisi reattachment berpindah semakin ke depan dan shear-layer transition terdunda seiring perubahan nose dari geometri datar, konis hingga setengah lingkaran, berurutan. Akan tetapi pada kasus *nose* setengah lingkaran dengan $Re_D = 2.6 \times 10^3$ tidak ditemukan separasi, sementara pada $Re_D = 1.0 \times 10^4$ separasi diikuti dengan *reattachment*. Untuk kasus $\alpha = 0^\circ$, pola *nose* yang tidak ramah akan disukai oleh aliran, akan tetapi pada angle of attack yang lebih besar justru pola nose yang ramah yang lebih disukai, sebab minim adverse pressure.



Gambar 2.12 Visualisasi aliran yang melalui silinder dengan geometri *nose* yang berbeda pada kasus $\alpha = 0^{\circ}$ (sumber: Alam et al, 2018)



Gambar 2.13 Pengaruh *angle of attack* terhadap Cp pada geometri *nose* (a) datar, (b) konis, dan (c) setengah lingkaran(sumber: Alam et al, 2018)

Lamballais et al [2] melakukan penelitian berkelanjutan mengenai *bubble separation* dengan melakukan simulasi secara *direct numerical simulation (DNS)* pada *thick half-plate*. Penelitian tersebut memvariasikan kelengkungan pada *leading edge* (η) sebesar 0.125, 0.25, 0.5, dan 1. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *body* berbentuk 2 dimensi dan 3 dimensi untuk setiap ukuran kelengkungan dengan Bilangan *Reynolds* sebesar 2000 serta variasi *inlet excitation (u'inflow)* sebesar 0 dan 0.1% dari U_{∞}. Model berukuran 20.25H kearah sumbu x, 16H kearah sumbu y, dan 6H kearah sumbu z dengan konfigurasi seperti pada gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Skema model konfigurasi aliran (sumber: Lamballais et al, 2009)

Penelitian menunjukkan bahwa pada *body* 3 dimensi *bubble separation* yang ditimbulkan lebih dominan dari *body* 2 dimensi. Pada *body* 3 dimensi *bubble separation* yang terbentuk lebih tidak stabil seiring dengan kelengkungan yang semakin besar. Sementara pada *body* 2 dimensi hasilnya tidak sesuai dengan teori terutama pada *reversed flow* yang terbentuk dibandingkan dengan hasil *body* 3 dimensi. Perbandingan *bubble separation* yang tebentuk dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Perbandingan profil *bubble separation* pada *body* 2 dimensi dan 3 dimensi (sumber: Lamballais et al, 2009)

Selanjutnya Lamballais et al mengamati profil kecepatan pada daerah *bubble separation*. Pengaruh utama perbedaan pada profil kecepatan saat *x-locations* adalah besarnya kelengkungan. Semakin kecil kelengkungan pada *leading edge* maka *backflow* yang terjadi semakin meningkat. Pada saat η =1 ke η =0.125 *backflow* meningkat sebesar +65 % baik pada *body* 2 dimensi maupun *body* 3 dimensi. Grafik perbadingan profil kecepatan hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perbandingan profil kecepatan pada body 2 dimensi (kanan) dan 3 dimensi (kiri) (sumber: Lamballais et al, 2009)

Tidak luput dari penelitian, panjang *recirculation* pada daerah *bubble separation*, tinggi *bubble separation*, sudut *bubble separation* juga mendapat perhatian. Pada *body* 3 dimensi panjang *recirculation* meningkat sebesar +60% saat η =1, dan meningkat sebesar +7% saat η =0.125. Sedangkan pada *body* 2 dimensi panjang *recirculation* meningkat sebesar +23% saat η =1, dan tidak lagi terpengaruh oleh kecepatan aliran masuk saat $\eta \leq 0.5$. Sementara itu, tinggi *bubble separation* meningkat seiring dengan

meningkatnya kelengkungan pada *leading edge*. Pada saat η =1 tinggi *bubble separation* sekitar +42% dan saat η =0.125 tinggi *bubble separation* sekitar +4% pada *body* 3 dimensi. Perubahan ukuran *bubble* tersebut tidak mempengaruhi sudut terbentuknya *bubble separation*. Perbadingan hasil eksperimen dari Lamballais et al dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Perbandingan (a) panjang *recirculation*, (b) tinggi *bubble separation*, (c) sudut *bubble separation* pada *body* 2 dimensi dan 3 dimensi (sumber: Lamballais et al, 2009)

Sementara itu, **Erick Erlangga [8]** melakukan penelitian tentang pengaruh kelangsingan *leading edge* pada pelat datar terhadap perkembangan karakteristik *boundary layer* di atas permukaan datar di belakangnya. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan kelangsingan *leading edge* pada rasio geometri

(a/t) = 0,2; 0,5; dan 1 dengan Re = 64000. Skema penelitian ditunjukkan pada gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.18 Konvigurasi benda uji (a) a/t=0,2; (b) a/t=0,5; (c) a/t=1 (sumber: Erlangga, 2009)

Penelitian tersebut menyatakan bahwa pada leading edge dengan ketumpulan besar (a/t = 0.2), di akhir *leading edge* terdapat fenomena bubble separation. Sedangkan pada model uji yang lain (a/t = 0.5 dan a/t = 1) tidak ditemukan adanya *bubble separation*. Hal ini disebabkan karena pada *leading edge* dengan ketumpulan tersebut *slope* penurunan tekanannya lebih lebar sehingga terjadi akselerasi yang lebih lemah, yang kemudian mengakibatkan energi yang digunakan untuk mencapai nilai Cp minimum dalam menyusuri lintasan yang panjang tidaklah cukup. Defleksi aliran vang terjadi cenderung tidak tajam ketika melintasi akhir dari kelengkungan leading edge. Proses akselerasi aliran disebabkan oleh penyempitan stream tube dari titik stagnasi hingga pada titik tekanan minimum. Setelah fluida melewati titik tekanan minimum. tekanan akan naik kembali. Dalam proses kenaikan tekanan tersebut tidak terjadi fluktuasi tekanan sehingga tidak ada bubble seperti pada kesimpulan yang didapat pada model uji b. Perubahan konvergen ke divergen stream tube yang halus menyebabkan akselerasi aliran lemah. Saat melewati ujung kelengkungan *leading* edge menyebabkan aliran tidak terseparasi, terlebih karena pada pelat datar daerah *downstream* tidak terjadi *adverse pressure* maka aliran mengikuti kontur lebih baik. Proses terjadinya aliran *attach* yaitu *energy entrainment* dari *freestream* ke daerah separasi tanpa dibarengi eksistensi *adverse pressure* di *downstream*, mendorong *attachment* dari aliran yang akan terseparasi. Dengan demikian aliran yang tidak terseparasi dan mengikuti kontur pelat datar pada downstream dan *streamline* aliran kembali lurus melintasi permukaan pelat datar.

2.3 Numerical Modelling

2.3.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan perangkat untuk menganalisa sistem dengan melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, momentum, perpindahan energi dan fenomena aliran lain yang didasarkan pada simulasi dengan bantuan komputer. CFD pada hakekatnya merupakan perangkat atau software yang menggunakan finite volume method dengan memperlakukan fluida menjadi sejumlah volume kecil dan melalui algoritma tertentu untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, temperature, kecepatan dan laju aliran masa (mass flow rate).

Dalam analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar di bidang mekanika fluida untuk interpretasi hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri atas tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu; *pre-processing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence model*, spesifikasi parameter dan *grid generation*), *processing* dan *postprocessing* (*visualization* dan *treatment data*). Prosedur CFD melalui tahapan seperti diagram pada gambar 2.16 berikut.



Gambar 2.19 Diagram simulasi dengan CFD (sumber: Versteeg dan Malalasekera)

Sampai saat ini CFD telah banyak digunakan dalam bidang aplikasi, baik untuk keperluan riset optimasi desain maupun untuk aplikasi praktis. Beragam industri dari biomedical dan farmasi hingga industri perminyakan dan refinery pun memanfaatkan CFD untuk menganalisa sistem. Industry farmasi menggunakan CFD untuk mensimulasikan enzim-enzim dalam tubuh manusia sementara industri refinery menggunakannya untuk mensimulasikan aliran ekstraksi gas. Untuk optimasi desain, bidang aerodynamic menggunakan untuk analisa lift dan drag. Hydrodynamics menggunakan untuk simulasi beben dinamis gelombang, power plant memakai untuk mensimulasikan pembakaran dan perpindahan panas. Turbomachinery menggunakan untuk menganalisa rotating passage. aliran dalam *Electronic* engineering menggunakan untuk simulasi pendinginan microcircuits. Chemical engineering menggunakan untuk simulasi proses mixing. Civil engineering menggunakan analisa beban dinamis. Marine engineering menggunakan untuk simulasi beban offshore structure. Environmental engineering memakai untuk simulasi distribusi pollutants. Hydrology dan oceanography memanfaatkan untuk simulasi aliran sungai, pantai, dan laut. Metrology menggunakan untuk prediksi cuaca

2.3.2 Klasifikasi Turbulence Modelling

Turbulensi terjadi jika dalam aliran terdapat pusaran (*Eddy*), baik yang berukuran besar maupun kecil. Tiap ukuran *Eddy* memiliki karakteristik tertentu, sesuai dengan energi

pusaran (kecepatan rotasi / *turbulent velocity scale* / u) yang dimilikinya.



Gambar 2.20 Karakteristik *Eddy* dalam turbulensi (*sumber: Versteeg* dan *Malalasekera*)

Model turbulensi dapat diklasifikasikan berdasarkan cara pemodelan *Large Eddies* dan *Small Eddies* dalam aliran turbulen. Secara umum, pemodelan turbulensi dapat dibagi atas 3 macam yaitu *Direct Numeric Simulation, Large Eddy Simulation,* dan model turbulensi yang berdasarkan *Reynolds Averaged Navier-Stokes* **Versteeg dan Malalasekera** [9].



Gambar 2.21 Energy Cascade antara Large Eddy dengan Small Eddy (sumber: Versteeg dan Malalasekera)



Gambar 2.22 Pendekatan Turbulence Modeling (sumber: Versteeg dan Malalasekera)

2.3.3 RANS Turbulence Modelling

Berikut adalah deskripsi dari metode turbulence modelling:

- a. **Spalart-Allmaras**: Merupakan model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan *transport* untuk viskositas turbulen. Model ini didesain secara khusus untuk aplikasi *aerospace* yang melibatkan *wall-bounded flows* dan telah menunjukkan hasil yang baik untuk lapisan batas yang dipengaruhi *adverse pressure gradient*. Bentuk dasar model *Spalart-Allmaras* hanya efektif pada model dengan bilangan *Reynolds* yang kecil. Model ini dapat digunakan untuk simulasi yang relatif kasar dengan ukuran *mesh* yang besar, dimana perhitungan aliran turbulen yang akurat bukan merupakan hal yang kritis.
- b. **Standard** k- ϵ : Pemodelan yang menggunakan persamaan transport untuk penyelesaian model k- ϵ . Model ini juga dapat menyelesaikan untuk *heating*, *buoyancy* dan *compressibility* yang dapat diselesaikan dalam k- ϵ model yang lainnya. Model tidak cocok untuk aliran kompleks yang meliputi *strong stream curvature* dan *separation*.

- c. **RNG** k- ϵ : Variasi pemodelan dari standard k- ϵ model. Model ini sangat signifikan untuk mengubah dalam persamaan ϵ , sehingga dapat memperbaiki model yang mempunyai *highly strained flows*. Dalam model ini juga dapat digunakan untuk aliran yang mempunyai Re yang rendah dan untuk memprediksi aliran yang mempunyai *efek swirling*.
- d. **Realizable k-ε**: Variasi pemodelan dari standard k-ε model. Dengan menggunakan model ini dapat dilakukan untuk menentang penggunaan mathematical constraints sehingga dengan pemodelan ini cukup dapat memperbaiki perfomansi dari model tanpa menggunakan mathematical constrains.
- e. *Standard k-w*: Pemodelan yang menggunakan dua persamaan transport model untuk memecahkan k- ω . pemodelan ini juga dapat digunakan untuk aliran yang memiliki *Re* yang rendah. Pemodelan ini juga dapat menampilkan transisi aliran laminar, aliran laminar menuju aliran turbulen. Keuntungan lainnya adalah dapat menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.
- f. Shear-Stress Transport k-Ω: merupakan pengembangan dari pemodelan Standard k-Ω. Model ini cocok digunakan untuk meningkatkan akurasi model sebelumnya di near-wall region dimana free stream tidak bergantung pada k-model untuk aliran eksternal dengan mengkombinasikan k-ε model. SST k-Ω adalah metode yang tepat untuk mensimulasikan aliran dengan adverse pressure gradient.
- g. Transition k-kl-ω: merupakan pemodelan dengan menggunakan 3 transport model equation untuk memecahkan k-kl-ω. Model ini cocok digunakan pada low Reynolds number yang mana dapat menganalisa

transisi aliran dari laminar menuju turbulen dengan akurat.

h. RSM: Merupakan model turbulensi yang paling teliti pada fluent. Model RSMmendekati persamaan Navier-Stokes (Reynolds-averaged) dengan menyelesaikan persamaan transport untuk tegangan Reynolds bersamasama dengan persamaan laju dissipasi. Model ini menggunakan 5 persamaan transport, lebih banyak dibanding model turbulensi yang lain. Model RSM menghitung efek dari kurva streamline, pusaran (swirl), putaran, dan perubahan tiba-tiba pada aliran dengan lebih teliti daripada model turbulensi yang lain, sehingga dapat memberikan prediksi yang lebih akurat untuk aliran yang lebih kompleks.

Dari deskripsi di atas, dapat diketahui bahwa *turbulence* model Standard k- Ω dan Transition k-kl- ω dirasa tepat digunakan pada penelitian ini dimana digunakan low Reynolds number untuk mengetahui separasi aliran dari laminar menuju turbulen yang terjadi di dekat dinding dengan pengaruh adverse pressure gradient.

2.3.4 Grid Independence

Dari penelitian terdahulu, agar melakukan CFD simulasi dengan sukses perlu memperhatikan *grid* independensi adalah dengan melakukan *adapt. Grid* independensi sendiri adalah solusi konvergen yang ditentukan dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi besar kecilnya *mesh* sehingga tidak merubah hasil akhir numerik. Di dalam praktek, *grid* independensi diindikasikan dengan meningkatkan jumlah *mesh* pada *solid surface* hingga tidak merubah hasil akhir numeriknya.

Pada penelitian **Mulvany et al** [10], *Grid* independensi menggunakan empat *mesh* dengan variasi jumlah *cell*.

Penelitian ini menggunakan model *Realizable k-* ε untuk simulasinya dengan kecepatan *freestream* sebesar 3 m/s. Pada tabel 2.1 diperlihatkan analisa koefisien *lift*, koefisien *drag* dan masing-masing presentase *error post processing* numerik terhadap nilai eksperimental untuk setiap *mesh*. Pada tabel tersebut dapat dilihat penggabungan nilai *error* dengan prediksi koefisien *lift* yang turun seiring dengan penghalusan *mesh*, namun nilai *error* meningkat dari prediksi koefisien *drag*. Pada mesh C dan mesh D memiliki nilai koefisien nilai yang sama, sehingga syarat *grid indepence* terpenuhi.

Tabel 2.1 Analisis grid independensi dengan koefisien drag dan koefisien lift

	Lift coefficient		Drag coefficient	
Experimental	0.5520		0.0027	
	Predicted	Error	Predicted	Error
Mesh A	0.4945	10.42%	0.0029	7.41%
Mesh B	0.5230	5.25%	0.0025	7.41%
Mesh C	0.5302	3.95%	0.0024	11.11%
Mesh D	0.5305	3.89%	0.0024	11.11%

Pada gambar 2.23 meujukkan grafik profil kecepatan pada 93%C menggunakan setiap *mesh*. Dapat dilihat profil kecepatan menggunakan *mesh* C dan *mesh* D memiliki *error* yang lebih kecil disbanding *mesh* A dan B. Selanjutnya dilakukan *mesh* yang lebih rapat (*mesh* D) dengan syarat tidak boleh menambahkan *cells* kurang dari 16% untuk mengecek bahwa *grid independence* telah terpenuhi. Pada umumnya keakuratan dari metode numerik yang baik diiringi dengan peningkatan jumalh *cells*. Namun penggunaan *cells* yang terlalu banyak akan menimbulkan *rounding error* dan memperlama proses simulasi.



Gambar 2.23 Pendekatan Turbulence Modeling (sumber: Versteeg dan Malalasekera

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB III METODOLOGI

3.1 Konfigurasi Uji

Sesuai dengan tujuan penelitian, maka dilakukan pengujian melalui metode eksperimen dan numerik dengan model uji tertentu. Eksperimen ini akan dilakukan pada terowongan angin yang ada di Workshop Departemen Teknik Mesin, FTIRS-ITS. Model yang digunakan adalah *thick plate-rounded leading edge* dengan *leading edge* berupa *rounded* dengan jari-jari tertentu dan *trailing edge* yang berupa oval. Pada gambar 3.1 diperlihatkan parameter pengukuran yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.1 Parameter pengukuran

Dengan;

- r : jari- jari *leading edge*
- L : panjang bidang tumpu aliran
- 1 : panjang trailing edge
- c : panjang *chord*
- s : panjang *span*/lebar *body*
- t : tinggi body

Model uji tersebut memiliki ketinggian 100 mm dengan ujung depan-atas *rounded* sebesar 20 mm dan lebar sepanjang 660 mm. Panjang bidang tumpu aliran (datar), yang merupakan variasi dalam penelitian ini, memiliki panjang 350 mm dan 700 mm dengan *trailing edge* berbentuk seperempat oval dengan panjang tetap (300 mm). Kedua panjang bidang tumpu aliran tersebut akan diamati pada dua bilangan Reynolds yang berbeda, yaitu pada Re_t = 5.08×10^4 dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Sehingga penelitian ini memiliki konfigurasi uji seperti pada gambar 3.2. Sedangkan penempatan benda uji pada *test section wind tunnel* dapat ditunjukkan oleh gambar 3.3. Benda uji diletakkan secara horizontal di tengah *test section* dengan 2 buah lengan penyangga di tiap sisi kanan dan kiri yang terletak 70 mm setelah *leading edge* dan 50 mm sebelum *trailing edge*. Sementara itu sejumlah selang ekstensi dari *wall pressure tap* terpasang melalui sisi samping benda uji.



Gambar 3.2 Konfigurasi uji

Tabel 3.1 Konngulasi uji					
Konfigurasi	c/t	Re			
Α	6.5	5.08×10^{4}			
В	6.5	8.46×10^4			
С	10	5.08×10^4			
D	10	8.46×10^4			

Tabel 3.1 Konfigurasi uji



Gambar 3.3 Penempatan benda uji pada test section

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui variabelvariabel apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran dua dimensi pada *thick plate-rounded leading edge* dengan pengaruh *Reynolds number* (Re_t = 5.08×10^4 dan Re_t = 8.46×10^4) terhadap panjang bidang tumpu aliran (c/t = 6.5 dan c/t = 10). Metode analisa yang digunakan adalah *Buckingham's* π *theorem*. Dari analisa dimensi yang dilakukan dengan metode tersebut, untuk *pressure coefficient* didapatkan 5 grup tak berdimensi yaitu:

$$X_{1} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^{2}}$$
$$X_{2} = \frac{\rho V_{\infty} t}{\mu}$$
$$X_{3} = \frac{r}{t}$$
$$X_{4} = \frac{c}{t}$$
$$X_{5} = \frac{l}{t}$$

Dengan grup tak berdimensi tersebut adalah sebagai berikut:

 X_1 = coefficient of pressure

 X_2 = Bilangan Reynolds

 X_3 = rasio rounded leading edge terhadap tinggi body

 X_4 = rasio panjang total terhadap tinggi *body*

 X_5 = rasio panjang *trailing edge* terhadap tinggi *body*

Hubungan antara grup tak berdimensi tersebut adalah sebagai berikut:

$$X_1 = f(X_2, X_3, X_4, X_5)$$

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^{2}} = f_{1}(\frac{\rho V_{\infty}t}{\mu}, \frac{r}{t}, \frac{c}{t}, \frac{l}{t})$$

Pada penelitian ini, $\frac{r}{t} \operatorname{dan} \frac{l}{t}$ sebagai variabel tetap, sedangkan $\frac{\rho V_{\infty} t}{\mu}$ dan $\frac{c}{t}$ divariasikan agar dapat diketahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *pressure coefficient* pada *thick platerounded leading edge* yang diujikan. maka:

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^{2}} = f_{2}(\frac{\rho V_{\infty}t}{\mu}, \frac{c}{t})$$

Dalam hal ini, panjang karakteristik yang digunakan merupakan ketinggian dari *thick plate-rounded leading edge* untuk menentukan bilangan Reynolds yang sesuai dengan kecepatan aliran di dalam *wind tunnel*, dengan kata lain:

$$C_P = f_2(Re_t, \frac{c}{t})$$

3.3 Metode Eksperimen

3.3.1 Peralatan Eksperimen

Adapun peralatan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

• Wind Tunnel

Wind tunnel merupakan tempat pengujian dari benda uji dengan *test section* berbentuk balok dengan panjang 1780 mm, lebar 660 mm dan tinggi 660 mm serta mampu beroperasi pada kecepatan maksimum 21 m/s. Pada gambar 3.4 diperlihatkan skema *wind tunnel* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.4 Skema wind tunnel yang digunakan

• Wall Pressure Tap

Sejumlah *wall pressure taps* dengan diameter lubang (d) sebesar 3 mm digunakan untuk mengukur tekanan statis aliran fluida yang dipasang pada *upperside* benda. Untuk benda uji c/t = 6,5 berjumlah 156 *wall pressure tap* sementara untuk benda uji c/t = 10 berjumlah 223 *wall pressure tap*, dengan jarak (b) 5 mm antar *wall pressure tap* seperti pada gambar 3.5. Adapun selang ekstensi dilewatkan melalui sisi samping dari benda uji. Pada penelitian ini pengukuran dilakukan untuk mendapatkan tekanan statis dan stagnasi.



Gambar 3.5 Wall pressure tap pada benda uji

• Pitot Static Tube

Pitot static tube dengan diameter lubang sebesar 3 mm digunakan untuk mengukur besar tekanan statis dan tekanan stagnasi aliran fluida di tengah saluran uji yang kemudian dengan persamaan *Bernoulli* dapat dihitung harga tekanan dinamisnya untuk kemudian mengukur harga kecepatan *free* stream.

• Pressure Tranducer

Pressure tranducer berfungsi untuk mengukur besaran tekanan yang terbaca sebagai besaran arus (volt).

• Data logger (Daqpro)

Data logger berfungsi untuk membaca besar arus yang diperoleh dari *pressure tranducer*.

• Manometer

Manometer berfungsi untuk menyatakan besar tekanan yang terukur oleh *pitot tube*. Manometer yang digunakan memiliki fluida kerja *red oil* (SG_{red oil} = 0.804), dengan sudut kemiringan sebesar 15° untuk mempermudah pembacaan Δ h yang terukur (*inclined manometer*).

• Thermometer

Thermometer digunakan untuk mengukur temperatur fluida kerja untuk menentukan propertinya.

3.3.2 Pengambilan Data Eksperimen

3. 3. 2. 1 Proses kalibrasi *pressure tranducer* dan manometer

Untuk keakuratan data, maka dilakukan kalibrasi. Berikut langkah kalibrasi yang perlu dilakukan:

- a) Mempersiapkan peralatan yang digunakan, meliputi *wind tunnel, pitot static tube, pressure tranducer, data logger,* selang *junction,* manometer, dan termometer.
- b) Memposisikan *pitot static tube* agar terletak tepat di titik tengah *test section wind tunnel* tegak lurus arah aliran yang menghadap *inlet wind tunnel*.
- c) Menyambungkan ujung *junction* pada lubang *output* stagnasi dan ujung lainnya pada lubang *output* statis dari *pitot static tube* kemudian ujung

lainnya ke manometer dan *pressure tranducer*. Selang *junction* inilah yang menghubungkan *pitot static tube* ke manometer dan *pressure tranducer*.

- d) Mengukur temperatur kerja ruangan dan mencatatnya dalam tabel perhitungan untuk menentukan *properties* udara.
- e) Membaca nilai awal ketinggian *red oil* manometer dan nilai awal *pressure tranducer*.
- f) Menyetel *fan wind tunnel* pada frekuensi 0 Hz dengan waktu tunggu 120 detik.
- g) Membaca Δh yang terukur pada manometer dan mencatatnya dalam tabel perhitungan.
- h) Membaca *output pressure tranducer* yang sudah diambil nilai rata-rata dari 22 kali pengambilan data pada satu titiknya melalui *data logger*. Data yang terbaca berupa nilai tegangan dalam satuan *volt* (*V*) yang kemudian dicatat dalam tabel perhitungan.
- i) Mengubah putaran *fan wind tunnel* dengan kenaikan 4 Hz tanpa mematikan *fan wind tunnel*.
- j) Mengulangi langkah pada poin (f) sampai (i) sampai frekuensi 48 Hz.
- k) Data ∆h dari manometer diproses dalam perhitungan sampai menghasilkan data tekanan dan kecepatan kemudian diplot dengan data tegangan listrik dari data akuisisi kedalam bentuk grafik untuk mengetahui persamaannya.



Gambar 3.6 Skema validasi manometer value dengan nilai pressure tranducer

3. 3. 2. 2 Pengukuran tekanan statis

Prosedur yang digunakan pada eksperimen ini adalah sebagai berikut:

- (a) Memasang benda uji (c/t = 6,5) dan memastikan *wall pressure tap* terpasang pada lubang sepanjang *midspan* benda uji dengan jumlah dan jarak yang telah ditentukan.
- (b) Memastikan selang kapiler telah terpasang dan telah diberi penamaan dengan baik pada masing-masing selang ekstensi *wall pressure tap*.
- (c) Mencatat pembacaan awal pada inclined manometer.
- (d) Menghidupkan *blower* dan mengatur putaran untuk mendapatkan kecepatan yang diinginkan, yaitu V = 7,5 m/s, atau pada frekuensi yang telah dikalibrasi dari *fan wind tunnel*.
- (e) Menghubungkan selang ekstensi *wall pressure tap* pertama dengan selang kapiler *pressure transducer*.
- (f) Mencatat perubahan tegangan yang terjadi (V) pada data *logger* yang menunjukkan hasil pengukuran *pressure tap*
- (g) Melepas selang kapiler *inclined manometer* dari selang kapiler untuk *wall pressure tap* pertama kemudian menghubungkannya dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* yang kedua.
- (h)Mengulangi langkah e sampai g, hingga didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir di ujung outlet instalasi.
- (i) Mengulangi langkah d hingga h, dengan V = 12,5 m/s.
- (j) Mengulangi langkah a hingga i, dengan c/t = 10.

3.4 Metode Numerik

Metode numerik dilakukan dengan *software ANSYS (Fluent)* 19.1 dan digunakan model uji berbentuk dua dimensi. Pemodelan yang digunakan adalah viscous model yaitu dengan membandingkan **Transition k-kl-** ω dan dan **SST k-** Ω untuk mengetahui model yang paling sesuai guna mendapatkan hasil yang akurat dalam kontur baik tekanan maupun kecepatan, bubble separation dan massive separation

3.4.1 Mesh

Membuat *mesh* adalah membagi model *solid* menjadi elemen-elemen kecil sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang dipilih dan mendekati hasil eksperimen adalah bentuk *quadrilateral* di semua bagian permukaan dinding. Gambar *grid* dari benda uji diperlihatkan pada gambar 3.7. Sementara *mesh quality* yang terdiri atas *skewness, aspect ratio* dan *orthogonality* ditujukan oleh tabel 3.2.



Gambar 3.7 Model *meshing thick plate-rounded leading edge* pada c/t = 6.5

Mesh (c/t)	Quality Aspect			
	Aspect Ratio	Skewness	Orthogonality	
6,5	256,478	0,690957	0,46128	
10	337,498	0,690958	0,24277	

Tabel 3.2 Mesh Quality

3.4.2 Grid Independence

Grid independence merupakan indikator yang menunjukkan bahwa jumlah *grid points* tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap hasil dari metode numerik. Pada benda uji dengan c/t = 6,5 dibuat *mesh* dengan jumlah elemen (*cell*) 169856 dan diambil data C_P di salah satu titiknya (50% c). Selanjutnya *mesh* diperbanyak dan diambil data C_P di titik yang sama untuk dibandingkan. Jika hasil dari perbandingan tersebut tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan di antara keduanya (error relatif kecil, yaitu $\leq 2\%$), maka penambahan jumlah *grid points* hanya ditambah beberapa saja **Anderson** [11].

Selanjutnya jumlah *meshing* terpilih ditambahkan jumlah elemennya sebanyak 20% dari jumlah *cell* sebelumnta untuk dibandingkan data C_P di titik yang sama. Hasil dari perbandingan tersebut tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan di antara keduanya, sehingga syarat *grid independence* sudah terpenuhi. Selanjutnya dilakukan prosedur yang sama untuk benda uji dengan c/t = 10.

3.4.3 Boundary Condition

Merupakan penentuan parameter dan batasan pada aliran, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun kondisi batas turbulensi pada *inlet, outlet* serta kondisi pada *wall*. Kondisi batas *inlet* diberi sesuai dengan variasi kecepatannya, yaitu 7.5 m/s dan 10 m/s, sedangkan pada *outlet* berupa *pressure outlet*. Pada penelitian ini *turbulence model* yang digunakan adalah *SST k-w* dengan *wall* *treatments* berupa *enhanced wall treatment*. Parameter yang digunakan untuk menentukan kualitas dari *enhanced wall treatment* adalah nilai Y^+ antara 1 sampai 5. Penentuan parameter dan batasan pada aliran diperlihatkan pada gambar 3.8. Sementara zona *boundary condition* diperlihatkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.8 Penentuan parameter boundary condition



Gambar 3.9 Zona boundary condition

3.4.4 Post Processing

Merupakan tampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh, seperti velocity contour berupa streamline, pressure distribution secara kualitatif maupun kuantitatif, velocity vector distribution, dan static pressure yang selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung pressure coefficient.



Gambar 3.10 Hasil post processing

3.5 Jadwal Penelitian

Jadwal pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.5 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Jadwal penelitian


3.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari metode eksperimen dan numerik yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Diagram alir metode penelitian

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Metode Numerik

Hasil dari iterasi pada metode numerik perlu divalidasi dengan data hasil dari metode eksperimen. Hal ini ditujukan untuk menguji kebenaran atas metode numerik vang digunakan untuk menyimulasikan benda uji thick plate-rounded leading edge. Validasi dilakukan dengan membandingkan koefisien tekanan hasil eksperimen dengan hasil dari simulasi numerik pada benda uji c/t 10 dan dengan Ret 5,08 x 10⁴. Model turbulen yang dipilih untuk metode numerik dalam penelitian ini adalah k- Ω SST dan k $kl-\omega$. Adapun model turbulen $k-\Omega$ SST dipilih karena dapat menyimulasikan fenomena aliran di dekat dinding pada bilangan *Reynolds* rendah dengan akurat. Sedangkan model turbulen k-kl- ω dipilih karena dapat menyimulasikan transisi boundary layer dari laminar ke turbulen. Gambar 4.1 (a) menyajikan perbandingan koefisien tekanan antara model turbulen k- Ω SST dan eksperimen, sementara Gambar 4.1 (b) menyajikan perbandingan koefisien tekanan antara model turbulen k-kl- ω dan eksperimen.



Gambar 4.1 (a) Perbandingan Grafik koefisien tekanan model k- Ω SST dan eksperimen (b) Perbandingan Grafik koefisien tekanan model k-kl- ω dan eksperimen

Pada gambar 4.1 (a) dan (b) memiliki nilai Cp maksimum dan minimum yang relatif sama. Data hasil eksperimen memiliki level yang lebih dekat dengan data dari hasil simulasi model turbulen k- Ω SST pada daerah *reattachment* dibanding model turbulen k-kl- ω . Perbedaan signifikan antar kedua model terjadi pada daerah *leading edge*, dimana model turbulen k-kl- ω menunjukkan fenomena yang cenderung sama dengan data hasil eksperimen. Fenomena tersebut mengindikasikan adanya proses aliran yang gagal terseparasi permanen, ditunjukkan dengan kenaikan grafik yang tajam dan dilanjutkan dengan takikan kecil setelah melewati daerah *rounded* di x/c 0.2 dimana fenomena ini menandakan awal terbentuknya separation bubble. Selanjutnya grafik naik tidak terlalu tajam yang kemudian makin melandai hingga terjadinya proses reattachment. Untuk daerah setelah reattachment kedua grafik memiliki kecenderungan yang sama seperti saat aliran melalui plat datar hingga tercapai separasi permanen di buritan, namun model turbulen k-kl- ω memiliki level yang lebih mirip dengan hasil eksperimen daripada model turbulen k- Ω SST. Karakter yang sama juga dapat ditemui pada benda uji yang sama dengan Ret 8.46 x 10⁴ seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut. Sementara pada benda uji lain, c/t = 6,5, ditunjukkan oleh gambar 4.3 dan 4.4.



Gambar 4.2 Grafik perbandingan koefisien tekanan pada c/t 10 dengan Ret 8,46 x 10⁴ hasil eksperimen dan numerik (k-kl- ω)



Gambar 4.3 Grafik perbandingan koefisien tekanan pada c/t 6,5 dengan Re_t 5,08 x 10⁴ hasil eksperimen dan numerik (*k-kl-\omega*)



Gambar 4.4 Grafik perbandingan koefisien tekanan pada c/t 6,5 dengan Ret 8,46 x 10⁴ hasil eksperimen dan numerik (*k-kl-\omega*)

Perbandingan profil kecepatan antara model turbulen k- Ω SST dan k-kl- ω turut dilakukan seperti pada gambar 4.6 di berikut. Pengambilan data prodil kecepatan dilakukan pada titik yang sama (O) yang terletak 300 mm dari ujung depan benda uji x/c 0,3 sesuai gambar 4.5.



Gambar 4.5 Titik pengamata profil kecepatan



Gambar 4.6 Profil kecepatan dengan model k- Ω SST dan k-kl- ω

Dari gambar 4.6 di atas terlihat profil kecepatan pada model k- Ω SST timbul backflow yang ditandai dari cekungnya kurva. Hal ini seharusnya tidak terjadi sebab pada titik O berada jauh di belakang separation bubble, sementara pada model k-kl- ω menunjukkan turbulent boundary layer yang lebih tepat terjadi pada titik O tersebut. Dari perbandingan tersebut di atas, baik perbandingan koefisien tekanan maupun profil kecepatan, maka dipilihlah model turbulen k-kl- ω dalam penelitian ini. Adapun perbedaan nilai koefisien tekanan dengan data hasil eksperimen di daerah rounded diduga karena sulitnya melakukan pengukuran tekanan statis pada daerah rounded. Kesulitan tersebut berupa kurangnya jumlah wall pressure tap dan pemasangan wall pressure

tap yang tidak tegak lurus terhadap garis singgung aliran pada daerah yang dimaksud.

4.2 Analisa Grid Independency

Grid Independency dilakukan dengan memvariasikan jumlah cells pada benda uji thick plate-rounded leading edge baik meshing pada benda uji c/t 6,5 maupun c/t 10 pada Ret = 5,08 x 104 dengan k-kl- ω turbulence model sesuai dengan hasil validasi pada sub bab 4.1. Mesh A merupakan meshing paling renggang dan mesh E merupakan meshing paling rapat dengan penambahan jumlah cells sebesar dua kali lipat dari mesh A. Adapun data iterasi nilai Cp diambil pada titik yang sama di x/c 0,5 untuk setiap benda uji. Perbandingan jumlah cells dengan nilai Cp dapat dilihat pada tabel 4.1 untuk benda uji c/t 6,5 dan tabel 4.2 untuk benda uji c/t 10.

	e or ra maepenae	puan e, i e,e		
Mesh	Jumlah cells	Cp di x/c 0,5	Error (%)	Y+
А	169.856	-0,87733	-	1,0680
В	179.774	-0,87745	0,014	1,0680
С	189.652	-0,87782	0,042	1,0680
D	199.744	-0,87832	0,057	1,0680
E	351.254	-0,88753	1,049	1,0678

Tabel 4.1 Grid independency pada c/t 6,5

Tabel 4.2 Grid independency pada c/t 10

Mesh	Jumlah cells	Cp di x/c 0,5c	Error (%)	Y+
А	215.952	-0,78758		1,0420
В	225.874	-0,78768	0,013	1,0420
С	235.954	-0,78791	0,029	1,0420
D	245.782	-0,78833	0,053	1,0420
Е	421.864	-0,79644	1,029	1,0419

Dari tabel 4.1 dan 4.2 di atas dapat diketahui bahwa keseluruhan nilai *error* yang dihasilkan $\leq 2\%$ atau dapat dikatakan nilai Cp pada semua jenis meshing relatif konstan untuk benda uji yang sama. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dengan

penambahan jumlah cells, perubahan nilai Cp tidak signifikan atau dapat dikatakan mesh *grid independence*. Selanjutnya digunakan *meshing* A untuk kedua benda uji dengan *software ANSYS (Fluent)* 19.1

4.3 Gambaran Umum Karakteristik Aliran

Pengaruh variasi panjang bidang tumpu aliran beserta bilangan *Reynolds* terhadap karakteristik aliran dapat dilihat secara umum melalui visualisasi kontur. Pada gambar 4.7 menunjukkan kontur tekanan dan gambar 4.8 menunjukkan kontur kecepatan untuk semua konfigurasi benda uji.



Gambar 4.7 Kontur tekanan pada semua konfigurasi



Gambar 4.8 Kontur kecepatan dan streamline pada semua konfigurasi

Aliran yang bergerak menuju benda uji mengalami tumbukan pada sisi terdepan benda uji sehingga memiliki tekanan maksimum (ditandai dengan warna merah pada gambar 4.7) dan kecepatan minimum (ditandai dengan warna biru pada gambar 4.8). Sebagai akibat adanya rounded di sisi atas, titik stagnasi tersebut bergeser sedikit ke bawah atau tidak berada tepat di *midpoint* benda uji. Aliran yang berada di atas titik stagnasi akan terhempas ke arah rounded bersamaan dengan terjadinya penyempitan streamtube yang menyebabkan akselerasi aliran secara signifikan. Adanya kesempatan berupa tambahan energi dari primary flow dan bidang tumpu aliran menyebabkan terjadinya reattachment dibarengi dengan timbulnya separation bubble. Separation bubble sendiri berupa recirculating flow (vortex) yang ditandai dengan daerah berbentuk gundukan yang berkecepatan rendah seperti yang terlihat pada gambar 4.9 di bawah ini. Setelah mengalami aliran memiliki kesempatan untuk relaksasi reattachment. sepanjang bidang tumpu aliran hingga mengalami separasi massif di daerah buritan seperti pada gambar 4.10.



Gambar 4.9 Kontur kecepatan dan *streamline* pada *separation bubble*



Gambar 4.10 Kontur kecepatan dan streamline pada massive separation

4.4 Analisa Karakteristik Aliran dan Separation Bubble 4.4.1. Konfigurasi c/t = 6,5 dengan Ret = 5,08 x 10⁴

Koefisien tekanan adalah bilangan tak berdimensi yang menggambarkan tekanan relatif pada bidang aliran yang independen terhadap ukuran benda uji yang dilaluinya. Pada penelitian ini pengukukuran dilakukan pada bagian *upperside* sepanjang *midspan* benda uji untuk setiap konfigurasi. Gambar 4.11 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan yang dipadukan dengan *streamline* dari aliran yang melalui konfigurasi benda uji c/t 6,5 dengan 5,08 x 10^4 .



Gambar 4.11 Grafik koefisien tekanan pada c/t 6,5 dengan 5,08 x 10^4

Fenomena diawali dengan koefisien tekanan bernilai 1 pada x/c 0 yang menunjukkan adanya titik stagnasi. Selanjutnya terjadi penurunan koefisien tekanan secara signifikan sebagai akibat penyempitan *streamtube* ketika melalui daerah *rounded* dengan nilai minimum sebesar -3,74 di x/c 0,010. Setelah mencapai titik minimum pertama, terjadi kenaikan koefisien tekanan yang cukup drastis hingga titik tertentu yang menandai melebarnya *streamtube* sehingga aliran mengalami perlambatan disusul dengan separasi transisi menuju *recirculation* yang sangat tipis. Takikan kecil yang timbul manandakan adanya *separation bubble* (*recirculating flow*) yang mulai terbentuk pada x/c 0.0196. Kecepatan aliran pada *recirculating flow* mencapai nilai maksimum di dekat permukaan benda uji ditandai dengan nilai minimum kedua sebesar -3,42 pada x/c 0,05. Kemudian grafik koefisien tekanan naik hingga terjadi *reattachment* pada x/c 0.110 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -1,31. Selanjutnya aliran melalui bidang tumpu hingga awal *trailing edge* dan terseparasi masif pada x/c 0,894 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -0,397.

Analisa juga dilakukan pada pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O (gambar 4.5) untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan bilangan *Reynolds* dalam peningkatan momentum aliran seperti pada gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.12 Profil kecepatan pada c/t 6,5 dengan 5,08x10⁴

Dari gambar 4.12 tersebut dapat dilihat bahwa profil kecepatan y/δ terhadap u/U di dekat permukaan benda uji mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Fenomena tersebut sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran di dekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi di daerah *downstream*. Selanjutnya dilakukan analisa pada grafik *turbulent kinetic energy* pada titik O yang ditunjukkan pada gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 *Turbulent kinetic Energy* pada c/t 6,5 dengan $5,08 \ge 10^4$

Dari grafik 4.13 diketahui bahwa *turbulent kinetic* energy dalam fungsi k/U^2 dan y/δ timbul karena fluktuasi yang terjadi akibat adanya rounded pada leading edge. Energi ini akan ditransfer dalam bentuk energi kinetik aliran sebagai energi tambahan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi pada daerah downstream dapat tertunda. Adapun profil kecepatan dengan kombinasi streamline dan vector kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.14 yang menandakan telah terjadi separasi aliran di daerah *leading edge* dan *trailing edge* yang ditandai dengan arah vector kecepatan yang berbalik.



Gambar 4.14 Vektor kecepatan pada c/t 6,5 dengan $5,08 \times 10^4$

Dari hasil pengukuran mengenai ketebalan *separation bubble* (h_b) beserta panjang (ℓ_b) dan sudut (θ) serta panjang *reattachment* (ℓ_r) dan separasi massif (ℓ_m) dapat disimpulkan karakteristik aliran melalui konfigurasi benda uji c/t 6,5 $Re_t =$ 5,08 x 10⁴ seperti yang disajikan pada table 4.3 berikut. Sedangkan Analisa *displacement* dan *momentum thickness* pada table 4.4 menghasilkan bilangan *shape factor* sebesar 1,312 yang menandakan pada titik O tersebut telah terjadi *turbulent boundary layer*.

c/t	Ret	h sp	X٥	lь	hь	l	r	l	m	θ
		aktual (m)	relatif (x/c)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
6.5	5,08 x 10 ⁴	0.031	0.0126	0.0639	0.003024	0.0497	0.0765	0.5805	0.8931	24.8990

Tabel 4.3 Karakteristik Bubble pada c/t 6,5 $Re_t = 5,08 \times 10^4$

Tabel 4.4 *Shape factor* pada c/t 6,5 $Re_t = 5,08 \times 10^4$

c/t	Re t	δ^{*}	θ	Н
6.5	5,08 x 10 ⁴	0.005918	0.00451	1.3122

Keterangan:

h sp	: tinggi stagnation	point
-------------	---------------------	-------

- Xo : titik separasi di *leading edge*
- *l* b : panjang separation bubble
- *h* b : tinggi separation bubble
- *lr* : panjang *reattachment*
- *l* m : panjang *massive separation*
- θ : sudut *separation bubble*

H : shape factor

4.4.2. Konfigurasi c/t = 6,5 dengan $Re_t = 8,46 \ge 10^4$

Seperti pada sub bab 4.4.1, pada konfigurasi benda uji c/t 6,5 dan $Re_t = 8,46 \times 10^4$ juga dilakukan pengukuran yang sama. Gambar 4.15 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan yang dipadukan dengan *streamline* dari aliran yang melalui konfigurasi benda uji c/t 6,5 dengan 8,46 x 10^4 .



Gambar 4.15 Grafik koefisien tekanan pada c/t 6,5 dengan $8,46 \ge 10^4$

Fenomena diawali dengan koefisien tekanan bernilai 1 pada x/c = 0 yang menunjukkan adanya titik stagnasi. Selanjutnya terjadi penurunan koefisien tekanan secara signifikan sebagai akibat penyempitan streamtube ketika melalui daerah rounded dengan nilai minimum sebesar -4,366 di x/c 0,014. Setelah mencapai titik minimum pertama, terjadi kenaikan koefisien tekanan yang cukup drastis hingga titik tertentu yang menandai melebarnya streamtube sehingga aliran mengalami perlambatan disusul dengan separasi transisi menuju recirculation yang sangat tipis. Takikan kecil bubble timbul manandakan adanya separation vang (recirculating flow) yang mulai terbentuk pada x/c 0.0212. Kecepatan aliran pada recirculating flow mencapai nilai maksimum di dekat permukaan benda uji ditandai dengan nilai minimum kedua sebesar -3,981 pada x/c 0,04. Kemudian grafik koefisien tekanan naik hingga terjadi reattachment

pada x/c 0.09 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -1,425. Selanjutnya aliran melalui bidang tumpu hingga awal *trailing edge* dan terseparasi masif pada x/c 0,91 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -0,315.

Analisa juga dilakukan pada pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O (gambar 4.5) untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan bilangan *Reynolds* dalam peningkatan momentum aliran seperti pada gambar 4.16 berikut.



Gambar 4.16 Profil kecepatan pada c/t 6,5 dengan 8,46x10⁴

Dari gambar 4.15 tersebut dapat dilihat bahwa profil kecepatan y/δ terhadap u/U di dekat permukaan benda uji mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Fenomena tersebut sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran di dekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi di daerah *downstream*. Selanjutnya dilakukan analisa pada grafik

turbulent kinetic energy pada titik O yang ditunjukkan pada gambar 4.17 berikut.



Gambar 4.17 *Turbulent kinetic Energy* pada c/t 6,5 dengan $8,46 \ge 10^4$

Dari grafik 4.17 diketahui bahwa *turbulent kinetic* energy dalam fungsi k/U^2 dan y/δ timbul karena fluktuasi yang terjadi akibat adanya rounded pada leading edge. Energi ini akan ditransfer dalam bentuk energi kinetik aliran sebagai energi tambahan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi pada daerah downstream dapat tertunda. Adapun profil kecepatan dengan kombinasi streamline dan vector kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.18 yang menandakan telah terjadi separasi aliran di daerah leading edge dan trailing edge yang ditandai dengan arah vector kecepatan yang berbalik.



Gambar 4.18 Vektor kecepatan pada c/t 6,5 dengan $8,46 \times 10^4$

Dari hasil pengukuran mengenai ketebalan *separation bubble* (h_b) beserta panjang (ℓ_b) dan sudut (θ) serta panjang *reattachment* (ℓ_r) dan separasi massif (ℓ_m) dapat disimpulkan karakteristik aliran melalui konfigurasi benda uji c/t 6,5 Re_t = 8,46 x 10⁴ seperti yang disajikan pada table 4.5 berikut. Sedangkan Analisa *displacement* dan *momentum thickness* pada table 4.6 menghasilkan bilangan *shape factor* sebesar 1,2917 yang menandakan pada titik O tersebut telah terjadi *turbulent boundary layer*.

c/t	Re t	h sp	X o	вь	hь	l	r	l	m	θ
		aktual (m)	relatif (x/c)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
6.5	8,46 x 10 ⁴	0.031	0.0126	0.0634	0.003211	0.0494	0.0760	0.5828	0.8966	23.6002

Tabel 4.5 Karakteristik *Bubble c/t* 6,5 $Re_t = 8,46 \ge 10^4$

Tabel 4.6 *Shape factor* pada c/t 6,5 $Re_t = 8,46 \ge 10^4$

c/t	Re t	δ^*	θ	Н
6.5	8,46 x 10 ⁴	0.004282	0.003315	1.2917

Keterangan:

h sp	: tinggi stagnation	point
-------------	---------------------	-------

Xo : titik separasi di *leading edge*

- *l* b : panjang *separation bubble*
- **h**b : tinggi separation bubble
- *lr* : panjang *reattachment*
- *l* m : panjang *massive separation*
- θ : sudut separation bubble

H : shape factor

4.4.3. Konfigurasi c/t = 10 dengan Ret = 5,08 x 10⁴

Seperti pada sub bab 4.4.1, pada konfigurasi benda uji c/t 10 dan $Re_t = 5,08 \times 10^4$ juga dilakukan pengukuran yang sama. Gambar 4.19 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan yang dipadukan dengan *streamline* dari aliran yang melalui konfigurasi benda uji c/t 10 dengan 5,08 x 10⁴.



Gambar 4.19 Grafik koefisien tekanan pada c/t 10 dengan $Re_t 5,08 \ge 10^4$

Fenomena diawali dengan koefisien tekanan bernilai 1 pada x/c 0 yang menunjukkan adanya titik stagnasi. Selanjutnya terjadi penurunan koefisien tekanan secara signifikan sebagai akibat penvempitan streamtube ketika melalui daerah rounded dengan nilai minimum sebesar -3,709 di x/c 0.007. Setelah mencapai titik minimum pertama, terjadi kenaikan koefisien tekanan yang cukup drastis hingga titik tertentu yang menandai melebarnya streamtube sehingga aliran mengalami perlambatan disusul dengan separasi transisi menuju recirculation yang sangat tipis. Takikan kecil timbul manandakan adanya separation bubble vang (recirculating flow) yang mulai terbentuk pada x/c 0.013. Kecepatan aliran pada recirculating flow mencapai nilai maksimum di dekat permukaan benda uji ditandai dengan nilai minimum kedua sebesar -3,363 pada x/c 0,03. Kemudian grafik koefisien tekanan naik hingga terjadi reattachment pada x/c 0.067 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -1,320. Selanjutnya aliran relative konstan ketika melalui bidang tumpu hingga awal *trailing edge* dan terseparasi masif pada x/c 0,942 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -0,332.

Analisa juga dilakukan pada pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O (gambar 4.2) untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan bilangan *Reynolds* dalam peningkatan momentum aliran seperti pada gambar 4.20 berikut.



Gambar 4.20 Profil kecepatan pada c/t 10 dengan Re_t 5,08x10⁴

Dari gambar 4.20 tersebut dapat dilihat bahwa profil kecepatan y/δ terhadap u/U di dekat permukaan benda uji mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Fenomena tersebut sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran di dekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi di daerah *downstream*. Selanjutnya dilakukan analisa pada grafik

turbulent kinetic energy pada titik O yang ditunjukkan pada gambar 4.15 berikut.



Gambar 4.21 *Turbulent kinetic Energy* pada c/t 10 dengan $Re_t 5,08 \ge 10^4$

Dari grafik 4.21 diketahui bahwa *turbulent kinetic* energy dalam fungsi k/U^2 dan y/δ timbul karena fluktuasi yang terjadi akibat adanya rounded pada leading edge. Energi ini akan ditransfer dalam bentuk energi kinetik aliran sebagai energi tambahan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi pada daerah downstream dapat tertunda. Adapun profil kecepatan dengan kombinasi streamline dan vector kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.22 yang menandakan telah terjadi separasi aliran di daerah leading edge dan trailing edge yang ditandai dengan arah vector kecepatan yang berbalik.



Gambar 4.22 Vektor kecepatan pada c/t 10 dengan Re_t 5,08x10⁴

Dari hasil pengukuran mengenai ketebalan *separation bubble* (h_b) beserta panjang (ℓ_b) dan sudut (θ) serta panjang *reattachment* (ℓ_r) dan separasi massif (ℓ_m) dapat disimpulkan karakteristik aliran melalui konfigurasi benda uji c/t 10 Re_t = 5,08 x 10⁴ seperti yang disajikan pada table 4.7 berikut. Sedangkan Analisa *displacement* dan *momentum thickness* pada table 4.8 menghasilkan bilangan *shape factor* sebesar 1,3215 yang menandakan pada titik O tersebut telah terjadi *turbulent boundary layer*.

	Tabel 4.7	Karakteristik	Bubble c/t 10	dengan R	e_t 5,08 x 10	$)^{4}$
--	-----------	---------------	---------------	----------	-----------------	---------

c/t	Re t	h sp	Хo	ℓь	hь	l	r	l	m	θ
		aktual (m)	relatif (x/c)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
10	5,08 x 10 ⁴	0.035	0.0117	0.0631	0.003092	0.0748	0.0748	0.9258	0.9258	22.5520

Tabel 4.8 Shape factor pada c/t 10 dengan Re_t 5,08 x 10⁴

c/t	Re t	δ^{*}	θ	Н
10	5,08 x 10⁴	0.00645	0.004881	1.3215

Keterangan:

h sp	: tinggi stagnation	point
-------------	---------------------	-------

Xo : titik separasi di *leading edge*

*l*ь : panjang *separation bubble*

*h*b : tinggi separation bubble

*l*r : panjang *reattachment*

l m : panjang *massive separation*

 θ : sudut separation bubble

H : shape factor

4.4.4. Konfigurasi c/t = 10 dengan $Re_t = 5,08 \ge 10^4$

Seperti pada konfigurasi sebulumnya, pada konfigurasi benda uji c/t 10 dan $Re_t = 8,46 \times 10^4$ juga dilakukan pengukuran yang sama. Gambar 4.23 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan yang dipadukan dengan *streamline* dari aliran yang melalui konfigurasi benda uji c/t 10 dengan 8,46 x 10^4 .



Gambar 4.23 Grafik koefisien tekanan pada c/t 10 dengan $Re_t 8,46 \ge 10^4$

Fenomena diawali dengan koefisien tekanan bernilai 1 pada x/c = 0 yang menunjukkan adanya titik stagnasi. Selanjutnya terjadi penurunan koefisien tekanan secara signifikan sebagai akibat penyempitan streamtube ketika melalui daerah rounded dengan nilai minimum sebesar -4.285 di x/c 0,0084. Setelah mencapai titik minimum pertama, terjadi kenaikan koefisien tekanan yang cukup drastis hingga titik tertentu yang menandai melebarnya streamtube sehingga aliran mengalami perlambatan disusul dengan separasi transisi menuju recirculation yang sangat tipis. Takikan kecil manandakan adanya separation timbul bubble vang (recirculating flow) yang mulai terbentuk pada x/c 0.013. Kecepatan aliran pada recirculating flow mencapai nilai maksimum di dekat permukaan benda uji ditandai dengan nilai minimum kedua sebesar -3,89 pada x/c 0,027. Kemudian grafik koefisien tekanan naik hingga terjadi reattachment

pada x/c 0,065 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -1,323. Selanjutnya aliran melalui bidang tumpu hingga awal *trailing edge* dan terseparasi masif pada x/c 0,95 dengan nilai koefisien tekanan sebesar -0,270.

Analisa juga dilakukan pada pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O (gambar 4.5) untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan bilangan *Reynolds* dalam peningkatan momentum aliran seperti pada gambar 4.24 berikut.



Gambar 4.24 Profil kecepatan pada c/t 10 dengan Re_t 8,46x10⁴

Dari gambar 4.24 tersebut dapat dilihat bahwa profil kecepatan y/δ terhadap u/U di dekat permukaan benda uji mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Fenomena tersebut sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran di dekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi di daerah *downstream.* Selanjutnya dilakukan analisa pada grafik *turbulent kinetic energy* pada titik O yang ditunjukkan pada gambar 4.25 berikut.



Gambar 4.25 *Turbulent kinetic Energy* pada c/t 10 dengan $Re_t 8,46 \ge 10^4$

Dari grafik 4.25 diketahui bahwa *turbulent kinetic* energy dalam fungsi k/U^2 dan y/δ timbul karena fluktuasi yang terjadi akibat adanya rounded pada leading edge. Energi ini akan ditransfer dalam bentuk energi kinetik aliran sebagai energi tambahan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi pada daerah downstream dapat tertunda. Adapun profil kecepatan dengan kombinasi streamline dan vector kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.26 yang menandakan telah terjadi separasi aliran di daerah leading edge dan trailing edge yang ditandai dengan arah vector kecepatan yang berbalik.



Gambar 4.26 Vektor kecepatan pada c/t 10 dengan Re_t 8,46 x 10^4

Dari hasil pengukuran mengenai ketebalan *separation bubble* (h_b) beserta panjang (ℓ_b) dan sudut (θ) serta panjang *reattachment* (ℓ_r) dan separasi massif (ℓ_m) dapat disimpulkan karakteristik aliran melalui konfigurasi benda uji c/t 10 $Re_t =$ c x 10⁴ seperti yang disajikan pada table 4.9 berikut. Sedangkan Analisa *displacement* dan *momentum thickness* pada table 4.10 menghasilkan bilangan *shape factor* sebesar 1,300 yang menandakan pada titik O tersebut telah terjadi *turbulent boundary layer*.

c/t	Re t	h sp	X o	вь	hь	l	r	l	m	θ
		aktual (m)	relatif (x/c)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
10	8,46 x 10 ⁴	0.033	0.0117	0.0625	0.002943	0.0742	0.0742	0.9274	0.9274	20.6185

Tabel 4.9 Karakteristik Bubble c/t 10 dengan Re_t 8,46 x 10⁴

Tabel 4.10 *Shape factor* pada $c/t \ 10 \ Re_t = 8,46 \ x \ 10^4$

c/t	Re t	δ^{*}	θ	Н	
10	8,46 x 10 ⁴	0.004697	0.003613	1.3000	

Keterangan:

76

n sp	: tinggi stagnation point	
-------------	---------------------------	--

- Xo : titik separasi di *leading edge*
- *l*b : panjang *separation bubble*
- *h*b : tinggi separation bubble
- lr : panjang reattachment
- *l* m : panjang *massive separation*
- θ : sudut separation bubble
- *H* : shape factor

4.5 Analisa Perbandingan tiap Konfigurasi

Pada sub bab ini akan diuraikan perbandingan karakteristik aliran pada semua konfigurasi yang telah dibahas satu per satu pada sub bab 4.4. Perbandingan tersebut meliputi grafik koefisien tekanan, profil kecepatan, turbulent kinetic energy, profil separation bubble beserta shape factor berdasar variasi. Hal ini ditujukan untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan bilangan Reynolds dalam menunda separasi di daerah buritan.

4.5.1. Perbandingan konfigurasi c/t = 6,5 dengan Ret = $5,08 \ge 10^4$ dan Ret = $8,46 \ge 10^4$

Koefisien tekanan adalah bilangan tak berdimensi yang menggambarkan tekanan relatif pada bidang aliran yang independen terhadap ukuran benda uji yang dilaluinya. Koefisien tekanan dapat mempermudah dalam mempelajari karakteristik aliran fluida yang dalam penelitian ini melalui *upperside thick plate-rounded leading edge*. Gambar 4.27 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan aliran (*Cp*) terhadap x/c yang melalui benda uji c/t 6,5 dengan Ret 5,08 x 10^4 dan 8,46 x 10^4 .



Gambar 4.27 Grafik koefisien tekanan pada c/t 6,5

Gambar 4.19 menyajikan perbandingan hasil metode numerik berupa distribusi koefisien tekanan (*Cp*) terhadap panjang relatif (x/c) pada benda uji c/t 6,5 dengan 5,08 x 10⁴ dan 8,46 x 10⁴. Dari kedua grafik diketahui *stagnation point* atau nilai *Cp* maksimum bernilai 1 saat x/c 0. Selanjutnya kedua konfigurasi memiliki pola yang sama, yaitu menurun secara drastis yang kemudian diikuti oleh takikan kecil dan naik hingga dicapai *reattachment* sampai akhirnya terseparasi massif di buritan. Pada kedua grafik juga menunjukkan adanya discontinuity berupa sedikit penurunan nilai Cp yang kemudian naik Kembali hingga titik reattachment. Fenomena tersebut disebabkan oleh pelebaran streamtube (divergence streamtube) yang menyebabkan penurunan kecepatan. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari laminar boundary layer menuju turbulent boundary layer. Setelah melalui reattachment grafik cenderung konstan hingga terjadi separasi massif di buritan sebagai akibat dari ketidakmampuan aliran melawan shear stress dan adverse pressure pada daerah trailing edge.

Perbedaan signifikan antara pola distribusi Cp pada Ret $5,08 \times 10^4$ dan $8,46 \times 10^4$ terletak pada mundurnya titik separasi beserta penurunan level nilai koefisien tekanan pada leading edge seiring bertambahnya bilangan Reynolds. selanjutnya terletak pada Perbedaan maiunva titik *reattachment* pada Ret 8,46 x 10⁴ dibandingkan pada Ret 5,08 $x 10^4$. Selain itu juga terjadi sedikit perbedaan pada titik terjadinya separasi massif dimana pada Ret 5,08 x 10⁴ terjadi pada x/c 0,894 sedangkan pada Ret 8,46 x 10⁴ terjadi pada x/c0,910. Hasil perbandingan ini sesuai dengan teori dimana semakin besar kecepatan aliran freestream semakin besar pula momentum yang dimiliki oleh aliran tersebut. Mementum yang dimiliki aliran digunakan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi massif di buritan menjadi tertunda. Dengan demikian pada benda uji c/t 6,5, Ret 8,46 x 10⁴ lebih efektif untuk menunda separasi massif di daerah buritan.

Perbandingan selanjutnya dilakukan pada profil kecepatan sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.28 berikut. Pada kedua grafik menunjukkan perlambatan di dekat permukaan benda uji akibat melawan *shear stress* dan *adverse pressure*. Dapat diamati bahwa pada Re_t 8,46 x 10⁴ memiliki kecepatan aliran yang lebih besar di dekat permukaan dibandingakan profil kecepatan pada Re_t 5,08 x 10⁴.



Gambar 4.28 Profil kecepatan pada c/t 10

kinetic Energy pada c/t 10

Perbandingan grafik *turbulent kinetic energy* dapat diamati pada gambar 4.29. Timbulnya *turbulent kinetic energy* ini disebabkan oleh fluktuasi akibat adanya *rounded* pada *leading edge*. Energi tersebut akan ditransfer dalam bentuk energi kinetic aliran sebagai energi tambahan untuk melawan *adverse pressure* sehingga separasi massif pada daerah buritan dapat tertunda. Dari grafik perbandingan tersebut nampak bahwa untuk benda uji c/t 6,5 pada Re_t 8,46 x 10⁴ memiliki *turbulent kinetic energy* yang lebih kecil dibandingakan profil kecepatan pada Re_t 5,08 x 10⁴.

Adapun perbedaan pada karakteristik *separation bubble* dan *shape factor* disajikan pada tabel 4.11 berikut. Seiring dengan peningkatan *Reynolds number, bubble* yang terbentuk akan semakin pendek dan tebal serta memiliki sudut yang lebih kecil. Selain itu juga dapat memajukan titik *reattachment* sekaligus menunda titik separasi massif di buritan Sementara besaran *shape factor* pada table 4.12, pada *Re* yang lebih besar menunjukkan penurunan nilai H. Hal ini menandakan semakin besar *Reynolds number* yang diberikan akan meningkatkan tingkat fluktuasi aliran pada *turbulent* boundary layer ditandai dengan penurunan shape factor.

Tabel 4.11 Karakteristik Bubble c/t 6,5

c/t	Re t	h sp	x٥	ℓь	hь	lr		l m		θ
		aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
6,5	5,08 x 10 ⁴	0,031	0,0126	0,0371	0,003024	0,0497	0,0765	0,5805	0,8931	24,8990
6,5	8,46 x 10 ⁴	0,031	0,0126	0,0368	0,003211	0,0494	0,0760	0,5828	0,8966	23,6002

Tabel 4.12 Shape factor pada c/t 6,5

c/t	Re t	δ^*	θ	Н
6.5	5,08 x 10⁴	0.005918	0.00451	1.3122
6.5	8,46 x 10 ⁴	0.004282	0.003315	1.2917

Keterangan:

h sp	: tinggi stagnation point
Хo	: titik separasi di <i>leading edge</i>
ℓь	: panjang separation bubble
hь	: tinggi separation bubble
lr	: panjang reattachment
l m	: panjang massive separation
θ	: sudut separation bubble
H	: shape factor

4.5.2. Perbandingan konfigurasi c/t = 10 dengan Ret = $5,08 \ge 10^4$ dan Ret = $8,46 \ge 10^4$

Koefisien tekanan dapat mempermudah dalam mempelajari karakteristik aliran fluida yang dalam penelitian ini melalui *upperside thick plate-rounded leading edge*. Gambar 4.30 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan aliran (*Cp*) terhadap x/c yang melalui benda uji c/t 10 dengan Re_t 5,08 x 10⁴ dan 8,46 x 10⁴.



Gambar 4.30 Grafik koefisien tekanan pada c/t 10

Gambar 4.30 menyajikan perbandingan hasil metode numerik berupa distribusi koefisien tekanan (Cp) terhadap panjang relatif (x/c) pada benda uji c/t 10dengan 5,08 x 10⁴ dan 8.46 x 10⁴. Dari kedua grafik diketahui stagnation point atau nilai Cp maksimum bernilai 1 saat x/c 0. Selanjutnya kedua konfigurasi memiliki pola yang sama, yaitu menurun secara drastis yang kemudian diikuti oleh takikan kecil dan naik hingga dicapai *reattachment* sampai akhirnya terseparasi massif di buritan. Pada kedua grafik juga menunjukkan adanya *discontinuity* berupa sedikit penurunan nilai Cp yang kemudian naik Kembali hingga titik reattachment. Fenomena tersebut disebabkan oleh pelebaran streamtube (divergence streamtube) yang menyebabkan penurunan kecepatan. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari laminar boundary layer menuju turbulent boundary layer. Setelah melalui *reattachment* grafik cenderung konstan hingga terjadi separasi massif di buritan sebagai akibat dari ketidakmampuan aliran melawan shear stress dan adverse pressure pada daerah trailing edge.

Perbedaan signifikan antara pola distribusi Cp pada Ret 5.08×10^4 dan 8.46×10^4 terletak pada mundurnya titik separasi beserta penurunan level nilai koefisien tekanan pada leading edge seiring bertambahnya bilangan Reynolds. selanjutnya terletak Perbedaan pada majunya titik *reattachment* pada Ret 8,46 x 10⁴ dibandingkan pada Ret 5,08 x 10⁴. Selain itu juga terjadi sedikit perbedaan pada titik terjadinya separasi massif dimana pada Ret 5,08 x 10⁴ terjadi pada x/c 0,942 sedangkan pada Re_t 8,46 x 10⁴ terjadi pada x/c0,95. Hasil perbandingan ini sesuai dengan teori dimana semakin besar kecepatan aliran freestream semakin besar pula momentum yang dimiliki oleh aliran tersebut. Mementum vang dimiliki aliran digunakan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi massif di buritan menjadi tertunda. Dengan demikian pada benda uji c/t 10, Ret 8.46×10^4 lebih efektif untuk menunda separasi massif di daerah buritan.

Perbandingan selanjutnya dilakukan pada profil kecepatan sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.31 berikut. Pada kedua grafik menunjukkan perlambatan di dekat permukaan benda uji akibat melawan *shear stress* dan *adverse pressure*. Dapat diamati bahwa pada Re_t 8,46 x 10⁴ memiliki kecepatan aliran yang lebih besar di dekat permukaan dibandingakan profil kecepatan pada Re_t 5,08 x 10⁴.


Gambar 4.32 TurbulentGambar 4.31 Profilkinetic Energy pada c/t 10kecepatan pada c/t 10

Perbandingan grafik *turbulent kinetic energy* dapat diamati pada gambar 4.32. Energi tersebut akan ditransfer dalam bentuk energi kinetic aliran sebagai energi tambahan untuk melawan *adverse pressure* sehingga separasi massif pada daerah buritan dapat tertunda. Dari grafik perbandingan tersebut nampak bahwa untuk benda uji c/t 10 pada Re_t 8,46 x 10⁴ memiliki *turbulent kinetic energy* yang lebih kecil dibandingakan profil kecepatan pada Re_t 5,08 x 10⁴.

Adapun perbedaan pada karakteristik separation bubble dan shape factor disajikan pada tabel 4.13 berikut. Seiring dengan peningkatan Reynolds number, bubble yang terbentuk akan semakin pendek dan tipis serta memiliki sudut yang lebih kecil. Selain itu juga dapat memajukan titik reattachment sekaligus menunda titik separasi massif di buritan Sementara besaran shape factor pada table 4.14, pada Re yang lebih besar menunjukkan penurunan nilai H. Hal ini menandakan semakin besar Reynolds number yang diberikan akan meningkatkan tingkat fluktuasi aliran pada turbulent boundary layer ditandai dengan penurunan shape factor.

c/t	Re t	h sp	X٥	ℓь	hь	hь lr		l	m	θ
		aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
10	5,08 x 10 ⁴	0,035	0,0117	0,0631	0,006092	0,0748	0,0748	0,9258	0,9258	29,5520
10	8,46 x 10 ⁴	0,033	0,0117	0,0625	0,005943	0,0742	0,0742	0,9274	0,9274	27,6185

Tabel 4.14 Shape factor pada c/t 10

c/t	Re t	δ^*	θ	Н
10	5,08 x 10⁴	0.00645	0.004881	1.3215
10	8,46 x 10 ⁴	0.004697	0.003613	1.3000

Keterangan:

h sp	: tinggi stagnation point
X 0	: titik separasi di <i>leading edge</i>
ℓь	: panjang separation bubble
hь	: tinggi separation bubble
lr	: panjang reattachment
l m	: panjang massive separation
θ	: sudut separation bubble
H	: shape factor

4.5.3. Perbandingan konfigurasi $Re_t = 5,08 \ge 10^4 dan$ c/t = 6,5 dan c/t = 10

Koefisien tekanan adalah bilangan tak berdimensi yang menggambarkan tekanan relatif pada bidang aliran yang independen terhadap ukuran benda uji yang dilaluinya. Koefisien tekanan dapat mempermudah dalam mempelajari karakteristik aliran fluida yang dalam penelitian ini melalui *upperside thick plate-rounded leading edge*. Gambar 4.33 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan aliran (*Cp*) terhadap x/c dengan Re_t 5,08 x 10⁴ yang melalui benda uji c/t 6,5 dan c/t 10.



Gambar 4.33 Grafik koefisien tekanan pada Ret 5,08 x 10⁴

Gambar 4.33 menyajikan perbandingan hasil metode numerik berupa distribusi koefisien tekanan (Cp) terhadap panjang relatif (x/c) dengan Ret 5,08 x 10⁴ yang melalui benda uji c/t 6,5 dan c/t 10. Dari kedua grafik diketahui stagnation *point* atau nilai Cp maksimum bernilai 1 saat x/c 0. Selanjutnya kedua konfigurasi memiliki pola yang sama, yaitu menurun secara drastis hingga nilai Cp minimum dimana terjadinya separasi dengan level yang hamper sama, yang kemudian diikuti oleh takikan kecil dan naik hingga dicapai reattachment sampai akhirnya terseparasi massif di buritan. Pada kedua grafik juga menunjukkan adanya discontinuity berupa sedikit penurunan nilai Cp yang kemudian naik kembali hingga titik reattachment. Fenomena tersebut disebabkan oleh pelebaran streamtube (divergence *streamtube*) yang menyebabkan penurunan kecepatan. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari laminar boundary layer menuju *turbulent boundary layer*. Setelah melalui *reattachment* grafik cenderung konstan hingga terjadi separasi massif di buritan sebagai akibat dari ketidakmampuan aliran melawan *shear stress* dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*.

Perbedaan signifikan antara pola distribusi Cp pada benda uji c/t 6.5 dan c/t 10 terletak pada majunya titik reattachment seiring pertambahan panjang bidang tumpu aliran. Pada c/t 6,5 titik reattachment terjadi pada x/c 0,11 dengan nilai Cp sebesar -1,31, sedangkan pada c/t 10 terjadi pada x/c 0.067 dengan nilai Cp sebesar -1,31. Selain itu juga terjadi sedikit perbedaan pada titik terjadinya separasi massif dimana pada c/t 6,5 terjadi pada x/c 0.894 dengan nilai Cp sebesar -0,397, sedangkan pada c/t 10 terjadi pada x/c 0,942 dengan nilai Cp sebesar -0,332. Semakin panjang bidang tumpu aliran maka aliran akan memiliki momentum yang semakin besar pula. Momentum aliran tersebut digunakan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi menjadi tertunda pada daerah buritan. Pada grafik tersebut menunjukkan pola nilai Cp yang sama pada bagian upperside dimana pada c/t 10 lebih efektif untuk menunda separasi di daerah buritan.

Perbandingan selanjutnya dilakukan pada profil kecepatan sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.34 berikut. Dapat dilihat bahwa profil kecepatan y/δ terhadap u/U mengalami perlambatan akibat melawan *shear stress* dan *adverse pressure*. Semakin panjang bidang tumpu aliran akan lebih mampu meningkatkan sedikit kecepatan aliran dekat permukaan model uji sehingga momentum aliran sedikit bertambah. Momentum aliran ini digunakan untuk melawan *shear stress* dan *adverse pressure* sehingga separasi pada *trailing edge* lebih tertunda. Pada gambar 4.34 terlihat benda uji dengan variasi c/t 10 memiliki kecepatan dekat permukaan sedikit lebih kecil dibandingkan dengan c/t 6,5, yang mana tidak sesuai dengan teori.



kecepatan pada Re_{t} 5,08 x

Gambar 4.35 Turbulent kinetic Energy pada Re_t 5,08 x 10⁴

Dari gambar 4.35 dapat dilinat banwa *turbulent kinetic* energy yang merupakan fungsi k/U^2 dan y/δ disebabkan oleh fluktuasi yang terjadi akibat adanya rounded pada leading edge. Energi ini akan ditransfer dalam bentuk energi kinetik aliran sebagai energi tambahan untuk melawan adverse pressure sehingga separasi pada daerah buritan akan tertunda. Pada gambar 4.35 terlihat dengan variasi c/t 10 memiliki nilai turbulent kinetic energy dekat permukaan sedikit lebih kecil dibandingkan dengan c/t 6,5.

Adapun perbedaan pada karakteristik *separation bubble* dan *shape factor* disajikan pada tabel 4.15 berikut. Seiring dengan penambahan panjang bidang tumpu, *bubble* yang terbentuk akan semakin pendek dan tebal serta memiliki sudut yang lebih kecil. Selain itu juga dapat memajukan titik *reattachment* sekaligus menunda titik separasi massif di buritan Sementara besaran *shape factor* pada table 4.16, pada benda uji yang lebih panjang menunjukkan kenaikan nilai H. Hal ini menandakan semakin panjang bidang tumpu aliran akan meningkatkan fluktuasi aliran pada *turbulent boundary layer* ditandai dengan kenaikan *shape factor*.

c/t Ret	h sp	X٥	вь	hь	l	r	l	m	θ	
		aktual (m)	relatif (x/c)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
6.5	5,08 x 10 ⁴	0.031	0.0126	0.0639	0.003024	0.0497	0.0765	0.5805	0.8931	24.8990
10	5,08 x 10 ⁴	0.035	0.0117	0.0631	0.003092	0.0748	0.0748	0.9258	0.9258	22.5520

Tabel 4.15 Karakteristik Bubble $Re_t = 5.08 \times 10^4$

c/t	Re t	δ^{*}	θ	Н
6.5	5,08 x 10⁴	0.005918	0.00451	1.3122
10	5,08 x 10 ⁴	0.00645	0.004881	1.3215

Keterangan:

- h sp : tinggi stagnation point
- Xo : titik separasi di *leading edge*
- *l* b : panjang separation bubble
- *h* b : tinggi separation bubble
- *lr* : panjang *reattachment*
- *l* m : panjang *massive separation*
- θ : sudut separation bubble
- H : shape factor

4.5.4. Perbandingan konfigurasi $\text{Re}_t = 8,46 \ge 10^4 \text{ dan}$ c/t = 6,5 dan c/t = 10

Pengukuran dan perbandingan yang serupa dilakukan seperti pada variasi sebelumnya. Gambar 4.36 berikut menunjukkan grafik koefisien tekanan aliran (*Cp*) terhadap x/c dengan Re_t 8,46 x 10⁴ yang melalui benda uji c/t 6,5 dan c/t 10.



Gambar 4.36 Grafik koefisien tekanan pada Ret 8,46 x 10⁴

Gambar 4.36 menyajikan perbandingan hasil metode numerik berupa distribusi koefisien tekanan (Cp) terhadap panjang relatif (x/c) dengan Ret 8,46 x 10⁴ yang melalui benda uji c/t 6,5 dan c/t 10. Dari kedua grafik diketahui stagnation *point* atau nilai Cp maksimum bernilai 1 saat x/c 0. Selanjutnya kedua konfigurasi memiliki pola yang sama, yaitu menurun secara drastis hingga nilai Cp minimum dimana terjadinya separasi dengan level yang hampir sama, yang kemudian diikuti oleh takikan kecil dan naik hingga dicapai reattachment sampai akhirnya terseparasi massif di buritan. Pada kedua grafik juga menunjukkan adanya discontinuity berupa sedikit penurunan nilai Cp yang kemudian naik kembali hingga titik reattachment. Fenomena tersebut disebabkan oleh pelebaran streamtube (divergence streamtube) yang menyebabkan penurunan kecepatan. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari laminar boundary layer menuju turbulent boundary laver. Setelah melalui *reattachment* grafik cenderung konstan hingga terjadi separasi massif di buritan sebagai akibat dari ketidakmampuan aliran melawan shear stress dan adverse pressure pada daerah trailing edge.

Perbedaan signifikan antara pola distribusi Cp pada benda uji c/t 6,5 dan c/t 10 terletak pada majunya titik reattachment seiring pertambahan panjang bidang tumpu aliran. Pada c/t 6,5 titik reattachment terjadi pada x/c 0,09 dengan nilai Cp sebesar -1,425, sedangkan pada c/t 10 terjadi pada x/c 0,065 dengan nilai Cp sebesar -1,323. Selain itu juga terjadi sedikit perbedaan pada titik terjadinya separasi massif dimana pada c/t 6,5 terjadi pada x/c 0,91 dengan nilai Cp sebesar -0,315, sedangkan pada c/t 10 terjadi pada x/c 0,95 dengan nilai Cp sebesar -0,27. Semakin panjang bidang tumpu aliran maka aliran akan memiliki momentum yang semakin besar pula. Momentum aliran tersebut digunakan untuk melawan shear stress dan adverse pressure sehingga separasi menjadi tertunda pada daerah buritan. Pada grafik tersebut menunjukkan pola nilai Cp yang sama pada bagian upperside dimana pada c/t 10 lebih efektif untuk menunda separasi di daerah buritan.

Perbandingan selanjutnya dilakukan pada profil kecepatan sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.37 berikut. Dapat dilihat bahwa profil kecepatan y/δ terhadap u/U mengalami perlambatan akibat melawan *shear stress* dan *adverse pressure*. Semakin panjang bidang tumpu aliran akan lebih mampu meningkatkan sedikit kecepatan aliran dekat permukaan model uji sehingga momentum aliran sedikit bertambah. Momentum aliran ini digunakan untuk melawan *shear stress* dan *adverse pressure* sehingga separasi pada *trailing edge* lebih tertunda. Pada gambar 4.37 terlihat benda uji dengan variasi c/t 10 memiliki kecepatan dekat permukaan sedikit lebih besar dibandingkan dengan c/t 6,5.



Gambar 4.38 *Turbulent kinetic energy* pada Ret 8,46x10⁴

Gambar 4.37 Profil kecepatan pada Re_t 8,46 x 10⁴

Dari gambar 4.38 dapat dilihat bahwa *turbulent kinetic* energy yang merupakan fungsi k/U^2 dan y/δ disebabkan oleh fluktuasi yang terjadi akibat adanya rounded pada leading edge. Energi ini akan ditransfer dalam bentuk energi kinetik aliran sebagai energi tambahan untuk melawan adverse pressure sehingga separasi pada daerah buritan akan tertunda. Pada gambar 4.37 terlihat dengan variasi c/t 10 memiliki nilai *turbulent kinetic energy* dekat permukaan yang berimpit dengan c/t 6,5.

Adapun perbedaan pada karakteristik *separation bubble* dan *shape factor* disajikan pada tabel 4.17 berikut. Seiring dengan penambahan panjang bidang tumpu, *bubble* yang terbentuk akan semakin pendek dan tipis serta memiliki sudut yang lebih besar. Selain itu juga dapat memajukan titik *reattachment* sekaligus menunda titik separasi massif di buritan Sementara besaran *shape factor* pada table 4.18, pada benda uji yang lebih panjang menunjukkan kenaikan nilai H. Hal ini menandakan semakin panjang bidang tumpu aliran akan meningkatkan fluktuasi aliran pada *turbulent boundary layer* ditandai dengan kenaikan *shape factor*.

	, , , , , , , , , , , , , , , , ,											
c/t Ret	h sp	X٥	lь	hь	e	r	l	m	θ			
		aktual (m)	relatif (x/c)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat		
6.5	8,46 x 10 ⁴	0.031	0.0126	0.0634	0.003211	0.0494	0.0760	0.5828	0.8966	23.6002		
10	8,46 x 10 ⁴	0.033	0.0117	0.0625	0.002943	0.0742	0.0742	0.9274	0.9274	20.6185		

Tabel 4.17 Karakteristik Bubble $Re_t = 8,46 \times 10^4$

Tabel 4.18	Shape	factor	pada	$Re_t =$	$8,46 \times 10^4$
------------	-------	--------	------	----------	--------------------

c/t	Re t	δ^{*}	θ	Н
6.5	8,46 x 10 ⁴	0.004282	0.003315	1.2917
10	8,46 x 10⁴	0.004697	0.003613	1.3000

Keterangan:

h sp	: tinggi stagnation point
X o	: titik separasi di <i>leading edge</i>
ℓь	: panjang separation bubble
hь	: tinggi separation bubble
lr	: panjang reattachment
l m	: panjang massive separation
θ	: sudut separation bubble
H	: shape factor

4.6 Diskusi

Pada sub bab ini akan disajikan diskusi untuk menganalisa data-data yang telah dikemukakan pada sub bab sebelumnya mengenai pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan bilangan *Reynolds* dalam menunda separasi pada *thick plate-rounded leading edge*. Pada sub bab 4.4 menyajikan data dari setiap konfigurasi, sedangkan pada sub bab 4.5 menyajikan data perbandingan dari setiap variasi panjang bidang tumpu aliran dan bilangan *Reynolds*.

Gambar 4.39 menampilkan perbandingan grafik koefisien tekanan untuk semua konfigurasi, baik pada variasi bilangan Reynolds maupun panjang bidang tumpu. Dari perbandingan konfigurasi pada variasi panjang bidang tumpu aliran (sub bab 4.5.1 dan 4.5.2) menyatakan bahwa penambahan panjang bidang tumpu aliran dapat mempercepat reattachment sekaligus dapat separasi menunda terjadinya massif di daerah buritan. Perbandingan konfigurasi pada variasi bilangan Reynolds dapat sedikit mempercepat *reattachment*, namun tidak sesignifikan pada variasi panjang bidang tumpu aliran. Senada dengan hal tersebut, separasi massif di daerah buritan turut tertunda lebih ke belakang.





Sementara gambar 4.40 menampilkan perbandingan grafik profil kecepatan yang diambil pada titik O. Kedua variasi tidak memberikan pengaruh signifikan pada profil aliran dilihat dari grafik. Akan tetapi dapat diketahui bahwa semakin besar bilangan *Reynolds* yang diberikan akan memperbesar kecepatan aliran, sedangkan dengan menambah panjang bidang tumpu juga akan menambah kecepatan aliran atau memperbesar kurva profil kecepatan. Pada grafik TKE (gambar 4.41) perbedaan cukup jelas dan mudah diamati. Dapat diketahui bahwa semakin besar bilangan *Reynolds* yang diberikan akan memperkecil kurva atau semakin pipih, sedangkan dengan menambah panjang bidang tumpu juga akan memperkecil kurva.







Pada tabel 4.19 menunjukkan perbandingan karakteristik *separation bubble* untuk semua konfigurasi. Dapat disimpulkan bahwa memperbesar bilangan *Reynolds* akan memperpendek panjang *bubble* dan memperkecil sudut *bubble*, sementara ketebalan *bubble* tidak banyak berubah. Selain itu memperbesar bilangan *Reynolds* juga mempercepat *reattachment* sehingga dapat sedikit menunda separasi massif di daerah buritan. Sedangkan memperpanjang bidang tumpu aliran akan turut memperpendek *bubble*, mempertebal dan mengecilkan sudut *bubble* secara signifikan. *Reattachment* juga lebih cepat dicapai dengan memperpanjang bidang tumpu aliran, akibatnya separasi massif di buritan akan tertunda lebih ke belakang. Secara umum, variasi panjang bidang tumpu aliran memberikan pengaruh yang lebih besar dalam penundaan separasi massif di daerah buritan

dibandingkan dengan variasi bilangan *Reynolds*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa konfigurasi benda uji yang paling untuk menunda separasi massif di daerah buritan adalah pada *c/t 10* dengan Re_t = $8,46 \times 10^4$.

c/t Ret		h sp	X o	вь	hь	l	r	e	m	θ
		aktual (m)	relatif (x/c)	relatif (x/c)	aktual (m)	aktual (m)	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
6.5	5,08 x 10 ⁴	0.031	0.0126	0.0639	0.003024	0.0497	0.0765	0.5805	0.8931	24.8990
6.5	8,46 x 10 ⁴	0.031	0.0126	0.0634	0.003211	0.0494	0.0760	0.5828	0.8966	23.6002
10	5,08 x 10 ⁴	0.035	0.0117	0.0631	0.003092	0.0748	0.0748	0.9258	0.9258	22.5520
10	8,46 x 10 ⁴	0.033	0.0117	0.0625	0.002943	0.0742	0.0742	0.9274	0.9274	20.6185

Tabel 4.19 Karakteristik bubble semua konfigurasi

c/t	Re t	δ^{*}	θ	Н
6.5	5,08 x 10 ⁴	0.005918	0.00451	1.3122
6.5	8,46 x 10 ⁴	0.004282	0.003315	1.2917
10	5,08 x 10 ⁴	0.00645	0.004881	1.3215
10	8,46 x 10 ⁴	0.004697	0.003613	1.3000

Tabel 4.20 Shape factor pada semua konfigurasi

Keterangan:

h sp	: tinggi stagnation	point
-------------	---------------------	-------

- Xo : titik separasi di *leading edge*
- ℓb : panjang separation bubble
- **h**b : tinggi separation bubble
- *lr* : panjang *reattachment*
- ℓm : panjang *massive separation*
- θ : sudut separation bubble
- H : shape factor

Sementara besaran *shape factor* dapat diamati pada table 4.20. Dari mengamati nilai *shape factor*, didapati bahwa dengan memperbesar bilangan *Reynolds* akan menurunkan nilai *shape factor*, disisi lain dengan menambah panjang bidang tumpu justru akan meningkatkan nilai *shape factor* yang artinya memperkecil fluktuasi aliran pada *turbulent boundary layer* di titik O tersebut. Pengaruh bilangan *Reynolds* terhadap nilai *shape factor* dapat diperkuat dengan penelitian serupa yang dilakukan oleh **Wafa [12]** dengan konfigurasi benda uji yang sama namun dengan bilangan *Reynolds* yang berbeda (Re_t = $6,76 \times 10^4$ dan Re_t = $10,15 \times 10^4$) seperti pada tabel 4.21 untuk benda uji c/t 6,5 dan tabel 4.22 untuk benda uji c/t 10.

Tabel 4.21 Perbandingan Shape factor dengan penelitian lain padac/t 6,5

c/t	Re t	δ^*	θ	Н
6.5	5,08 x 10⁴	0.005918	0.00451	1.3122
6.5	6,76 x 104	0.005088	0.003906	1.3026
6.5	8,46 x 104	0.004282	0.003315	1.2917
6.5	10,15 x 10 ⁴	0.003653	0.002835	1.2885

Tabel 4.22 Perbandingan *Shape factor* dengan penelitian lain pada c/t 10

c/t	Re t	δ^*	θ	Н
10	5,08 x 10⁴	0.00645	0.004881	1.3215
10	6,76 x 104	0.004554	0.003483	1.3075
10	8,46 x 104	0.004697	0.003613	1.3000
10	10,15 x 10 ⁴	0.004203	0.003238	1.2980

r (-, -, -, -, -, -, -, -, -, -, -, -, -, -						
r/t	c/t Re t	вь	hь	l m	θ	
		, i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	relatif (x/c)	aktual (m)	relatif (x/c)	derajat
0.2	6.5	5,08 x 10 ⁴	0.0639	0.0030	0.8931	24.90
	6.5	8,46 x 10 ⁴	0.0634	0.0032	0.8966	23.60
	10	5,08 x 10 ⁴	0.0631	0.0031	0.9258	22.55
	10	8,46 x 10 ⁴	0.0625	0.0029	0.9274	20.62
0.1	6.5	5,08 x 10 ⁴	0.2120	0.1528	0.8850	42.10
	6.5	8,46 x 10 ⁴	0.2020	0.1368	0.8990	33.70
	10	5,08 x 10 ⁴	0.1360	0.1523	0.9410	37.60
	10	8,46 x 10 ⁴	0.1290	0.1363	0.9450	30.30

Tabel 4.23 Perbandingan karakteristik *separation bubble* dengan penelitian lain (r/t = 0,1)

Tabel 4.23 di atas menunjukkan perbandingan karakteristik bubble separation pada penelitian lain yang dilakukan oleh Irfani [13]. Penelitian tersebut dilakukan pada konfigurasi benda uji yang sama namun dengan rasio kelengkungan *leading edge* sebesar r/t =0,1 dan dengan bilangan Reynolds yang sama. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi bilangan Reynolds maka panjang separation bubble akan berkurang, begitu pula dengan mengecilnya sudut separasi serta semakin tertundanya titik separasi massif di buritan. Sementara dengan menambah panjang bidang tumpu aliran akan turut memperpendek separation bubble, mengecilkan sudut separasi dan menunda titik separasi massif di buritan. Fenomena ini sama seperti pada penelitian dengan rasio kelengkungan *leading edge (rounded)* r/t = 0.2. Rasio mempengaruhi kelengkungan leading edge karakteristik separation bubble yang ditimbulkan, yang mana pada rasio yang lebih kecil (r/t = 0,1) akan menghasilkan *separation bubble* yang lebih besar baik panjang maupun ketebalan serta sudut, sementara titik separasi massif di buritan tidak mengalami perbedaan signifikan. Dengan demikian penelitian Irfani [13] memperkuat penelitian yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah menganalisa karakteristik aliran yang melalui *thick* plate – rounded leading edge dengan variasi panjang bidang tumpu c/t 6,5 dan c/t 10 yang terkorelasi dengan bilangan Reynolds Re_t = $5,08 \times 10^4$ dan Re_t = $8,46 \times 10^4$ pada *upperside* baik secara eksperimen maupun numerik, maka didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- 1. Pada variasi panjang bidang tumpu aliran (*c/t* 6,5 dan *c/t* 10), seiring dengan penambahan panjang bidang tumpu, *separation bubble* yang terbentuk akan semakin pendek dan tipis serta memiliki sudut yang lebih besar, memajukan titik *reattachment* sekaligus menunda titik separasi massif di buritan serta meningkatkan fluktuasi aliran dilihat dai peningkatan nilai *shape factor*.
- 2. Pada variasi *Reynolds number* ($Re_t = 85,08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8,46 \times 10^4$) seiring dengan peningkatan *Reynolds number*, *separation bubble* yang terbentuk akan semakin pendek dan tipis serta memiliki sudut yang lebih kecil, memajukan titik *reattachment* sekaligus menunda titik separasi massif di buritan serta menurunkan fluktuasi aliran dilihat dari penurunan nilai *shape factor*
- 3. Variasi panjang bidang tumpu aliran (*c/t* 6,5 dan *c/t* 10) memberikan pengaruh yang lebih signifikan dalam penundaan separasi massif di daerah buritan dibandingkan dengan variasi *Reynolds number* ($Re_t = 85,08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8,46 \times 10^4$).
- 4. Secara keseluruhan, dengan memperpanjang bidang tumpu dan memperbesar *Reynolds number* akan mempercepat terjadinya *reattachment* dengan membentuk *separation bubble* yang lebih pendek, sehingga aliran dapat lebih cepat

bertransisi dari laminar ke turbulen yang mana akan menambah momentum aliran untuk melawan *adverse pressure*, yang kemudian dapat menunda separasi massif di buritan.

5.2. Saran

Berikut merupakan beberapa saran yang dapat diberikan setelah penelitian dilakukan untuk penelitian berikutnya adalah:

- 1. Kendala dari metode eksperimen adalah data profil kecepatan tidak dapat diambil karena ukuran *pitot static tube* yang terlalu besar.
- 2. Perlu ditinjau model turbulensi terbaik dari metode numerik dengan dibandingkan hasil antara *turbulence model k-kl-ω* dengan model turbulensi lainnya untuk menghasilkan profil *separation bubble* yang sesuai dengan hasil eksperimen.
- 3. Lokasi peletakan wind tunnel hendaknya pada tempat tertutup dan menggunakan *air conditioner*, sehingga gangguan dari luar seperti angin dan temperatur udara disekitar lokasi tidak mempengaruhi hasil pengukuran.
- 4. Perlu dilakukan peremajaan dan penambahan peralatan praktikum seperti *windtunnel* dan *data logger (daqpro*

DAFTAR PUSTAKA

- A. N. M. M. I. Mukut and M. Z. Abedin, "Review on Aerodynamic Drag Reduction of Vehicles," *Int. J. Eng. Mater. Manuf.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–14, 2019, doi: 10.26776/ijemm.04.01.2019.01.
- [2] E. Lamballais, J. Silvestrini, and S. Laizet, "Direct numerical simulation of flow separation behind a rounded leading edge: Study of curvature effects," *6th Int. Symp. Turbul. Shear Flow Phenomena, TSFP 2009*, vol. 2009-June, no. 3, pp. 1199–1204, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.12.007.
- [3] A. Choudhry, M. Arjomandi, and R. Kelso, "A study of long separation bubble on thick airfoils and its consequent effects," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 52, pp. 84–96, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.12.001.
- [4] M. M. Alam, L. J. Wang, C. W. Wong, and Y. Zhou, "Separation bubble characteristics on an axial flow over a cylinder with different noses," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 72, no. June, pp. 337–350, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.06.013.
- [5] I. Tani, "History of Boundary Layer Theory," Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 9, no. 1, pp. 87–111, 1977, doi: 10.1146/annurev.fl.09.010177.000511.
- [6] J. D. Anderson, "Ludwig Prandtl's boundary layer," *Phys. Today*, vol. 58, no. 12, pp. 42–48, 2005, doi: 10.1063/1.2169443.
- [7] J. P. Mollicone, F. Battista, P. Gualtieri, and C. M. Casciola,

- "Effect of geometry and Reynolds number on the turbulent separated flow behind a bulge in a channel," *J. Fluid Mech.*, vol. 823, pp. 100–133, 2017, doi: 10.1017/jfm.2017.255.
- [8] E. Erlangga, "Studi Eksperimental tentang Pengaruh Variasi Kelangsingan Leading Edge Pelat Datar terhadap Perkembangan Karakteristik Boundary Layer di atas Permukaan Datar di belakangnya.," *Jur. Tek. Mesin, FTI-ITS, Surabaya*, 2009.
- [9] T. R. Taha, An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics, vol. 6, no. 4. 2005.
- [10] N. Mulvany, L. Chen, J. Tu, and B. Anderson, "Steady-State Evaluation of Two-Equation RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) Turbulence Models for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations," *Dep. Defence, Aust. Gov.*, pp. 1–54, 2004.
- [11] T. J. Chung, Computational fluid dynamics, second edition, vol. 9780521769. 2010.
- [12] A. A. Wafa, "Studi Eksperimen dan Numerik Karakteristik Separation Bubble dari Aliran Dua Dimensi Pada Thick Plate–Rounded Leading Edge (r/t = 0.2) dengan Pengaruh Reynolds Number ($Re_t = 6.76 \times 10^4$ dan $Re_t = 10.15 \times 10^4$) dan Panjang Aksial (c/t = 6,5 dan c/t = 10)" Dept. Tek. Mesin, FTIRS-ITS, Surabaya, 2020.
- [13] A. H. Irfani, "Studi Eksperimen dan Numerik Karakteristik Separation Bubble dari Aliran Dua Dimensi Pada Thick Plate–Rounded Leading Edge (r/t = 0.1) dengan Pengaruh Reynolds Number ($Re_t = 5,08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8,46 \times 10^4$) dan Panjang Aksial (c/t = 6,5 dan c/t = 10)" Dept. Tek. Mesin, FTIRS-ITS, Surabaya, 2020.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Blitar, 01 September 1997 yang merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan di RA Nurul Huda Blitar. SDN Sentul 1 Blitar, SMPN 1 Blitar dan SMAN 1 Blitar. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2016, Penulis diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS melalui jalur SNMPTN dan terdaftar dengan NRP. 02111640000010.

Selama berkuliah, Penulis pernah menjadi bagian dari organisasi kemahasiswaan LBMM FTIRS-ITS pada Divisi Umum dan dipercaya sebagai Koordinator Kesekretariatan *Mechanic's Skill Competition 2018* Tingkat Nasional. Penulis pernah terlibat dalam kegiatan Pengabdian Masyarakat dari LPPM ITS tahun 2019 di UMKM Karoseri Pasuruan. Penulis juga aktif dalam organisasi kemasyarakatan ekstra kampus di bidang pendidikan anak.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"