

TUGAS AKHIR - TM 184835

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK
SEPARATION BUBBLE DARI ALIRAN DUA DIMENSI
MELINTASI *THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE*
($r/t = 0.1$), DENGAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER* ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ DAN $Re_t = 8.46 \times 10^4$) DAN PANJANG
AKSIAL PLAT ($c/t = 6.5$ DAN $c/t = 10$)**

**ABDUL HARIS IRFANI
NRP. 0211164000079**

**Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ing Herman Sasongko**

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



TUGAS AKHIR - TM 184835

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK
KARAKTERISTIK *SEPARATION BUBBLE* DARI
ALIRAN DUA DIMENSI MELINTASI *THICK
PLATE-ROUNDED LEADING EDGE* ($r/t = 0.1$),
DENGAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER* ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ DAN $Re_t = 8.46 \times 10^4$) DAN PANJANG
AKSIAL PLAT ($c/t = 6.5$ DAN $c/t = 10$)**

ABDUL HARIS IRFANI
NRP. 0211164000079

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ing Herman Sasongko
NIP. 196010041986011001

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



FINAL PROJECT - TM 184835

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY
SEPARATION BUBBLE CHARACTERISTICS OF
TWO DIMENSIONAL FLOW WITH THE EFFECT
OF REYNOLDS NUMBER ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ AND
 $Re_t = 8.46 \times 10^4$) AND AXIAL LENGTH OF PLATE
($c/t = 6.5$ AND $c/t = 10$) ON THICK PLATE-
ROUNDED LEADING EDGE ($r/t = 0.1$)**

**ABDUL HARIS IRANI
NRP. 0211164000079**

**Academic Supervisor:
Prof. Dr. Ing Herman Sasongko
NIP. 196010041986011001**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial And Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK *SEPARATION BUBBLE* DARI ALIRAN DUA DIMENSI MELINTASI *THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE* ($r/t = 0.1$) DENGAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER* ($Re_1 = 5.08 \times 10^4$ DAN $Re_1 = 8.46 \times 10^4$) DAN PANJANG AKSIAL PLAT ($c/t = 6.5$ 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
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Abdul Haris Irfani
NRP. 02111640000079

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko (Pembimbing)
NIP. 196010041986011001
2. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng. (Penguji I)
NIP. 196709151995121001
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. (Penguji II)
NIP. 196412281990031002
4. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. (Penguji III)
NIP. 197104051997021001

SURABAYA
AGUSTUS, 2020

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK 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 $c/t = 10$)

Nama Mahasiswa : Abdul Haris Irfani
NRP : 02111640000079
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko

ABSTRAK

Banyak modifikasi desain yang dilakukan oleh perusahaan alat transportasi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar. Salah satunya dengan cara mereduksi nilai drag force. Upaya tersebut dapat dilakukan dengan passive turbulent boundary-layer control. Penambahan rounded pada leading edge yang berkorelasi dengan panjang bidang tumpu aliran merupakan salah satu cara passive turbulent boundary-layer control yang dapat mempercepat transisi dari laminar boundary layer menjadi turbulent boundary layer. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh Reynolds number dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran sehingga separasi pada bagian downstream dapat tertunda.

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen dan numerik. Reynolds number yang digunakan adalah $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Test section penelitian ini adalah thick plate-rounded leading edge dengan panjang bidang tumpu aliran $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$. Besar rounded pada leading edge, ketinggian model uji, dan panjang trailing edge masing-masing adalah 10 mm, 100 mm, dan 300 mm. Parameter yang divariasikan dalam penelitian ini adalah panjang bidang tumpu aliran (c/t) dan

Reynolds number (Re_t). Pada metode eksperimen penempatan wall pressure tap berapa pada midspan. Sementara pada metode numerik dilakukan dengan menggunakan software gambit 2.4.6 dan ANSYS Fluent. Software gambit digunakan untuk membuat geometri dan meshing untuk test section, sedangkan software ANSYS Fluent digunakan untuk melakukan simulasi pada aliran. Turbulence model yang digunakan adalah k- κ - ω . Data hasil eksperimen berupa distribusi pressure coefficient (C_p). Sementara Data hasil numerik berupa pressure coefficient (C_p), tampilan kontur kecepatan dan kontur tekanan statis, tampilan streamline, tampilan vektor kecepatan, profil kecepatan, turbulent kinetic energy, shape factor, dan profil bubble separation.

Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini adalah dengan meperpanjang bidang tumpu aliran dan semakin besar Reynolds number dapat menunda terjadinya separasi di upperside pada thick plate-rounded leading edge. Panjang yang optimal dalam penundaan separasi adalah $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Profil separation bubble pada $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ memiliki panjang (x/c) = 0.129, tebal (y/t) = 0.1363, dan sudut (Θ) = 30.3° dengan shape factor (H) pada titik O sebesar 1.424. Secara keseluruhan, variasi paling optimal adalah pada $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ dimana separation point terjadi saat $x/c = 0.945$.

Kata kunci: Thick plate-rounded leading edge, Reynolds number, panjang bidang tumpu aliran

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF TWO DIMENSIONAL FLOW CHARACTERISTICS 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 $c/t = 10$) ON THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE ($r/t = 0.1$)

Student Name : Abdul Haris Irfani
NRP : 02111640000079
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Academic Supervisor : Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko

ABSTRACT

Many design modification has done by manufacturing transportation company to increase the efficiency of fuel consumption. One of them is by reducing the drag force. This effort can be made by passive turbulent boundary-layer control. Additional rounded at the leading edge that has correlation with the axial length is one of passive turbulent boundary-layer control methods that could accelerate the transition from laminar boundary layer to be turbulent boundary layer. Hence, this research aim is to know the effect of Reynolds number and axial length toward flow characteristic so can delay separation at downstream.

This research can be done by experiment and numerical methods, using $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. The test section of this research is a thick plate-rounded leading edge with axial length $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$. The rounded size at the leading edge, specimens height, and trailing edge length are 10 mm, 100 mm, dan 300 mm. Variation parameter at this research are axial length (c/t) and Reynolds number (Re_t). The placement of the wall pressure tap is on midspan. Meanwhile numerical methods is done by software gambit 2.4.6 dan ANSYS Fluent. Software gambit for

making the geometry and meshing for test section, while software ANSYS Fluent is used for doing simulation at streamline. Use k-kl- ω for turbulence model. Experiment data result is pressure coefficient (C_p). Meanwhile numerical data result is pressure coefficient (C_p), velocity contour and static pressure contour, streamline, velocity vector, velocity profile, turbulent kinetic energy, shape factor and bubble separation profile.

From this research we can conclude that additional axial length along with a bigger Reynolds number can delay separation in upperside at thick plate-rounded leading edge. Optimal length that can delay separation is $c/t = 10$ with $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Separation bubble profile happens at $c/t = 10$, $Re_t = 8.46 \times 10^4$, length (x/c) = 0.129, width (y/t) = 0.1363, and angle (Θ) = 30.3° with shape factor (H) at O point is 1.424. Overall, the optimal variation is $c/t = 10$ with $Re_t = 8.46 \times 10^4$ where separation point happens at $x/c = 0.945$.

Keywords: *Thick plate-rounded leading edge, Reynolds number, axial length*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas rahmat dan hidayah-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini izinkan penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberi ilmu selama bimbingan. Segala bimbingan serta masukan yang penulis terima hingga saat ini sangat membantu penulis untuk bisa berpikir lebih luas lagi dan mengembangkan wawasan penulis. Terimakasih atas bantuan dan kesabaran Bapak selama membimbing maupun mendidik saya.
2. Ibu, Alm. Bapak, Mbak Lia, Mas Afan, Gus Nashif, Daosat, Mbah Ibu serta keluarga besar saya tercinta yang senantiasa memberi dukungan baik moral maupun materi, motivasi, dan do'a hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Nur Ikhwan, S.T., M.Eng. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., dan Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih telah meluangkan waktunya dan atas saran-saran yang telah diberikan pada akhir sidang tugas akhir penulis.
4. Bapak Sutrisno, teknisi laboratorium mekanika fluida.
5. Narumi Dwi Ramadhanti, terimakasih sudah selalu membantu, mendukung, mendoakan dan memberikan semangat kepada penulis untuk segera menyelesaikan tugas akhir ini. Terimakasih juga sudah mengajak penulis makan serta jalan-jalan keliling Surabaya untuk menghilangkan stress saat kuliah.
6. Keluarga tugas akhir bapak Herman: Mas At, Mas Wafa, dan Ifa yang menjadi teman diskusi, selalu mendengarkan keluh

kesah penulis, dan memberikan saran dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

7. Seluruh fungsio perpan M58: Mas Prapiunch, Mbak Anin, Mas Andrew, Mas Hasan, Mas Uli, Mbak Carla, Mas Chris, Mbak Dimi, Mas Pogba, Mas Lukboy, Mas Adis, Mbak Mita, Mas Rezky, Mbak Rossi, Mbak Widi, Mas Wijdan, Mas Yuda, Mas Ucup, Mas Sakti, Mas Ipul, Mas Fajri, dan Mas Adji. Terimakasih sudah mau berbagi suka cita, duka cita, dan ilmu selama penulis menempuh perkuliahan di Teknik Mesin.
8. Seluruh fungsio perpan M59: Agung, Tri, Teo, Tedy, Shafira, Rozi, Richap, Raihan, Kenny, Favian, Fatir, Fayyadh, Chindy, Alfa, Albert, dan Aji. Terimakasih sudah mau berbagi suka cita, duka cita, dan ilmu selama penulis menempuh perkuliahan di Teknik Mesin.
9. Sahabat kuliah: Shaffan, Quraisy, dan Abib. Terimakasih karena selalu ingat kepada penulis, jalan-jalan bersama dan mendoakan penulis di setiap keadaan.
10. Seluruh teman teman angkatan M59. Terima kasih telah memberikan warna di kehidupan kampus penulis dan terimakasih atas kebaikannya kepada penulis selama ini.
11. Teman-teman *Student Exchange* dan teman-teman dari UTEm yang memberikan kenangan manis selama penulis menjalani masa perkuliahan di Malaysia.
12. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin ITS
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis
Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ... Error! Bookmark not defined.	
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Dasar Teori.....	7
2.1.1. <i>Boundary Layer Nomenclature</i>	7
2.1.1.1. <i>Displacement Thickness</i>	9
2.1.1.2. <i>Momentum Thickness</i>	10
2.1.1.3. <i>Shape Factor</i>	10
2.1.2. Separasi Aliran.....	11
2.1.3. <i>Bubble Separation</i>	12
2.2. Penelitian Terdahulu	14

2.3.	<i>Numerical Modelling</i>	20
2.3.1.	<i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	20
2.3.2.	Klasifikasi Model Turbulensi.....	21
2.3.3.	Deskripsi tentang <i>RANS Turbulence Modeling</i>	23
2.3.4.	Deskripsi tentang <i>Grid Independensi</i>	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		27
3.1.	Konfigurasi Uji.....	27
3.2.	Analisa Dimensi	29
3.3.	Metode Eksperimen	30
3.3.1.	Peralatan Eksperimen.....	30
3.3.2.	Pengambilan Data Eksperimen	32
3.4.	Metode Numerik	34
3.4.1.	<i>Mesh</i>	35
3.4.2.	<i>Grid Independence</i>	35
3.4.3.	<i>Boundary Condition</i>	36
3.4.4.	<i>Post Processing</i>	37
3.5.	Jadwal Pelaksanaan	38
3.6.	Diagram Alir Metode Eksperimen dan Numerik	38
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		41
4.1.	Validasi	41
4.2.	Analisa <i>Grid Independence</i>	46
4.3.	Gambaran Umum	47
4.3.1.	Visualisasi Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, <i>Streamline</i> dan Vektor Kecepatan Pada $c/t = 6.5$.	48

4.3.2.	Visualisasi Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, <i>Streamline</i> dan Vektor Kecepatan Pada $c/t = 10$.. 50
4.4.	Analisa Karakteristik Aliran..... 52
4.4.1.	Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ 53
4.4.2.	Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ 58
4.4.3.	Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ 62
4.4.4.	Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ 67
4.5.	Analisa Perbandingan Karakteristik Aliran..... 71
4.5.1.	Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ 72
4.5.2.	Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ 76
4.5.3.	Karakteristik Aliran Pada Variasi $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ 81
4.5.4.	Karakteristik Aliran Pada Variasi $Re_t = 8.46 \times 10^4$ dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ 86
4.6.	Diskusi..... 91
BAB V_PENUTUP 95	
5.1.	Kesimpulan 95
5.2.	Saran..... 96
DAFTAR PUSTAKA 97	
BIOGRAFI PENULIS 99	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	<i>Boundary layer</i> laminar dan turbulen sepanjang pelat datar	8
Gambar 2. 2	Profil kecepatan aliran laminar dan turbulen pada <i>boundary layer</i> dalam satu sumbu	8
Gambar 2. 3	Separasi pada <i>airfoil</i>	12
Gambar 2. 4	<i>Bubble separation</i> pada aliran laminar	13
Gambar 2. 5	Distribusi tekanan pada <i>bubble separation</i>	14
Gambar 2. 6	Profil <i>bubble separation</i>	15
Gambar 2. 7	Profil kecepatan aliran	16
Gambar 2. 8	Perbandingan profil <i>bubble separation</i> pada <i>body</i> 2 dimensi dan 3 dimensi	17
Gambar 2. 9	Perbandingan profil kecepatan pada <i>body</i> 2 dimensi (kanan) dan 3 dimensi (kiri).....	18
Gambar 2. 10	Perbandingan a) panjang <i>recirculation</i> b) tinggi <i>bubble separation</i> c) sudut <i>bubble separation</i> pada <i>body</i> 2D dan 3D	19
Gambar 2. 11	Profil <i>bubble separation</i>	20
Gambar 2. 12	Blok diagram simulasi dengan CFD	21
Gambar 2. 13	Karakteristik <i>Eddy</i> dalam turbulensi.....	21
Gambar 2. 14	<i>Energy Cascade</i> antara <i>Large Eddy</i> dengan <i>Small Eddy</i>	22
Gambar 2. 15	Pendekatan <i>Turbulence Modeling</i>	22
Gambar 2. 16	Grafik profil kecepatan pada 93% <i>C</i>	25
Gambar 3. 1	Parameter pengukuran.....	27
Gambar 3. 2	Konfigurasi uji	28
Gambar 3. 3	Penempatan model uji.....	29
Gambar 3. 4	Skema <i>wind tunnel</i> yang digunakan.....	31
Gambar 3. 5	<i>Wall pressure tap</i> pada benda uji.....	31

Gambar 3. 6	Skema validasi <i>manometer value</i> dengan nilai <i>pressure transducer</i>	33
Gambar 3. 7	Model <i>meshing thick plate-rounded leading edge</i> pada $c/t = 6.5$	35
Gambar 3. 8	Penentuan nilai parameter.....	36
Gambar 3. 9	Domain simulasi dan <i>boundary condition</i>	37
Gambar 3. 10	Hasil <i>post processing</i>	37
Gambar 3. 11	Jarak titik profil kecepatan dan <i>shape factor</i>	37
Gambar 3. 12	Diagram alir metode penelitian.....	39
Gambar 4. 1	Validasi koefisien tekanan hasil eksperimen dan numerik ($k-kl-\omega$)	41
Gambar 4. 2	Validasi koefisien tekanan hasil eksperimen dan numerik ($SST k-\omega$)	42
Gambar 4. 3	Validasi koefisien tekanan pada $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$	43
Gambar 4. 4	Validasi koefisien tekanan pada $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$	44
Gambar 4. 5	Validasi koefisien tekanan pada $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$	44
Gambar 4. 6	Validasi profil kecepatan hasil numerik antara $k-kl-\omega$ dan $SST k-\omega$	45
Gambar 4. 7	Perbandingan kontur kecepatan dan kontur tekanan pada (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$	49
Gambar 4. 8	Visualisasi <i>streamline</i> (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$	49
Gambar 4. 9	Perbandingan kontur kecepatan dan kontur tekanan pada (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$	51
Gambar 4. 10	Visualisasi <i>streamline</i> (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$	51
Gambar 4. 11	Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$..	53

Gambar 4. 12	Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) <i>leading edge</i> dan (b) <i>trailing edge</i>	55
Gambar 4. 13	Profil kecepatan pada <i>upper side</i> dititik O.....	56
Gambar 4. 14	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upper side</i> dititik O	57
Gambar 4. 15	Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$..	58
Gambar 4. 16	Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) <i>leading edge</i> dan (b) <i>trailing edge</i>	59
Gambar 4. 17	Profil kecepatan pada <i>upper side</i> dititik O.....	60
Gambar 4. 18	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upper side</i> dititik O	61
Gambar 4. 19	Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$..	63
Gambar 4. 20	Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) <i>leading edge</i> dan (b) <i>trailing edge</i>	64
Gambar 4. 21	Profil kecepatan pada <i>upper side</i> dititik O.....	65
Gambar 4. 22	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upper side</i> dititik O	66
Gambar 4. 23	Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$..	67
Gambar 4. 24	Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) <i>leading edge</i> dan (b) <i>trailing edge</i>	68
Gambar 4. 25	Profil kecepatan pada <i>upper side</i> dititik O.....	69
Gambar 4. 26	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upper side</i> dititik O	70
Gambar 4. 27	Grafik perbandingan C_p dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$	72
Gambar 4. 28	Profil kecepatan pada <i>upper side</i> dititik O.....	74
Gambar 4. 29	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upper side</i> dititik O	75
Gambar 4. 30	Grafik perbandingan C_p dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$	77
Gambar 4. 31	Profil kecepatan pada <i>upper side</i> dititik O.....	79
Gambar 4. 32	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upper side</i> dititik O	80

Gambar 4. 33	Grafik perbandingan C_p pada $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$	82
Gambar 4. 34	Profil kecepatan pada <i>upperside</i> dititik O.....	84
Gambar 4. 35	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upperside</i> dititik O	85
Gambar 4. 36	Grafik perbandingan C_p pada $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$	87
Gambar 4. 37	Profil kecepatan pada <i>upperside</i> dititik O.....	89
Gambar 4. 38	Plot <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>upperside</i> dititik O	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Analisis <i>grid</i> independensi dengan koefisien <i>drag</i> dan koefisien <i>lift</i>	25
Tabel 3. 1 Konfigurasi uji	28
Tabel 3. 2 Jadwal pelaksanaan penelitian	38
Tabel 4. 1 Analisa <i>grid independence</i> C_p di $x = 50\%C$ pada $c/t = 6.5$	47
Tabel 4. 2 Analisa <i>grid independence</i> C_p di $x = 50\%C$ pada $c/t = 10$	47
Tabel 4. 3 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	58
Tabel 4. 4 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	62
Tabel 4. 5 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	67
Tabel 4. 6 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	71
Tabel 4. 7 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	76
Tabel 4. 8 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	81
Tabel 4. 9 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	86
Tabel 4. 10 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	91
Tabel 4. 11 Analisa profil <i>separation bubble</i> , panjang <i>massive separation</i> , <i>stagnation point</i> , dan <i>shape factor</i>	92

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Banyak modifikasi desain yang dilakukan oleh perusahaan alat transportasi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar. Salah satunya dengan cara mereduksi nilai *drag force*. Penelitian tentang reduksi nilai *drag force* dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya metode *turbulent boundary-layer control*. Terdapat dua metode *turbulent boundary-layer control* yaitu *passive turbulent boundary-layer control* dan *active turbulent boundary-layer control*. Pada *passive turbulent boundary-layer control*, kontrol dilakukan dengan menambahkan *disturbance* permanen yang dipasang pada *object*. *Passive boundary-layer control* tidak memerlukan *power* tambahan untuk mengontrol alirannya, contohnya *vortex generator*, *gurney flap*, *V grooves*, dan lain-lain. Sementara pada *active boundary-layer control* lebih fleksibel karena menyesuaikan dengan kebutuhan yang diinginkan. *Active boundary-layer control* memerlukan *power* tambahan untuk mengontrol alirannya, contohnya *blowing*, *suction*, *synthetic jet*, dan lain-lain, **Corke dan Thomas [1]**.

Penggunaan *passive turbulent boundary-layer control* banyak digunakan pada *body* mobil, motor, sayap pesawat, dan kereta api. Seperti penelitian yang dilakukan oleh **Zakher et al [2]**. Zakher et al meneliti tentang efek *vortex generator* pada bagian belakang mobil sedan menggunakan metode numerik. Zakher et al menggunakan *vortex generator* berbentuk *wing* dengan ketinggian sebesar 25 mm dan memvariasikan *Reynolds number* antara 48.167×10^5 sampai 80.178×10^5 . Selain itu Zakher et al membandingkan hasil numerik pada mobil yang terpasang *vortex generator*, mobil tanpa *vortex generator*, dan desain aslinya. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa tidak ada desain yang sesuai untuk mereduksi nilai *drag coefficient* secara optimal untuk semua jenis *Reynolds number*. Pada *Reynolds number* kecil lebih direkomendasikan menggunakan desain original karena mampu mereduksi nilai *drag coefficient* lebih optimal dari desain lain.

Sedangkan pada *Reynolds number* besar lebih direkomendasikan menggunakan desain mobil yang terpasang *vortex generator* karena mampu mereduksi nilai *drag coefficient* lebih optimal dari desain lain.

Salah satu tujuan *passive turbulent boundary-layer control* yaitu mengupayakan terjadinya transisi pintas *boundary layer* dari laminar ke turbulen dengan melalui terbentuknya *bubble separation*. Terbentuknya *bubble separation* diawali dengan terjadinya separasi aliran yang kemudian *reattach*. Proses terbentuknya *bubble separation* yang langsung diikuti dengan terbentuknya *turbulent boundary layer* ini dimanfaatkan untuk dapat menunda bahkan meniadakan terjadinya separasi aliran permanen di daerah *downstream*. **Lamballais et al [3]** melakukan penelitian tentang *bubble separation* menggunakan metode numerik pada *thick half-plate*. Lamballais et al memvariasikan kelengkungan pada *leading edge* (η) yaitu 0.125, 0.25, 0.5, dan 1. Selain itu metode numerik yang dilakukan menggunakan *body* berbentuk 2 dimensi dan 3 dimensi untuk setiap ukuran kelengkungan, serta variasi *inlet excitation* (u'_{inflow}) sebesar 0 dan 0.1% dari U_{∞} . Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada *body* 3 dimensi *bubble separation* yang terbentuk 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 hasil tidak sesuai dengan teori utamanya *reversed flow* yang terbentuk dibandingkan dengan hasil *body* 3 dimensi. Selain itu Lamballais et al mengamati ketinggian *bubble separation* yang meningkat seiring dengan meningkatnya kelengkungan pada *leading edge*. Pada saat $\eta=1$ tinggi *bubble separation* sekitar +42% dan pada saat $\eta=0.125$ tinggi *bubble separation* sekitar +4% pada *body* 3 dimensi. Perubahan ukuran *bubble* tersebut tidak mempengaruhi sudut terbentuknya *bubble separation*.

Niu et al [4] juga meneliti tentang *drag forcere* dan *bubble sepeation* menggunakan metode numerik pada *high-speed train* dengan panjang *nose* kereta yang berbeda. Niu et al memvariasikan

panjang *nose* kereta menjadi pendek dan panjang tanpa adanya *angle of attack*. Penelitian tersebut menunjukkan efek dari panjang *nose* kereta dari 8 m ke 12 m dapat mereduksi *drag force* sebesar 30.53% dan menaikkan *lift force* sebesar 87.98%. Selain itu profil dari *boundary layer* dipengaruhi oleh panjang *nose* kereta dimana *bubble separation* lebih stabil pada hidung kereta yang lebih panjang.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, kesempatan untuk *reattach* membentuk *bubble separation* atas pengaruh *dynamic force* (*Reynolds number*) yang berkorelasi dengan panjang bidang tumpu aliran dan bentuk *leading edge* tertentu hampir tidak pernah diteliti. Dalam hal ini, panjang bidang tumpu aliran bermakna jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang. Hipotesis awal menyatakan bahwa memperpanjang bidang tumpu aliran dapat mempermudah terjadinya *reattach* aliran yang terseparasi pada daerah *leading edge*, mempengaruhi ukuran dari *separation bubble* yang terbentuk dan dapat menunda separasi aliran di daerah *downstream*. Maka dilakukan penelitian untuk mengoptimalkan penundaan separasi aliran pada daerah *downstream*. Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen yang divalidasi dengan metode numerik.

1.2 Rumusan Masalah

Aliran yang terseparasi pada daerah *leading edge* bisa *reattach* membentuk *bubble separation*. *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 terjadinya separasi aliran permanen di daerah *downstream*. Banyak orang meneliti tentang separasi aliran yang divariasikan antara *Reynolds number* dan bentuk *leading edge* pada *body* tertentu. Namun hampir tidak pernah diteliti korelasi antara pengaruh *dynamic force* (*Reynolds number*) dengan panjang bidang tumpu aliran. Maka muncul gagasan untuk melakukan penelitian terkait guna mengoptimalkan penundaan separasi aliran pada daerah *downstream*.

Dalam penelitian ini yang ingin saya kaji adalah kesempatan aliran untuk *reattach* membentuk *separation bubble* 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 $c/t = 10$). Hipotesis awal menyatakan bahwa memperpanjang bidang tumpu aliran dapat mempermudah terjadinya *reattach* aliran yang terseparasi pada daerah *leading edge*, mempengaruhi ukuran dari *bubble separation* yang terbentuk, dan dapat menunda separasi aliran di daerah *downstream*. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode numerik yang divalidasi menggunakan metode eksperimen.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan 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 dari hasil eksperimen maupun hasil numerik, profil kecepatan, *turbulent kinetic energy*, *shape factor*, dan profil *bubble separation* dari hasil numerik.
 - b. *Post processing* kualitatif berupa visualisasi aliran meliputi tampilan kontur kecepatan dan kontur tekanan statis, tampilan *streamline*, dan tampilan vektor kecepatan dari hasil numerik dengan perangkat lunak *ANSYS (Fluent)*.
2. Mengetahui panjang *separation bubble*, sudut *separation bubble* dan tebal *separation bubble*, panjang *massive separation*, *boundary layer thickness*, dan *shape factor* yang diperoleh dari hasil numerik.
3. Mengetahui variasi yang paling optimal untuk menunda *massive separation* di daerah *downstream*.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian ini menggunakan model uji *thick plate-rounded leading edge*, dimana bentuk *leading edge* dengan *rounded* 10 mm yang berkorelasi dengan panjang bidang tumpu aliran sepanjang 650 mm dan 1000 mm.
2. Penelitian dilakukan secara dua dimensi melalui pengukuran di *midspan*.
3. Karakteristik aliran yang diamati hanya pada *upperside* model uji.
4. Fluida kerja yang digunakan adalah udara, dengan sifat aliran pada *upstream* adalah *steady flow*, *incompressible viscous flow*, *uniform* di *inlet wind tunnel*, dan tidak terjadi perpindahan panas.
5. Pada metode numerik digunakan *software ANSYS Fluent* dengan *viscous model k- ϵ - ω* , *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet*, *outlet* didefinisikan sebagai *pressure outlet*, *pressure-velocity coupling* menggunakan *SIMPLEC* serta kriteria konvergensi sebesar 1×10^{-6} .

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya percobaan ini diharapkan membawa manfaat yaitu:

1. Mampu memahami, menjelaskan, dan membandingkan 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 $c/t = 10$) yang ditinjau secara analisa eksperimen maupun numerik.
2. Mengetahui fenomena aliran secara fisis dari analisa numerik disekitar *thick plate-rounded leading edge* melalui visualisasi aliran dengan perangkat lunak *ANSYS (Fluent)* 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 dari 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. PENUTUP

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

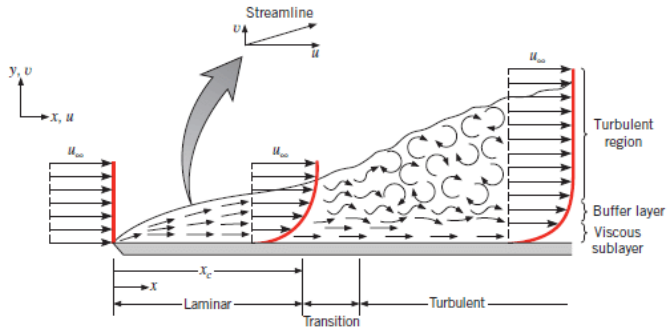
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1. *Boundary Layer Nomenclature*

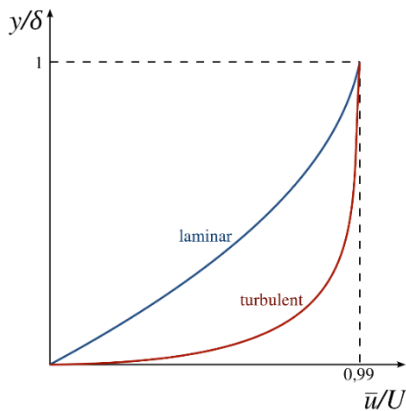
Boundary layer (lapis batas gesek) adalah zona yang membatasi antara daerah yang mengalami gesekan (*viscous*) dan daerah yang tidak mengalami gesekan (*inviscid*). Tebal *boundary layer* (*boundary layer thickness*) akan membesar secara polinomial. *Boundary layer thickness* (δ) diambil saat 99% dari kecepatan *inviscid* aliran yang melintasi suatu obyek. *Boundary layer* dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu laminar *boundary layer* dan turbulen *boundary layer* yang tergantung dengan besarnya harga bilangan Reynolds. Ketika suatu aliran fluida yang mengalir melintasi permukaan *solid surface*, maka akan terhambat karena adanya tegangan geser sehingga terbentuklah *boundary layer*. Awalnya *boundary layer* memiliki ketebalan yang tipis, dimana partikel fluida yang bergerak secara berlapis-lapis. Kondisi ini dikenal dengan *laminar boundary layer*. Semakin jauh partikel fluida bergerak dari ujung *solid surface* maka *boundary layer* akan mengalami peralihan aliran dari *boundary layer* laminar ke *boundary layer* turbulen melewati keadaan transisi. *Boundary layer* yang terbentuk pada kondisi ini dikenal dengan *transition boundary layer*. Faktor yang mempengaruhi lamanya proses transisi adalah ada atau tidak adanya *disturbance*, kekasaran permukaan, dan faktor yang berpengaruh dari luar. Setelah melewati keadaan transisi aliran fluida semakin tidak stabil dan banyak terjadi *eddies* (olakan, pusaran) didalamnya, sehingga terjadi pertukaran energi antar partikel yang lebih kuat. *Boundary layer* yang terbentuk pada kondisi ini dikenal dengan *turbulent boundary layer*. Proses pembentukan *boundary layer* pada

aliran fluida yang melewati pelat datar dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 *Boundary layer* laminar dan turbulen sepanjang pelat datar (Sumber : **Bani, [5]**)

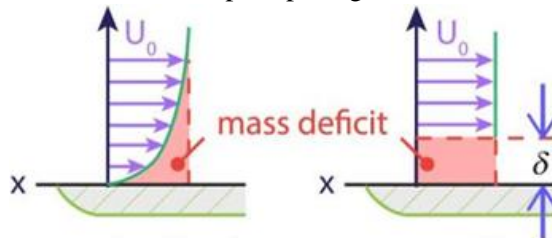
Sementara itu profil kecepatan pada aliran laminar dan turbulen didalam *boundary layer* dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Profil kecepatan aliran laminar dan turbulen pada *boundary layer* dalam satu sumbu (Sumber : **Bani, [5]**)

2.1.1.1. *Displacement Thickness*

Displacement thickness (δ^*) adalah ukuran defisit massa aliran (*mass flow deficit*) dalam *boundary layer*. Pada *external flow*, contohnya pada aliran yang melewati plat datar *displacement thickness* yang terjadi dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 *Displacement thickness* pada plat datar
(Sumber : **Bani**, [5])

Pada perumusan *displacement thickness* berasal dari penurunan rumus *mass flow rate* dengan asumsi *incompressible flow*, didapatkan rumus integrasi fungsi sebagai berikut.

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

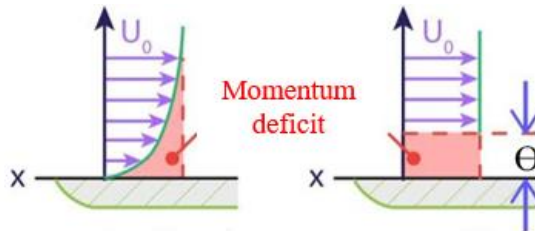
Jika rumus tersebut didekati dengan pendekatan integrasi numerik didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$\delta^* = \delta \times \sum_{i=0}^N \left(1 - \left\{\frac{u}{U}\right\}_i\right) \Delta \left\{\frac{y}{\delta}\right\}_i$$

Dimana : δ^* : *displacement thickness* (m)
 δ : *boundary layer thickness* (m)
 u : kecepatan dititik y (m/s^2)
 U : kecepatan didaerah *inviscid* (m/s^2)

2.1.1.2. *Momentum Thickness*

Momentum thickness (Θ) adalah ukuran defisit momentum aliran (*momentum flow deficit*) dalam *boundary layer*. Pada *external flow*, contohnya pada aliran yang melewati plat datar *momentum thickness* yang terjadi dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Momentum thickness* pada plat datar
(Sumber : Bani, [5])

Pada perumusan *momentum thickness* diasumsikan *incompressible flow* sehingga didapatkan rumus integrasi fungsi sebagai berikut.

$$\Theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

Jika rumus tersebut didekati dengan pendekatan integrasi numeric didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$\Theta = \delta \times \sum_{i=0}^N \left\{ \frac{u}{U} \right\}_i \left(\left(1 - \left\{ \frac{u}{U} \right\}_i\right) \Delta \left\{ \frac{y}{\delta} \right\}_i \right)$$

Dimana :

- Θ : *momentum thickness* (m)
- δ : *boundary layer thickness* (m)
- u : kecepatan dititik y (m/s^2)
- U : kecepatan didaerah *inviscid* (m/s^2)

2.1.1.3. *Shape Factor*

Shape factor (H) yaitu angka tak berdimensi yang diperoleh dari hasil perbandingan antara

displacement thickness dan *momentum thickness*. *Shape factor* merupakan salah satu parameter untuk mengetahui aliran yang melintas masih laminar atau turbulen. Pada perumusan *shape factor* diasumsikan *incompressible flow* sehingga didapatkan rumus sebagai berikut.

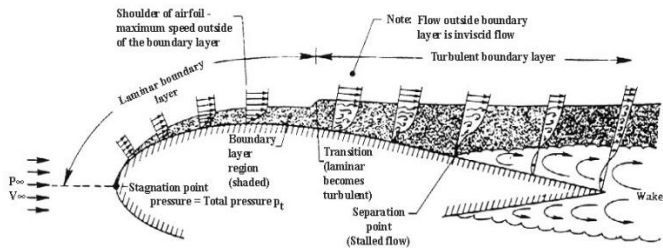
$$H = \frac{\delta^*}{\theta}$$

Pada *external flow* terdapat tiga analisa berdasarkan nilai *shape factor*. Jika nilai *shape factor* antara 3 sampai 3.5 menunjukkan aliran tersebut masih *laminar boundary layer*. Jika nilai *shape factor* antara 1.2 sampai 1.3 menunjukkan aliran tersebut didalam *turbulent boundary layer*. Dan *shape factor* bernilai 1 menunjukkan aliran *uniform (inviscid flow)*.

2.1.2. Separasi Aliran

Terjadinya separasi aliran atau *massive separation* pada dasarnya didominasi oleh adanya divergensi *streamtube* (spasi antara *streamline*) terdekat dengan dinding daripada efek friksi yang ada pada aliran. Divergensi *streamtube* akan membuat momentum yang dimiliki oleh aliran fluida berupa *inertia force* dan *dynamic force* tidak mampu untuk menahan gaya hambat (*viscous flow*) yaitu gaya gesek dan gaya akibat tekanan balik sehingga menimbulkan adanya *adverse pressure gradient* atau sering disebut *back pressure*. Saat terjadinya divergensi *streamtube*, kecepatan aliran fluida akan menurun searah dengan aliran. Sementara itu tekanan fluida yang mengalir akan semakin membesar sehingga menimbulkan *adverse pressure gradient*. Kondisi inilah yang menyebabkan momentum fluida tidak lagi mampu melawan gaya hambat, sehingga aliran akan terseparasi. Separasi dalam beberapa hal tidak berkesempatan untuk

reattach sehingga terjadi massive separation seperti pada gambar 2.5.

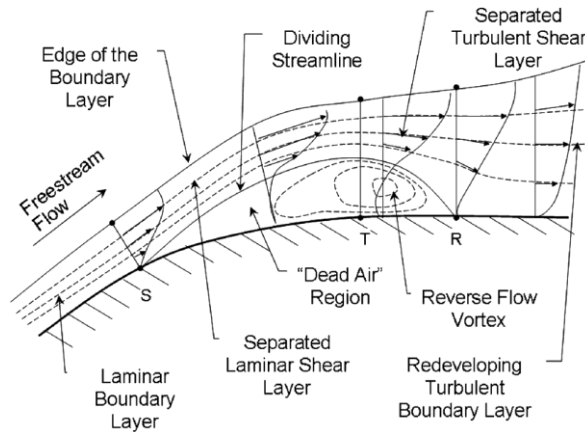


Gambar 2. 5 Separasi pada *airfoil* (Sumber : Khan, [6])

Aliran fluida yang melintasi *airfoil* akan mengalami separasi ketika momentum yang dimiliki oleh fluida lebih kecil dari gaya hambatnya. Saat aliran fluida mengalami separasi, di daerah *downstream* akan timbul *wake*. *Wake* adalah daerah titik mati aliran dimana aliran fluida didalam daerah tersebut dipenuhi *vortex* yang bertekanan rendah.

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 *downstream*. Contohnya pada aliran laminar. Pada aliran laminar Proses terbentuknya *bubble separation* pada aliran laminar dijelaskan pada gambar 2.6.

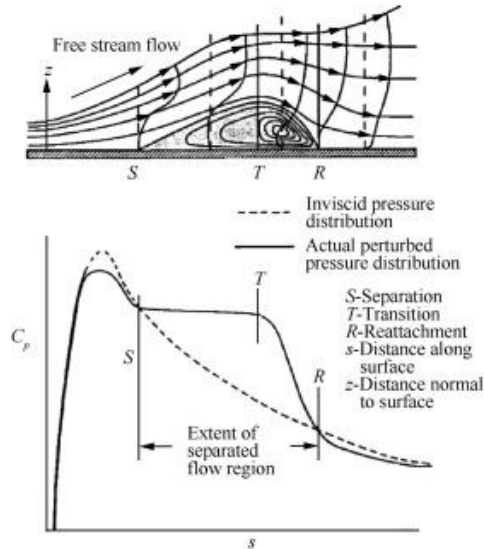


Gambar 2. 6 *Bubble separation* pada aliran laminar
(Sumber : **Esmailzadeh et al, [7]**)

Terbentuknya *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*.



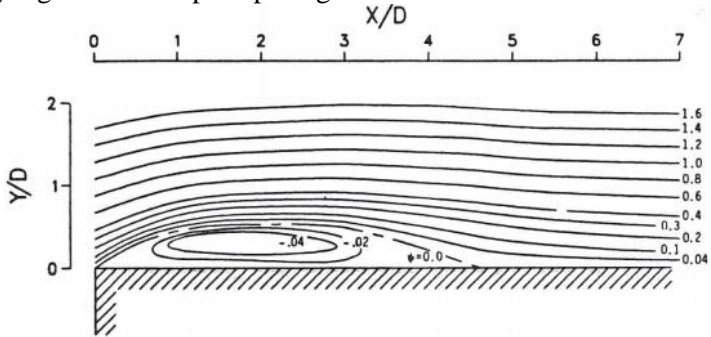
Gambar 2. 7 Distribusi tekanan pada *bubble separation*
(Sumber :Esmailzadeh et al, [7])

Dari distribusi tekanan pada gambar 2.7. tampak bahwa 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

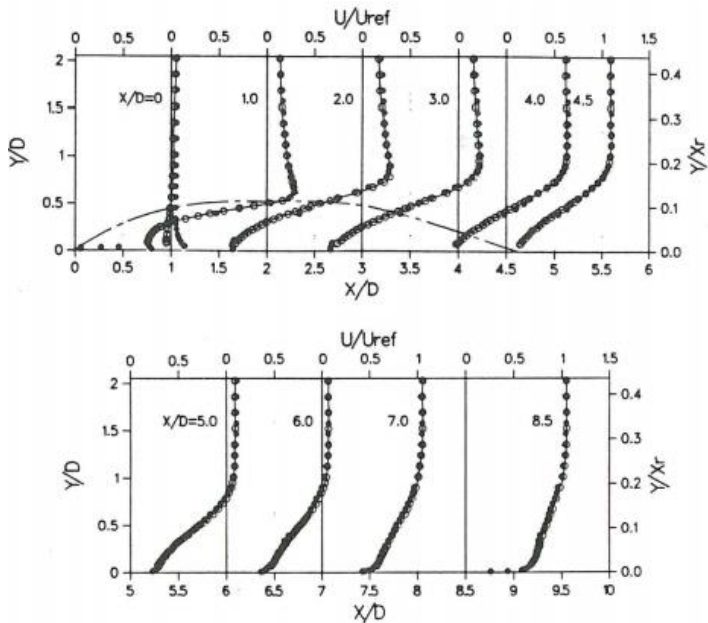
Djilalli dan Gartshore [8] meneliti tentang karakteristik *bubble separation* menggunakan metode eksperimen pada *bluff body* berupa *rectangular plate* dengan aliran turbulen. Djilalli dan Gartshore memvariasikan kecepatan fluida antara 4 - 15 m/s, dan *turbulent intensities* antara 0.25 – 0.4 %. Pada eksperimen ini, Djilalli dan Gartshore menggunakan *rectangular plate* berukuran 800 mm kearah chord, 89.9 mm kearah *thickness*, dan 1000 mm kearah *span* .

Penelitian tersebut menunjukkan semua hasil eksperimen memiliki bilangan Reynolds sekitar $5.0 \times 10^4 \pm 0.1 \times 10^4$. Selama terjadinya *bubble separation* ditemukan bahwa sekitar 30 % dari *bubble separation* merupakan *free stream velocity* dan sekitar 60 % atau lebih dari *bubble separation* merupakan daerah yang berisi *reversed flow*. Adapun *bubble separation* yang terbentuk seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Profil *bubble separation* (Sumber : Djlalli dan Gartshore, [8])

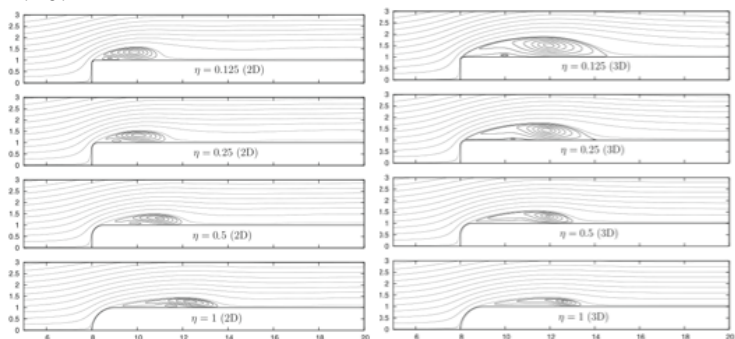
Selain itu Djlalli dan Gartshore juga mengamati profil kecepatan menggunakan *hot-wire* dan *pulsed-wire probes*. Ditemukan bahwa kecepatan pada *backflow* sebesar $0.3 U_\infty$ (pada daerah *reversed flow*), dimana kecepatan pada *backflow* relatif besar pada daerah didekat dinding. Proses terbentuknya profil kecepatan hasil eksperimen dari Djlalli dan Gartshore dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Profil kecepatan aliran (Sumber : Djilalli dan Gartshore, [8])

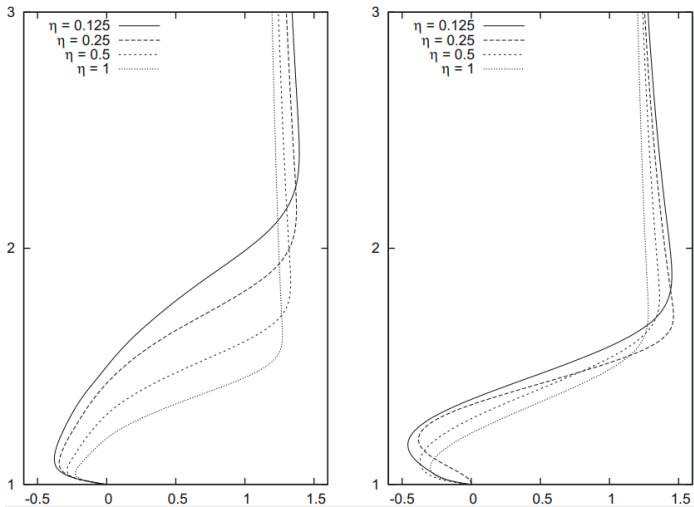
Lamballais et al [3] juga meneliti tentang *bubble separation* menggunakan metode numerik pada *thick half-plate*. Lamballais et al memvariasikan kelengkungan pada *leading edge* (η) yaitu 0.125, 0.25, 0.5, dan 1. Selain itu metode numerik yang dilakukan menggunakan *body* berbentuk 2 dimensi dan 3 dimensi untuk setiap ukuran kelengkungan, serta variasi *inlet excitation* (u'_{inflow}) sebesar 0 dan 0.1% dari U_{∞} . Pada penelitian ini, Lamballais menggunakan metode numerik *direct numerical simulation* (DNS), *thick half-plate* berukuran 20.25H kearah sumbu x, 16H kearah sumbu y, dan 6H kearah sumbu z, serta bilangan Reynolds sebesar 2000.

Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada *body* 3 dimensi *bubble separation* 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 terbentuk dapat dilihat pada gambar 2.10.



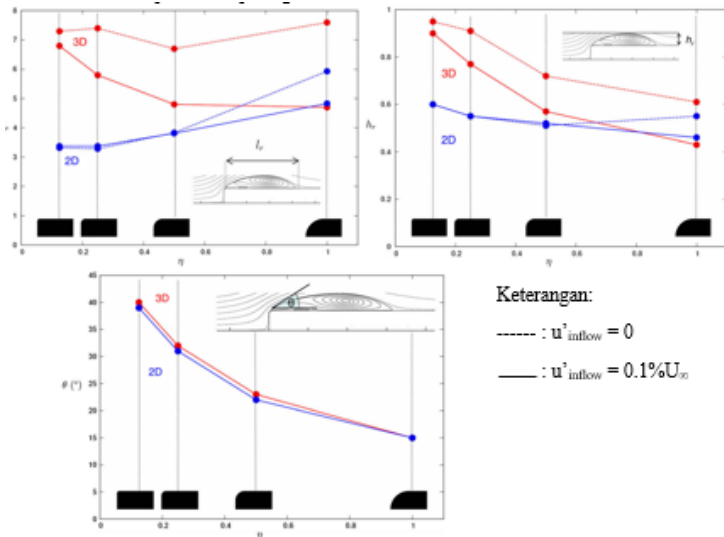
Gambar 2. 10 Perbandingan profil *bubble separation* pada *body* 2 dimensi dan 3 dimensi (Sumber : Lamballais et al, [3])

Selain itu 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 $\eta=1$ ke $\eta=0.125$ *backflow* meningkat sebesar +65 % baik pada *body* 2 dimensi maupun *body* 3 dimensi. Perbandingan profil kecepatan hasil eksperimen dari Lamballais et al dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Perbandingan profil kecepatan pada *body* 2 dimensi (kanan) dan 3 dimensi (kiri) (Sumber : **Lamballais et al, [3]**)

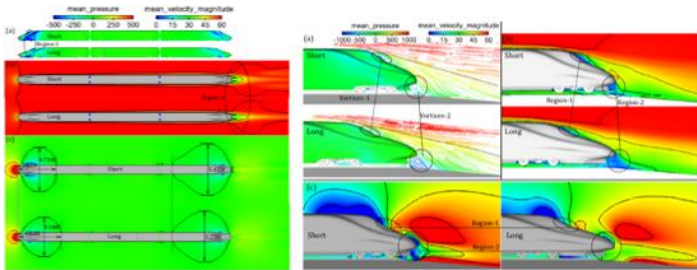
Lamballais et al juga mengamati panjang *recirculation* pada daerah *bubble separation*, tinggi *bubble separation*, dan sudut *bubble separation*. Pada *body* 3 dimensi panjang *recirculation* meningkat sebesar +60% saat $\eta=1$, dan meningkat sebesar +7% saat $\eta=0.125$. Sedangkan pada *body* 2 dimensi panjang *recirculation* meningkat sebesar +23% saat $\eta=1$, dan tidak lagi terpengaruh oleh kecepatan aliran masuk saat $\eta \leq 0.5$. Sementara itu, tinggi *bubble separation* menurun seiring dengan meningkatnya kelengkungan pada *leading edge*. Pada saat $\eta=1$ tinggi *bubble separation* sekitar +42% dan saat $\eta=0.125$ tinggi *bubble separation* sekitar +4% pada *body* 3 dimensi. Perubahan ukuran *bubble* tersebut tidak mempengaruhi sudut terbentuknya *bubble separation*. Perbandingan hasil numerik dari Lamballais et al dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Perbandingan a) panjang *recirculation* b) tinggi *bubble separation* c) sudut *bubble separation* pada *body* 2D dan 3D (Sumber : Lamballais et al, [3])

Niu et al [4] meneliti tentang *drag force* dan *bubble separation* menggunakan metode numerik pada *high-speed train* dengan panjang *nose* kereta yang berbeda. Niu et al memvariasikan panjang *nose* kereta menjadi pendek dan panjang tanpa adanya *angle of attack*. Niu et al menggunakan *software* Fluent 18.1 dengan inputan diantaranya model turbulen adalah SST $k-\omega$, *pressure and velocity coupling* adalah *SIMPLE* dengan *second order upwind*, kondisi *unsteady flow*, dan kecepatan inlet sebesar 50 m/s.

Penelitian tersebut menunjukkan efek dari panjang *nose* kereta dari 8 m ke 12 m dapat mereduksi *drag force* sebesar 30.53% dan menaikkan *lift force* sebesar 87.98%. Selain itu profil dari *boundary layer* dipengaruhi oleh panjang *nose* kereta dimana *bubble separation* lebih stabil pada *nose* kereta yang lebih panjang. Adapun *bubble separation* yang terbentuk seperti pada gambar 2.13.



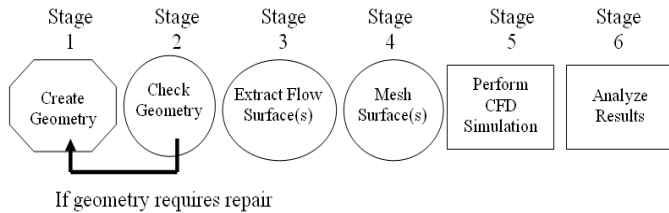
Gambar 2.13 Profil *bubble separation* pada nose kereta
(Sumber : Niu et al, [4])

2.3. Numerical Modelling

2.3.1. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah salah metode dalam ilmu mekanika fluida yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, momentum, perpindahan energi, dan fenomena aliran lain. CFD hakekatnya adalah perangkat *software* menggunakan *finite volume method* dengan meperlakukan fluida menjadi volume kecil-kecil dan melalui *algoritma* tertentu untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti kecepatan, tekanan, temperatur, dan *mass flow rate*.

Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *pre-processing* (menyusun geometri, *meshing*, dan menentukan *boundary conditions*), *solver* (diskretisasi persamaan, memasukkan properti fluida, dan menentukan nilai *boundary conditions*), *post-processing* (menampilkan hasil simulasi, seperti grafik, kontur, dan vektor). Prosedur CFD melalui tahapan seperti diagram pada gambar 2.14.



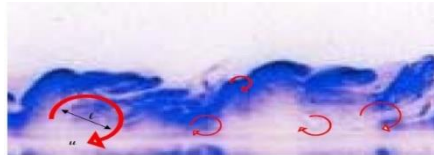
Gambar 2. 14 Blok diagram simulasi dengan CFD

(Sumber : Versteeg dan Malalasekera, [9])

Sampai saat ini, CFD telah banyak digunakan dalam bidang aplikasi, baik untuk keperluan riset optimasi desain maupun untuk aplikasi praktis. Beragam industri dari pembangkit listrik sampai industri perminyakan memanfaatkan untuk menganalisa sistem. Industri pembangkit listrik menggunakan untuk mensimulasikan pembakaran *coal* dalam *boiler* serta perpindahan panas yang terjadi. Industri perminyakan menggunakan untuk mensimulasikan aliran minyak yang keluar dari perut bumi. *Turbomachinery* menggunakan untuk menganalisa aliran dalam *rotating machine*.

2.3.2. Klasifikasi Model Turbulensi

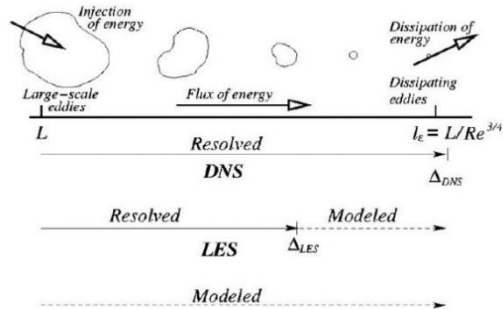
Turbulensi terjadi jika dalam aliran terdapat pusaran (*Eddy*), baik yang berukuran besar maupun kecil. Tiap ukuran *Eddy* memiliki karakteristik tertentu, sesuai dengan energi pusaran (kecepatan rotasi / *turbulent velocity scale* / u) yang dimilikinya.



Gambar 2. 15 Karakteristik *Eddy* dalam turbulensi

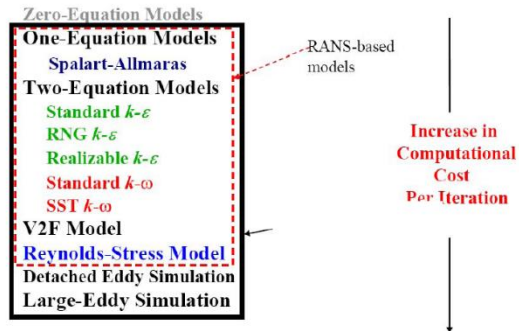
(Sumber : Versteeg dan Malalasekera, [9])

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. 16 Energy Cascade antara Large Eddy dengan Small Eddy

(Sumber : **Versteeg dan Malalasekera [9]**)



Gambar 2. 17 Pendekatan Turbulence Modeling

(Sumber : **Versteeg dan Malalasekera, [9]**)

2.3.3. Deskripsi tentang RANS Turbulence Modeling

- **Spalart-Allmaras** : merupakan model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan *transport* untuk viskositas turbulen. Model ini didesain secara khusus untuk aplikasi *aerospace*. *Spalart-Allmaras* hanya efektif pada *Reynolds number* kecil dan hasil simulasi yang relatif kasar.
- **Standard $k-\varepsilon$** : pemodelan yang menggunakan dua persamaan *transport* untuk menyelesaikan model $k-\varepsilon$. Model ini cocok untuk masalah *heating*, *buoyancy* dan *compressibility*, namun tidak cocok untuk aliran kompleks seperti pada *separation*.
- **RNG $k-\varepsilon$** : variasi pemodelan dari *Standard $k-\varepsilon$ model*. Model ini dapat memperbaiki model yang mempunyai *highly strained flows* dan cocok untuk *Reynolds number* yang rendah yang mempunyai efek *swirling*.
- **Realizable $k-\varepsilon$** : variasi pemodelan dari *Standard $k-\varepsilon$ model*. Dengan menggunakan model ini dapat dilakukan untuk menentang penggunaan *mathematical constrains*.
- **Standard $k-\omega$** : pemodelan yang menggunakan dua persamaan *transport model* untuk memecahkan $k-\omega$. Model ini cocok untuk *Reynolds number* kecil. Pemodelan ini efektif untuk menganalisa aliran yang terseparasi.
- **Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$** : variasi dari pemodelan *Standard $k-\omega$* . Model ini digunakan untuk meningkatkan akurasi $k-\omega$ model di *near-wall region* dimana *free stream* yang tidak tergantung pada k -model untuk aliran *external flow* dengan mengkombinasikan $k-\varepsilon$ model. *SST $k-\omega$* cocok untuk mensimulasikan aliran yang mempunyai *advers pressure gradient*.

- **Transition $k\text{-}\kappa\text{-}\omega$** : pemodelan yang menggunakan tiga persamaan *transport model* untuk memecahkan $k\text{-}\kappa\text{-}\omega$. Model ini cocok untuk *Reynolds number* kecil. Pemodelan ini digunakan untuk menganalisis transisi aliran dari aliran laminar menuju aliran turbulen.
- **Reynolds Stress Model (RSM)** : pemodelan yang menggunakan lima persamaan *transport* untuk memecahkan tegangan *Reynolds* menggunakan persamaan laju disipasi. Model ini mendekati persamaan *Reynolds Averaged Navier Stokes* dan cocok untuk mensimulasikan perubahan tiba-tiba pada aliran.

2.3.4. Deskripsi tentang *Grid Independensi*

Dari penelitian terdahulu saat melakukan simulasi, perlu memperhatikan *grid independensi*. Salah satu cara agar dapat menguji *grid independensi* adalah dengan melakukan *adaptive grids*. *Grid independensi* sendiri adalah solusi yang konvergen dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya *grid*. Didalam prakteknya *grid independensi* diindikasikan dengan menghaluskan *mesh* namun tidak berpengaruh secara signifikan pada *flow-field solution*. Pada pembahasan selanjutnya akan diambil contoh pada kasus *hydrofoil turbulent boundary layer separation* **Mulvany et al [10]**.

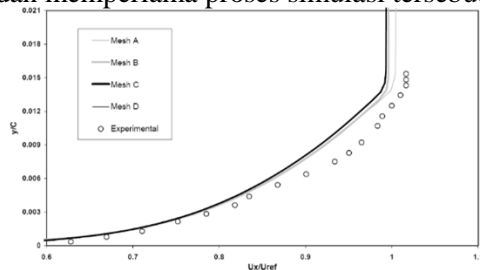
Pada penelitian Mulvany et al, *Grid independensi* menggunakan empat *mesh* dengan variasi jumlah *cell*. Penelitian ini menggunakan model *Realizable $k\text{-}\epsilon$* untuk simulasinya dengan kecepatan *freestream* sebesar 3 m/s. Pada tabel 2.1 diperlihatkan analisa koefisien *lift*, koefisien *drag* 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 independence* terpenuhi.

Tabel 2. 1 Analisis *grid* independensi dengan koefisien *drag* dan koefisien *lift*

	<i>Lift coefficient</i>		<i>Drag coefficient</i>	
	Predicted	Error	Predicted	Error
Experimental	0.5520		0.0027	
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 2.16 memperlihatkan grafik profil kecepatan pada 93%C menggunakan setiap *mesh*. Dapat dilihat profil kecepatan menggunakan *mesh* C dan *mesh* D yang memiliki *error* yang kecil dibandingkan *mesh* A dan *mesh* B. Selanjutnya dilakukan *mesh* yang lebih rapat (*mesh* D) dengan syarat tidak boleh menambahkan jumlah sel kurang dari 16% untuk mengecek bahwa *grid independence* telah terpenuhi. Pada umumnya keakuratan dari metode solusi numerik yang baik diiringi dengan meningkatnya jumlah dari *cell*. Namun penggunaan dari jumlah *cell* yang banyak akan menimbulkan *rounding error* dan memperlama proses simulasi tersebut.



Gambar 2. 18 Grafik profil kecepatan pada 93%C

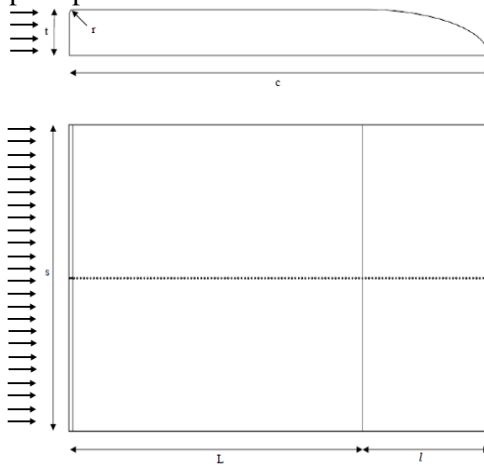
(Sumber : Mulvany et al, [10])

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

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.

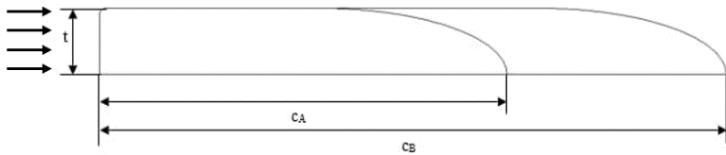


Gambar 3. 1 Parameter pengukuran

Dengan;

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

Model uji tersebut memiliki ketinggian 100 mm dengan ujung *rounded* sebesar 10 mm dan lebar sepanjang 660 mm. Panjang bidang tumpu aliran, yang merupakan variasi dalam penelitian ini, memiliki panjang 350 mm dan 700 mm dengan *trailing edge* berbentuk seperempat elips yang memiliki panjang tetap yaitu 300 mm. Kedua panjang bidang tumpu aliran tersebut akan diamati pada dua bilangan Reynolds yang berbeda, yaitu pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Sehingga penelitian ini memiliki konfigurasi uji sebagai berikut.

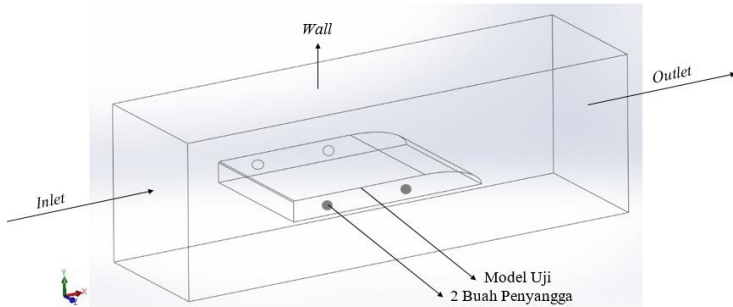


Gambar 3. 2 Konfigurasi uji

Tabel 3. 1 Konfigurasi uji

Konfigurasi	c/t	Re
A	6.5	5.08×10^4
B	6.5	8.46×10^4
C	10	5.08×10^4
D	10	8.46×10^4

Sementara penempatan model uji bersifat horizontal yang terletak pada tengah *test section*. Supaya tidak terjadi defleksi saat pengujian, digunakan dua buah penyangga yang terletak pada 70 mm setelah *leading edge* dan 50 mm sebelum *trailing edge*. Pada gambar 3.3 diperlihatkan penempatan model uji pada penelitian ini.



Gambar 3. 3 Penempatan model uji

3.2. Analisa Dimensi

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui variabel-variabel apa saja yang mempengaruhi 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 $c/t = 10$). 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 bidang tumpu aliran terhadap tinggi *body*

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

Hubungan antara grup tak berdimensi tersebut adalah sebagai berikut:

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

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} = f_1\left(\frac{\rho V_\infty t}{\mu}, \frac{r}{t}, \frac{c}{t}, \frac{l}{t}\right)$$

Pada penelitian ini, $\frac{r}{t}$ 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 plate-rounded leading edge* yang diujikan. Sehingga:

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} = f_2\left(\frac{\rho V_\infty t}{\mu}, \frac{c}{t}\right)$$

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

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

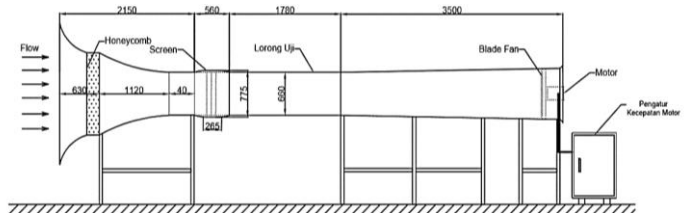
3.3. Metode Eksperimen

3.3.1. Peralatan Eksperimen

Peralatan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

1. *Wind Tunnel*

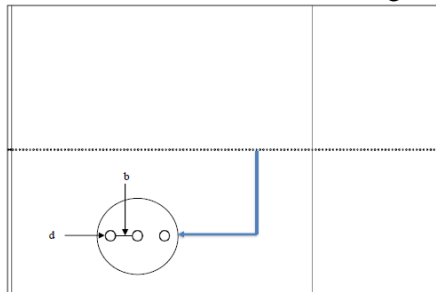
Wind tunnel merupakan tempat pengujian dari benda uji dengan *test section* berbentuk balok dengan panjang 1780 mm, lebar 660 mm dan tinggi 660 mm serta mampu beroperasi pada kecepatan maksimum 21 m/s. Pada gambar 3.4 diperlihatkan skema *wind tunnel* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3. 4 Skema *wind tunnel* yang digunakan

2. *Wall Pressure Tap*

Wall pressure tap digunakan untuk mengukur tekanan statis aliran fluida yang dipasang pada *upper side* permukaan benda uji seperti pada gambar 3.5. Pada variasi $c/t = 6.5$ berjumlah 156 *wall pressure tap* dan pada $c/t = 10$ berjumlah 223 *wall pressure tap*. Pada penelitian ini yang diukur adalah tekanan statis dan tekanan stagnasinya.



Gambar 3. 5 *Wall pressure tap* pada benda uji

3. *Pitot Static Tube*

Pitot static tube 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*.

4. *Pressure Transducer*

Pressure transducer berfungsi untuk mengukur besaran tekanan, tekanan yang terbaca akan diubah menjadi besaran arus.

5. Data Akuisisi

Data akuisisi berfungsi untuk mengetahui hasil data yang diperoleh dari *pressure transducer*.

6. Manometer

Manometer berfungsi untuk menyatakan besar tekanan yang terukur oleh *wall pressure tap*. Manometer yang digunakan memiliki fluida kerja *red oil* ($SG_{\text{red oil}} = 0.804$), dengan sudut kemiringan sebesar 15° untuk mempermudah pembacaan Δh yang terukur (*inclined manometer*).

7. Thermometer

Thermometer digunakan untuk mengukur temperatur fluida kerja untuk menentukan sifatnya.

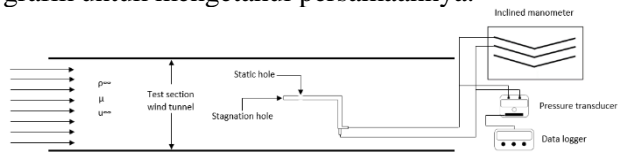
3.3.2. Pengambilan Data Eksperimen

3.3.2.1. Proses Kalibrasi Pengukuran *Pressure Transducer* dan Manometer

Untuk keakuratan data, maka dilakukan kalibrasi pengukuran antara data hasil pengukuran dengan menggunakan *pressure transducer* dan data hasil pengukuran dengan menggunakan manometer.

- a. Mempersiapkan peralatan yang digunakan, meliputi *wind tunnel*, *pitot static tube*, *pressure transducer*, data akuisisi, selang bercabang, manometer, dan termometer.
- b. Memposisikan *pitot static tube* agar terletak tepat di titik tengah *test section wind tunnel* dengan arah tegak lurus arah aliran menghadap *inlet wind tunnel*.
- c. Menyambungkan salah satu ujung masing-masing selang bercabang pada lubang *output* stagnasi dan lubang *output* statis dari *pitot static tube* kemudian masing-masing ujung lainnya ke manometer dan *pressure transducer*. Selang bercabang inilah yang menghubungkan *pitot static tube* ke manometer dan *pressure transducer*.

- d. Mengukur temperatur ruangan untuk menentukan *properties* udara.
- e. Membaca nilai awal ketinggian *red oil* manometer dan nilai awal *pressure transducer*.
- f. Menghidupkan *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 transducer* yang sudah diambil nilai rata-rata dari 22 kali pengambilan data pada satu titiknya melalui data akuisisi. 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 6 sampai 9 sampai frekuensi 48 Hz.
- k. Data Δh dari manometer diproses untuk 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 transducer*

3.3.2.2. Pengukuran Tekanan Statis

Prosedur yang dilakukan pada eksperimen ini diantaranya:

- 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.

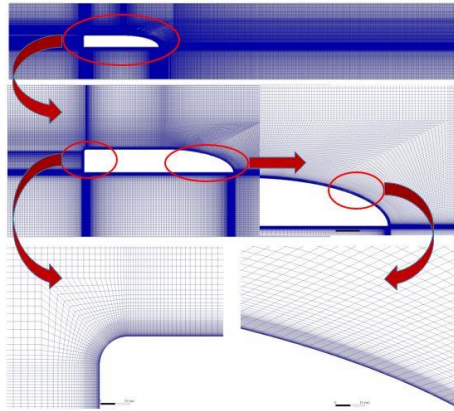
- b. Memastikan selang kapiler telah terpasang dan telah diberi penamaan dengan baik pada masing-masing *wall pressure tap*.
- c. Mencatat pembacaan awal pada *inclined manometer*.
- d. Menghidupkan *blower* dan mengatur putaran untuk mendapatkan kecepatan yang diinginkan, yaitu $V = 7.5$ m/s.
- e. Menghubungkan selang kapiler untuk *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 menggunakan *software ANSYS (Fluent)* dan dalam penelitian ini digunakan model uji berbentuk dua dimensi. Pemodelan yang digunakan adalah *viscous model* yaitu $k\text{-}\kappa\text{-}\omega$ serta *pressure-velocity coupling* yaitu *SIMPLEC* untuk mendapatkan hasil yang akurat dalam kontur baik tekanan maupun kontur 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 model uji diperlihatkan pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Model *meshing* *thick plate-rounded leading edge* pada $c/t = 6.5$

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*) 167784 dan diambil data C_P di salah satu titiknya. Selanjutnya *mesh* diperbanyak menjadi dua kali lipat 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 ± 10000 *cell* 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. Prosedur yang sama dilakukan pada $c/t = 10$.

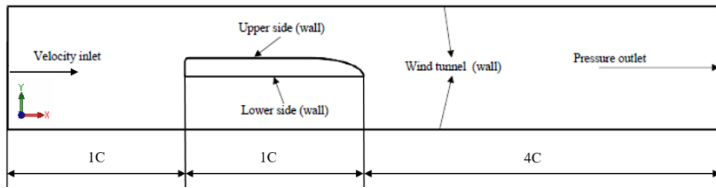
3.4.3. Boundary Condition

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*. Pada model uji untuk metode numerik diasumsikan sepanjang 1 *chord*, jarak *inlet* dan *leading edge* sepanjang 1 *chord*, dan jarak *trailing edge* dan *outlet* sepanjang 4 *chord*. Kondisi batas *inlet* diberi sesuai dengan variasi kecepatannya, yaitu 7.5 m/s dan 12.5 m/s, sedangkan pada *outlet* berupa *pressure outlet* sebesar 0 Pa. Pada penelitian ini *turbulence model* yang digunakan adalah *k-kl- ω* 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 nilai parameter dan batasan pada aliran diperlihatkan pada gambar 3.8. Sementara domain simulasi dan *boundary condition* diperlihatkan pada gambar 3.9.

The screenshot shows the 'Velocity Inlet' dialog box with the following settings:

- Zone Name: inlet
- Momentum: Selected
- Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary
- Reference Frame: Absolute
- Velocity Magnitude (m/s): 7.5 (constant)
- Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 (constant)
- Turbulence Specification Method: Intensity and Length Scale
- Turbulent Intensity (%): 4.1298
- Turbulent Length Scale (m): 0.0462

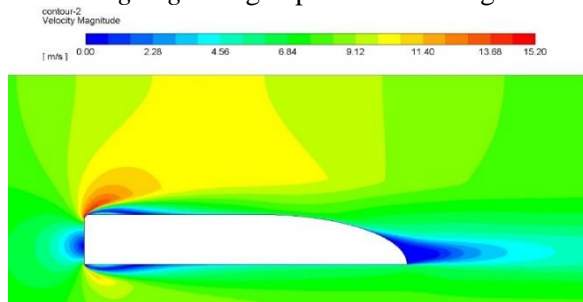
Gambar 3. 8 Penentuan nilai parameter



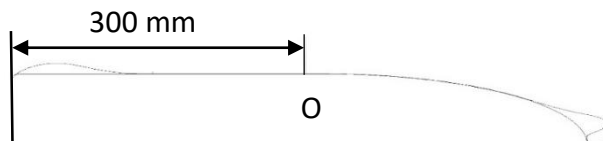
Gambar 3. 9 Domain simulasi dan *boundary condition*

3.4.4. *Post Processing*

Merupakan tampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh seperti kontur kecepatan, kontur tekanan, vektor kecepatan, *streamline*, dan tekanan statis yang selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung koefisien tekanan, serta profil kecepatan dan *shape factor* pada $x = 300$ mm dari *leading edge* dengan pendekatan integrasi numerik.



Gambar 3. 10 Hasil *post processing*



Gambar 3. 11 Jarak titik profil kecepatan dan *shape factor*

3.5. Jadwal Pelaksanaan

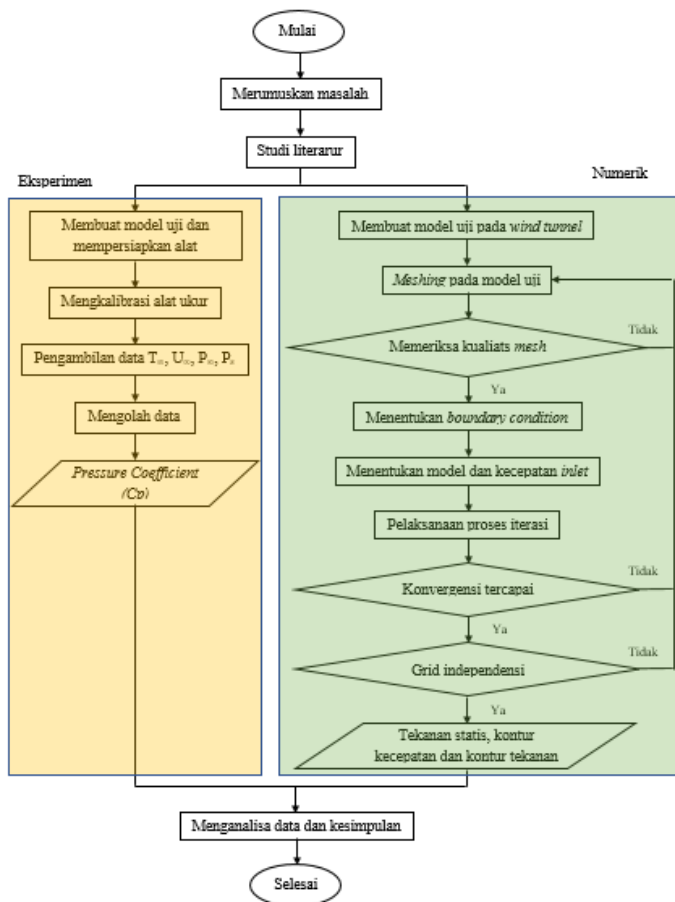
Jadwal pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Jadwal pelaksanaan penelitian

No	Kegiatan	Bulan																									
		Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli				Agustus	
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
1	Studi pustaka	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
2	Pelaksanaan simulasi numerik					■	■	■	■	■	■	■	■														
3	Persiapan bahan dan benda uji									■	■	■	■														
4	Setting alat ukur dan instalasi												■														
5	Pelaksanaan eksperimen													■	■	■	■	■	■	■	■						
6	Ujian proposal																	■	■	■	■						
7	Pengelakan data dan analisis data													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
8	Penulisan laporan tugas akhir									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
9	Ujian tugas akhir																									■	■

3.6. Diagram Alir Metode Eksperimen dan Numerik

Diagram alir dari metode eksperimen dan numerik yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.12.



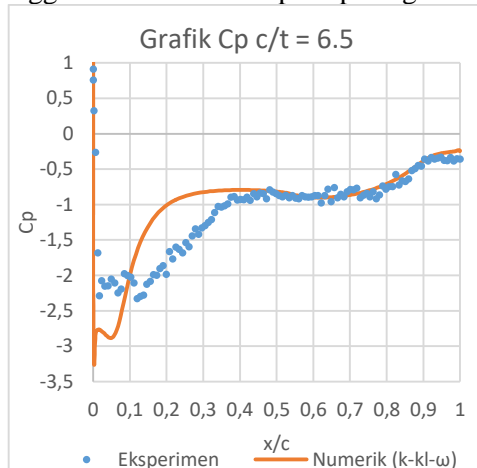
Gambar 3. 12 Diagram alir metode penelitian

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

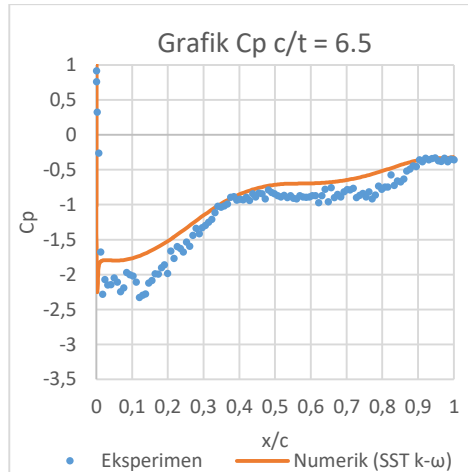
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Validasi

Data yang diperoleh dari hasil numerik kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen. Hal ini dilakukan untuk menguji kapabilitas dari model numerik yang digunakan untuk mensimulasikan *thick plate-rounded leading edge*. Validasi yang dilakukan adalah membandingkan nilai koefisien tekanan dibagian *upper side* dan profil kecepatan pada variasi $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$. Model uji yang digunakan dalam eksperimen maupun numerik memiliki bentuk *rounded* dan panjang bidang tumpu aliran yang sama. Pada metode numerik digunakan *viscous model k-kl- ω* dan *SST k- ω* untuk mencari hasil yang sesuai eksperimen. Perbandingan grafik koefisien tekanan antara hasil eksperimen dan hasil numeric dengan *k-kl- ω* diperlihatkan pada gambar 4.1. Sementara perbandingan grafik koefisien tekanan antara hasil eksperimen dan hasil numerik menggunakan *SST k- ω* seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4. 1 Validasi koefisien tekanan hasil eksperimen dan numerik (*k-kl- ω*)

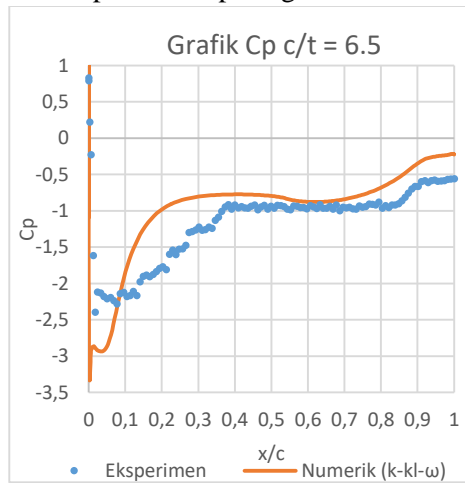


Gambar 4. 2 Validasi koefisien tekanan hasil eksperimen dan numerik (*SST k- ω*)

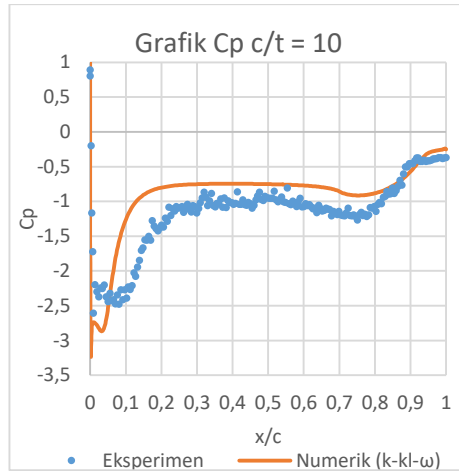
Berdasarkan gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c dari hasil numerik dengan *viscous model k-kl- ω* memiliki pola grafik yang sama dengan hasil eksperimen. Dimana aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam karena aliran melewati *convergence streamtube*. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil eksperimen maupun numerik dengan *k-kl- ω* terjadi *discontinuity*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali hingga titik *reattachment*. Hasil tersebut menunjukkan kesesuaian dengan teori yang ada bahwa tekanan statis cenderung bernilai konstan kemudian naik kembali pada daerah *separation bubble*. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi

melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Sedangkan hasil numerik dengan *viscous model SST k- ω* berbeda dengan hasil eksperimen dan teori, dimana tidak terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*.

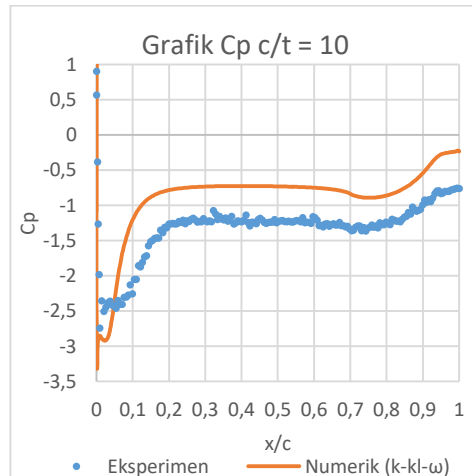
Sementara perbandingan nilai koefisien tekanan antara hasil eksperimen dan hasil numerik (*k-kl- ω*) pada ketiga konfigurasi lain dapat dilihat pada gambar 4.3 sampai 4.5.



Gambar 4. 3 Validasi koefisien tekanan pada $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$



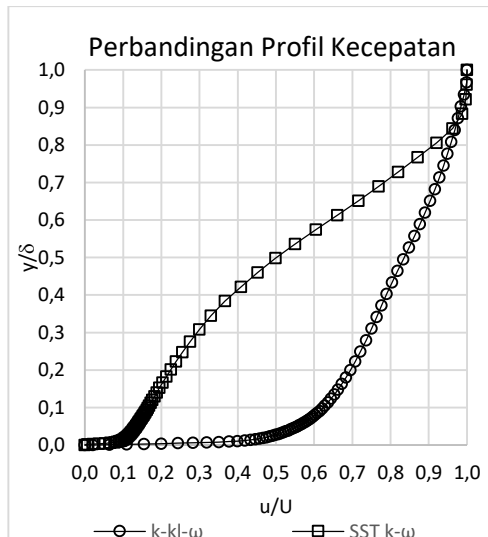
Gambar 4. 4 Validasi koefisien tekanan pada $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$



Gambar 4. 5 Validasi koefisien tekanan pada $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Secara keseluruhan, hasil metode numerik memiliki perbedaan dengan metode eksperimen pada panjang *separation bubble*. Hal ini dikarenakan keterbatasan penempatan *wall pressure tap* pada model uji untuk metode eksperimen sehingga tidak dapat diidentifikasi secara akurat terjadinya *reattachment point* dan nilai C_p minimum.

Untuk menentukan *viscous model* yang digunakan pada metode numerik maka diperlukan validasi berupa profil kecepatan. Perbandingan grafik profil kecepatan hasil numerik di titik O antara *viscous model k-kl- ω* dan *SST k- ω* diperlihatkan pada gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Validasi profil kecepatan hasil numerik antara *k-kl- ω* dan *SST k- ω*

Berdasarkan gambar 4.6 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ dari hasil numerik dengan *viscous model k-kl- ω* memiliki bentuk profil kecepatan yang sesuai dengan teori. Dimana profil kecepatan aliran didekat dinding memiliki momentum yang lebih besar yang digunakan untuk

melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Sedangkan hasil numerik dengan *viscous model SST k- ω* menunjukkan profil kecepatan yang berbeda dengan teori. Dimana profil kecepatan aliran didekat dinding memiliki momentum yang lebih kecil dan memiliki bentuk seperti bukan aliran turbulen. Seharusnya pada titik $x = 0.3$ m aliran yang melintasi *upper side* sudah *turbulent boundary layer* dalam kondisi rileks.

Pada umumnya metode numerik yang digunakan untuk mensimulasikan *external flow*, seperti penelitian **Niu et al [4]** digunakan *viscous model* yaitu *SST k- ω* . Namun berdasarkan hasil validasi, hasil dari *viscous model k-kl- ω* lebih sesuai dengan teori maupun hasil eksperimen. Sehingga pada penelitian ini digunakan *viscous model* yaitu *k-kl- ω* untuk mensimulasikan aliran yang melintasi *thick plate-rounded leading edge*.

4.2. Analisa Grid Independence

Grid independence dilakukan dengan memvariasikan jumlah *meshing* pada *thick plate-rounded leading edge* dengan panjang bidang tumpu aliran $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$. *Meshing A* merupakan *meshing* yang paling renggang dimana pada $c/t = 6.5$ dengan jumlah *cell* 167784, sedangkan pada $c/t = 10$ dengan jumlah *cell* 213304. Sementara *Meshing E* adalah *meshing* yang paling rapat dimana pada $c/t = 6.5$ dengan jumlah *cell* 334452, sedangkan pada $c/t = 10$ dengan jumlah *cell* 424248. Dari hasil iterasi diperoleh nilai C_p seperti pada tabel 4.1 untuk $c/t = 6.5$ dan pada tabel 4.2 untuk $c/t = 10$.

Tabel 4. 1 Analisa *grid independence* C_p di $x = 50\%C$ pada $c/t = 6.5$

<i>Meshing</i>	Jumlah <i>cell</i>	C_p 50% C	Error (%)	Y^+
A	167784	-0.81862	-	3.01
B	176584	-0.81871	0.011	3.01
C	186932	-0.81912	0.061	3.01
D	196986	-0.82103	0.29	3.01
E	334452	-0.82953	1.33	3.009

Tabel 4. 2 Analisa *grid independence* C_p di $x = 50\%C$ pada $c/t = 10$

<i>Meshing</i>	Jumlah <i>cell</i>	C_p 50% C	Error (%)	Y^+
A	213304	-0.75192	-	3.001
B	221664	-0.7521	0.024	3.001
C	231264	-0.75224	0.043	2.999
D	241384	-0.75235	0.057	2.999
E	424248	-0.76152	1.28	2.998

Dari tabel 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa pada *meshing* A, B, C, dan D memiliki penambahan jumlah *cell* sebanyak ± 10.000 , sementara pada *meshing* E memiliki penambahan jumlah *cell* dua kali lipat dari *meshing* A **Anderson** [11]. Berdasarkan hasil iterasi, nilai C_p pada semua jenis *meshing* hampir sama ($error \leq 2\%$). Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa dengan menambah jumlah *cell*, perubahan nilai C_p sudah tidak signifikan lagi sehingga tercapai *grid independence*. Selanjutnya akan digunakan variasi *meshing* A untuk melakukan solusi numerik pada pemodelan *Fluent*.

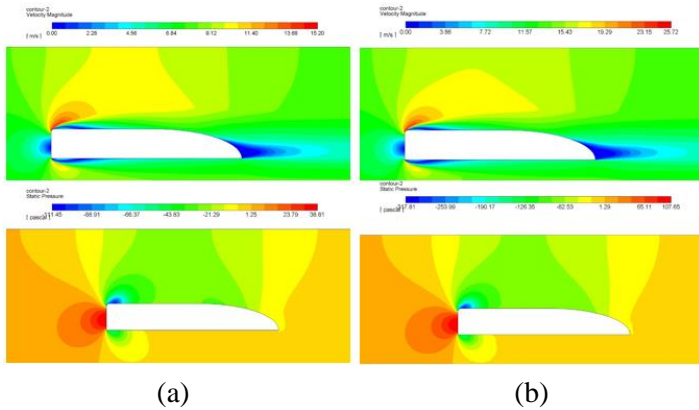
4.3. Gambaran Umum

Panjang dari bidang tumpu aliran dan besar *Reynolds number* dapat mempengaruhi profil *separation bubble* yang terbentuk dimana dapat mempercepat transisi *laminar*

boundary layer menuju *turbulent boundary layer*. Pada *turbulent boundary layer*, kecepatan dekat permukaan nilainya lebih besar dibandingkan *laminar boundary layer*. Pada sub bab ini disajikan visualisasi berupa kontur kecepatan, kontur tekanan, *streamline* dan vektor kecepatan pada $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ untuk mengetahui perubahan pola aliran yang melintasi *thick plate-rounded leading edge*.

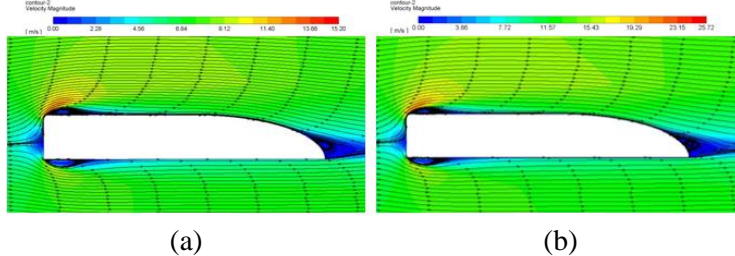
4.3.1. Visualisasi Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, *Streamline* dan Vektor Kecepatan Pada $c/t = 6.5$

Salah satu kelebihan dari metode numerik yaitu dapat diketahui perubahan pola aliran yang melewati *thick plate-rounded leading edge*. Perubahan pola aliran tersebut dapat ditampilkan dengan visualisasi kontur kecepatan maupun kontur tekanan yang dihasilkan dari solusi yang konvergen dengan metode numerik. Berdasarkan gambar 4.7 pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$ memiliki besar kecepatan antara 0 sampai 15.20 m/s dan tekanan statis antara -111.45 sampai 38.81 pascal. Sementara pada $Re_t = 8.46 \times 10^4$ memiliki besar kecepatan antara 0 sampai 25.72 m/s dan tekanan statis antara -317.81 sampai 107.65 pascal. Pada gambar 4.18 dibandingkan kontur kecepatan dan kontur tekanan pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ yang memiliki tampilan visualisasi aliran yang hampir sama walaupun *range* nilainya berbeda.



Gambar 4. 7 Perbandingan kontur kecepatan dan kontur tekanan pada (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Untuk menjelaskan fenomena aliran yang terjadi di sekitar *thick plate-rounded leading edge*, dapat dijelaskan secara kualitatif melalui visualisasi *streamline* yang dikombinasikan dengan kontur kecepatan dari hasil numerik seperti pada gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Visualisasi *streamline* (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$

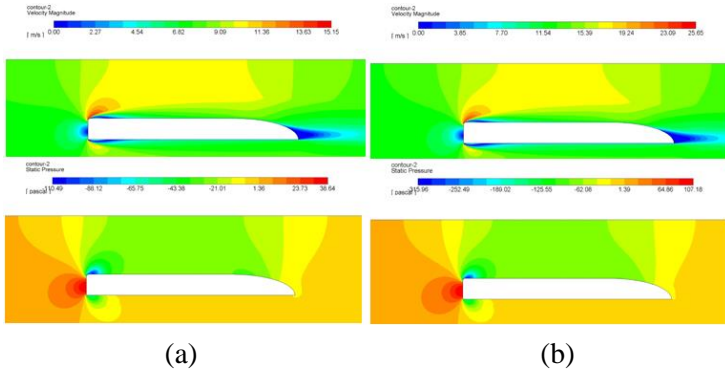
Berdasarkan gambar 4.8 diperlihatkan visualisasi *streamline* aliran pada *thick plate-rounded leading edge* dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Pada visualisasi aliran, terlihat bahwa titik stagnasi tidak tepat pada tengah dari

model uji akibat adanya *rounded* pada *upper* di *leading edge*. Hal ini menyebabkan aliran dipercepat pada *leading edge* dan terjadi separasi aliran setelah melewati *rounded*. Kemudian momentum aliran akan bertambah besar akibat melewati *convergence streamtube*. Hal ini ditandai dengan kontur warna merah pada *upper* di *leading edge thick plate-rounded leading edge*. Setelah itu aliran akan melewati *divergence streamtube* dimana kecepatan aliran akan tereduksi yang ditandai dengan kontur warna biru muda. Terlihat bahwa aliran tersebut membentuk *bubble separation* yang ditandai dengan adanya *reattachment point* dimana berubahnya kontur warna biru muda menjadi warna hijau pada daerah dekat model uji pada jarak tertentu dari *leading edge*. Pada saat *reattach* terjadi transisi dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Selanjutnya aliran yang memiliki momentum lebih besar menuju ke daerah *trailing edge*. Saat melewati daerah *trailing edge* aliran mengalami *massive separation*. Hal ini terjadi kerana momentum yang dimiliki aliran tidak mampu lagi untuk melawan *adverse pressure* dan tegangan geser. Daerah di belakang *separation point* merupakan daerah yang memiliki kecepatan yang sangat rendah dan berisi pusaran (*eddies*). Daerah ini disebut daerah *wake*.

4.3.2. Visualisasi Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, Streamline dan Vektor Kecepatan Pada $c/t = 10$

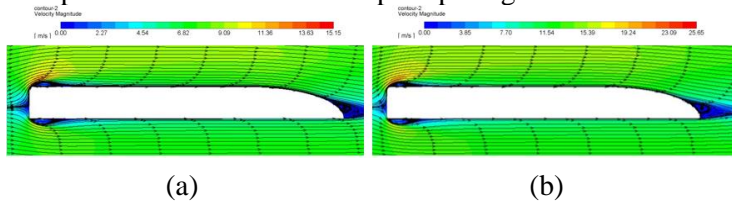
Salah satu kelebihan dari metode numerik yaitu dapat diketahui perubahan pola aliran yang melewati *thick plate-rounded leading edge*. Perubahan pola aliran tersebut dapat ditampilkan dengan visualisasi kontur kecepatan maupun kontur tekanan yang dihasilkan dari solusi yang konvergen dengan metode numerik. Berdasarkan gambar 4.9 pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$ memiliki besar kecepatan antara 0 sampai 15.15 m/s dan tekanan statis antara -110.49 sampai 38.64 pascal. Sementara pada $Re_t = 8.46 \times 10^4$ memiliki besar kecepatan

antara 0 sampai 25.65 m/s dan tekanan statis antara -315.96 sampai 107.18 pascal. Pada gambar 4.19 dibandingkan kontur kecepatan dan kontur tekanan pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ yang memiliki tampilan visualisasi aliran yang hampir sama walaupun *range* nilainya berbeda.



Gambar 4. 9 Perbandingan kontur kecepatan dan kontur tekanan pada (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Untuk menjelaskan fenomena aliran yang terjadi di sekitar model uji, dapat dijelaskan secara kualitatif melalui visualisasi *streamline* yang dikombinasikan dengan kontur kecepatan dari hasil numerik seperti pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Visualisasi *streamline* (a) $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan (b) $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Berdasarkan gambar 4.10 diperlihatkan visualisasi *streamline* aliran pada *thick plate-rounded leading edge* dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Pada visualisasi

aliran, terlihat bahwa titik stagnasi tidak tepat pada tengah dari model uji akibat adanya *rounded* pada *upper*side di *leading edge*. Hal ini menyebabkan aliran dipercepat pada *leading edge* dan terjadi separasi aliran setelah melewati *rounded*. Kemudian momentum aliran akan bertambah besar akibat melewati *convergence streamtube*. Hal ini ditandai dengan kontur warna merah pada *upper*side di *leading edge thick plate-rounded leading edge*. Setelah itu aliran akan melewati *divergence streamtube* dimana kecepatan aliran akan tereduksi yang ditandai dengan kontur warna biru muda. Terlihat bahwa aliran tersebut membentuk *bubble separation* yang ditandai dengan adanya *reattachment point* dimana berubahnya kontur warna biru muda menjadi warna hijau pada daerah dekat model uji pada jarak tertentu dari *leading edge*. Pada saat *reattach* terjadi transisi dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Selanjutnya aliran yang memiliki momentum lebih besar menuju ke daerah *trailing edge*. Saat melewati daerah *trailing edge* aliran mengalami *massive separation*. Hal ini terjadi kerana momentum yang dimiliki aliran tidak mampu lagi untuk melawan *adverse pressure* dan tegangan geser. Daerah di belakang *separation point* merupakan daerah yang memiliki kecepatan yang sangat rendah dan berisi pusaran (*eddies*). Daerah ini disebut daerah *wake*.

4.4. Analisa Karakteristik Aliran

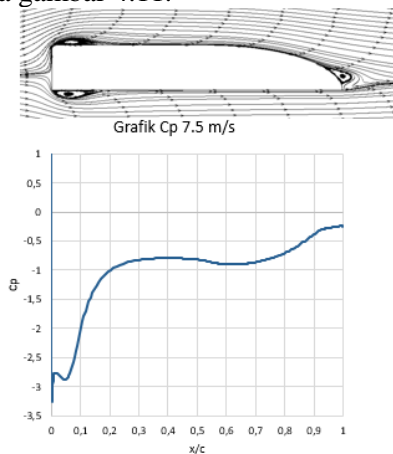
Penelitian pada *thick plate-rounded leading edge* yang terkorelasi dengan panjang bidang tumpu aliran bertujuan untuk mempercepat transisi *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai hasil karakteristik aliran melewati *thick plate-rounded leading edge* dengan variasi panjang $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Grafik koefisien tekanan yang dikombinasikan dengan visualisasi *streamline* profil kecepatan, *turbulent kinetic energy*, profil *separation*

bubble dan *shape factor* dari hasil numerik akan dianalisa untuk mengetahui seberapa besar pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* untuk menunda separasi didaerah *downstream*.

4.4.1. Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$

Koefisien tekanan (C_p) merupakan bilangan tak berdimensi yang membandingkan antara tekanan statis terhadap tekanan *freestream*. Koefisien tekanan merupakan parameter yang dapat digunakan untuk mempelajari karakteristik aliran fluida melalui *upper side thick plate-rounded leading edge*. Distribusi tekanan statis sepanjang *thick plate-rounded leading edge* dapat menginterpretasikan karakteristik aliran fluida yang terjadi.

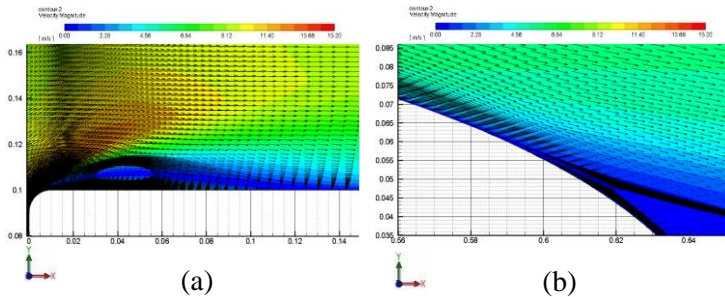
Nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ disajikan pada gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$

Berdasarkan gambar 4.11 diperlihatkan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c pada bagian *upper side* dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1 terdapat pada $y/t = 0.355$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi saat $x/c = 0.003$ dengan nilai C_p minimum sebesar -3.27 . Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali hingga titik *reattachment* pada $x/c = 0.215$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.885$.

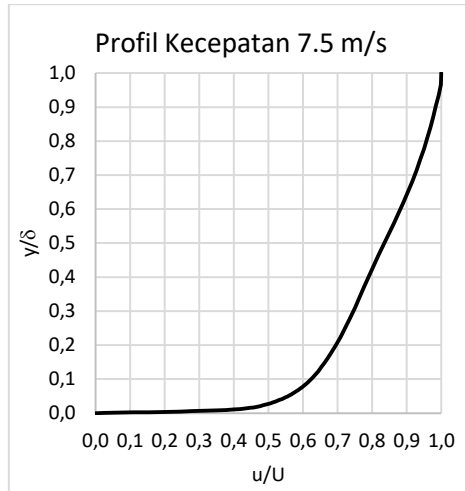
Untuk mengamati fenomena aliran yang terjadi didaerah *bubble separation* dan *massive separation*, ditampilkan visualisasi pembesaran aliran pada *leading edge* dan *trailing edge* dari hasil numerik seperti pada gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) *leading edge* dan (b) *trailing edge*

Berdasarkan gambar 4.12 diperlihatkan visualisasi pembesaran didaerah *bubble separation* dan *massive separation* pada *upperside* model uji dengan vektor kecepatan yang dikombinasikan dengan kontur kecepatan. Terlihat bahwa aliran tersebut membentuk *bubble separation* yang ditandai dengan adanya *reattachment point*. Pada daerah *separation bubble* berisi pusaran (*eddies*) dengan kecepatan rendah, di *trailing edge* aliran mengalami *massive separation*. Hal ini terjadi kerana momentum yang dimiliki aliran tidak mampu lagi untuk melawan *adverse pressure* dan tegangan geser. Daerah di belakang *separation point* merupakan daerah yang memiliki kecepatan yang sangat rendah yang mengakibatkan terjadinya *wake*.

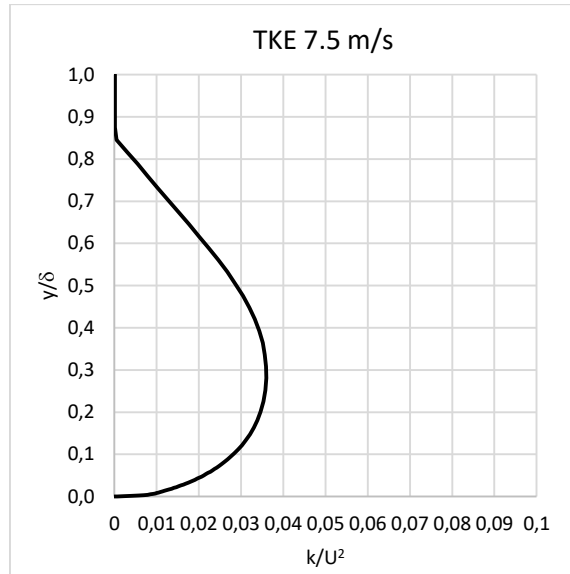
Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data profil kecepatan dari hasil numerik pada titik O seperti pada gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Profil kecepatan pada *upperside* dititik O

Berdasarkan gambar 4.13 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan dipermukaan dekat dinding akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Hal ini sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran didekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi didaerah *downstream*.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Plot *turbulent kinetic energy* di titik O dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ ditunjukkan pada gambar 4.14.

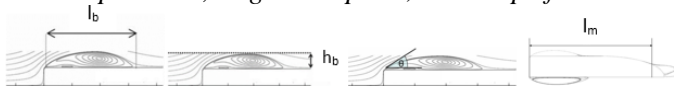


Gambar 4.14 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upper side* titik O

Berdasarkan gambar 4.14 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 tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi pada daerah *downstream* menjadi tertunda.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ seperti pada tabel 4.3.

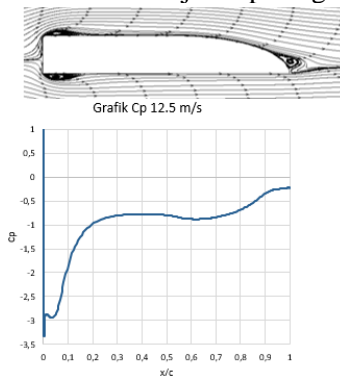
Tabel 4. 3 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
6.5	5.08×10^4	0.212	0.1528	42.1	0.885	0.678	1.441

4.4.2. Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Seperti variasi pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$, nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ disajikan pada gambar 4.15.

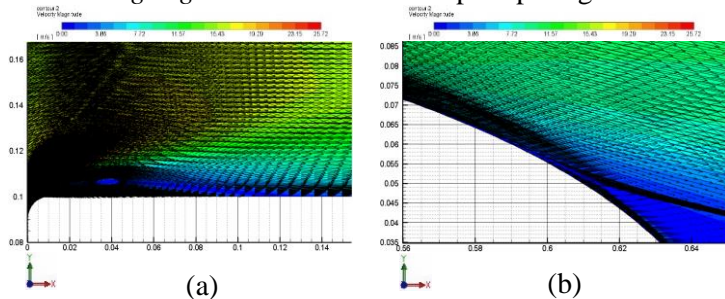


Gambar 4. 15 Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Berdasarkan gambar 4.15 diperlihatkan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c pada bagian tekanan (*upper side*) dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1 terdapat pada $y/t = 0.355$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat

bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi saat $x/c = 0.003$ dengan nilai C_p minimum sebesar -3.33 . Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali hingga titik *reattachment* pada $x/c = 0.205$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.899$.

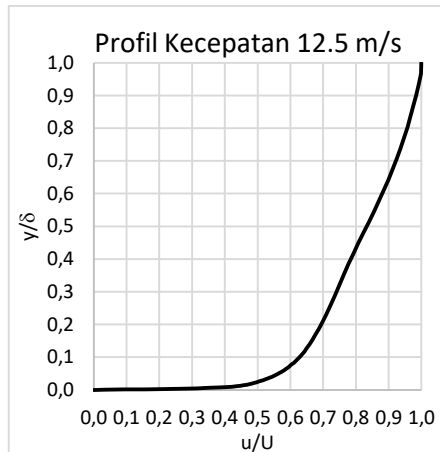
Untuk mengamati fenomena aliran yang terjadi didaerah *bubble separation* dan *massive separation*, ditampilkan visualisasi pembesaran aliran pada *leading edge* dan *trailing edge* dari hasil numerik seperti pada gambar 4.16.



Gambar 4. 16 Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) *leading edge* dan (b) *trailing edge*

Berdasarkan gambar 4.16 diperlihatkan visualisasi pembesaran didaerah *bubble separation* dan *massive separation* pada *upper side* model uji dengan vektor kecepatan yang dikombinasikan dengan kontur kecepatan. Terlihat bahwa aliran tersebut membentuk *bubble separation* yang ditandai dengan adanya *reattachment point*. Pada daerah *separation bubble* berisi pusaran (*eddies*) dengan kecepatan rendah. di *trailing edge* aliran mengalami *massive separation*. Hal ini terjadi kerana momentum yang dimiliki aliran tidak mampu lagi untuk melawan *adverse pressure* dan tegangan geser. Daerah di belakang *separation point* merupakan daerah yang memiliki kecepatan yang sangat rendah yang mengakibatkan terjadinya *wake*.

Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data profil kecepatan dari hasil numerik pada titik O seperti pada gambar 4.17.

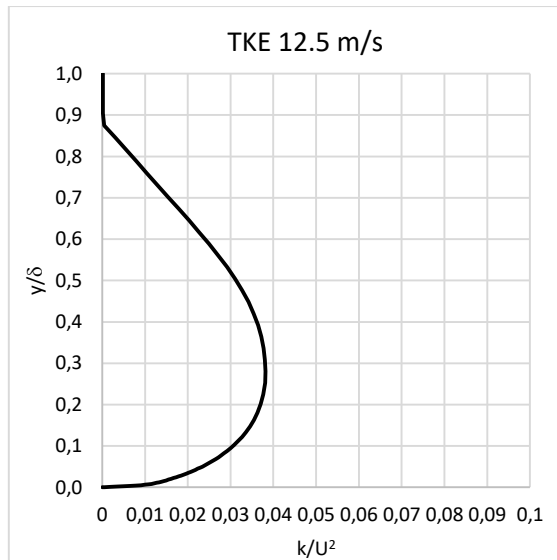


Gambar 4. 17 Profil kecepatan pada *upper side* dititik O

Berdasarkan gambar 4.17 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan

dipermukaan dekat dinding akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Hal ini sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran didekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi di daerah *downstream*.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Plot *turbulent kinetic energy* di titik O dengan $Ret = 8.46 \times 10^4$ ditunjukkan pada gambar 4.18.



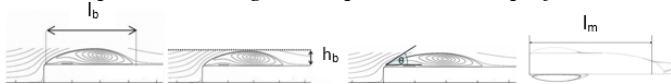
Gambar 4. 18 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upperside* dititik O

Berdasarkan gambar 4.18 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 tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi pada daerah *downstream* menjadi tertunda.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ seperti pada tabel 4.4.

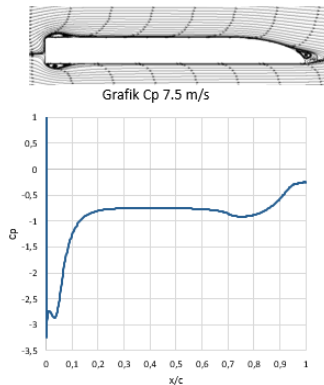
Tabel 4. 4 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
6.5	8.46×10^4	0.202	0.1368	33.7	0.899	0.656	1.431

4.4.3. Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$

Seperti variasi pada $c/t = 6.5$, nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ disajikan pada gambar 4.19.

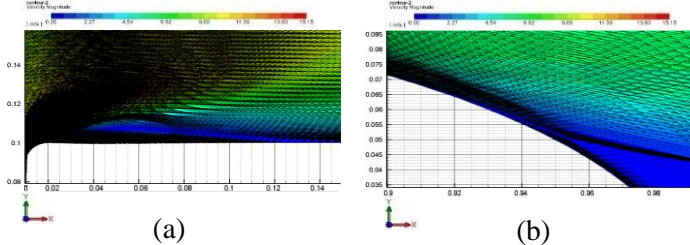


Gambar 4. 19 Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$

Berdasarkan gambar 4.19 diperlihatkan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c pada bagian *upper side* dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1 terdapat pada $y/t = 0.374$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi saat $x/c = 0.002$ dengan nilai C_p minimum sebesar -3.24. Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali hingga titik *reattachment* pada $x/c = 0.138$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan

mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.941$.

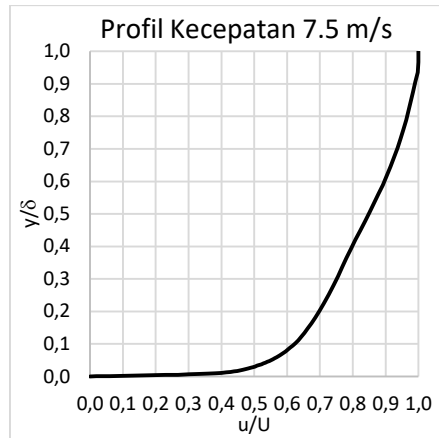
Untuk mengamati fenomena aliran yang terjadi didaerah *bubble separation* dan *massive separation*, ditampilkan visualisasi pembesaran aliran pada *leading edge* dan *trailing edge* dari hasil numerik seperti pada gambar 4.20.



Gambar 4. 20 Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) *leading edge* dan (b) *trailing edge*

Berdasarkan gambar 4.20 diperlihatkan visualisasi pembesaran didaerah *bubble separation* dan *massive separation* pada *upper side* model uji dengan vektor kecepatan yang dikombinasikan dengan kontur kecepatan. Terlihat bahwa aliran tersebut membentuk *bubble separation* yang ditandai dengan adanya *reattachment point*. Pada daerah *separation bubble* berisi pusaran (*eddies*) dengan kecepatan rendah. di *trailing edge* aliran mengalami *massive separation*. Hal ini terjadi kerana momentum yang dimiliki aliran tidak mampu lagi untuk melawan *adverse pressure* dan tegangan geser. Daerah di belakang *separation point* merupakan daerah yang memiliki kecepatan yang sangat rendah yang mengakibatkan terjadinya *wake*.

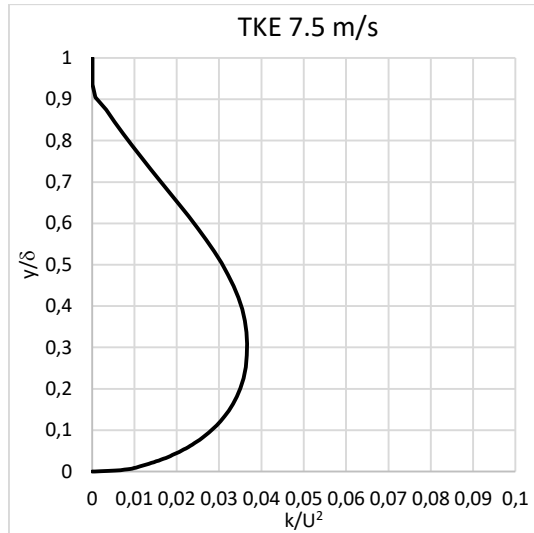
Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data profil kecepatan dari hasil numerik pada titik O seperti pada gambar 4.21.



Gambar 4. 21 Profil kecepatan pada *upperside* dititik O

Berdasarkan gambar 4.21 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan dipermukaan dekat dinding akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Hal ini sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran didekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi didaerah *downstream*.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Plot *turbulent kinetic energy* di titik O dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ ditunjukkan pada gambar 4.22.

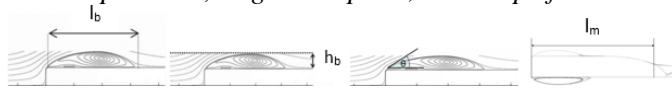


Gambar 4. 22 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upsides* dititik O

Berdasarkan gambar 4.22 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 tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi pada daerah *downstream* menjadi tertunda.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ seperti pada tabel 4.5.

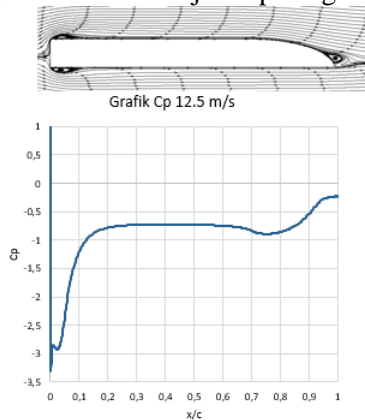
Tabel 4. 5 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
10	5.08×10^4	0.136	0.1523	37.6	0.941	0.749	1.435

4.4.4. Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Seperti variasi pada $Re_t = 5.08 \times 10^4$, nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ disajikan pada gambar 4.23.

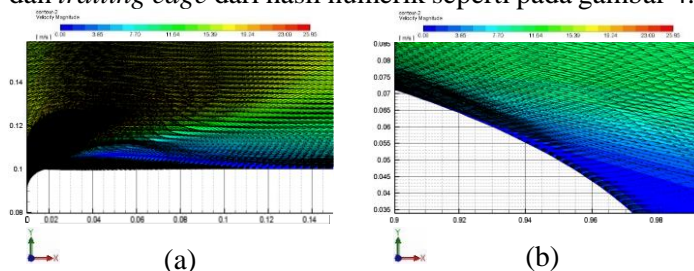


Gambar 4. 23 Grafik C_p terhadap x/c dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Berdasarkan gambar 4.23 diperlihatkan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c pada bagian *upper side* dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1

terdapat pada $y/t = 0.355$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi saat $x/c = 0.002$ dengan nilai C_p minimum sebesar -3.31 . Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali hingga titik *reattachment* pada $x/c = 0.131$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.945$.

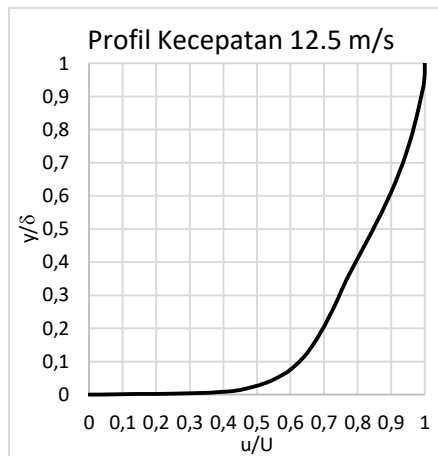
Untuk mengamati fenomena aliran yang terjadi didaerah *bubble separation* dan *massive separation*, ditampilkan visualisasi pembesaran aliran pada *leading edge* dan *trailing edge* dari hasil numerik seperti pada gambar 4.24.



Gambar 4. 24 Pembesaran aliran sisi atas sektor (a) *leading edge* dan (b) *trailing edge*

Berdasarkan gambar 4.24 diperlihatkan visualisasi pembesaran didaerah *bubble separation* dan *massive separation* pada *upper side* model uji dengan vektor kecepatan yang dikombinasikan dengan kontur kecepatan. Terlihat bahwa aliran tersebut membentuk *bubble separation* yang ditandai dengan adanya *reattachment point*. Pada daerah *separation bubble* berisi pusaran (*eddies*) dengan kecepatan rendah. di *trailing edge* aliran mengalami *massive separation*. Hal ini terjadi kerana momentum yang dimiliki aliran tidak mampu lagi untuk melawan *adverse pressure* dan tegangan geser. Daerah di belakang *separation point* merupakan daerah yang memiliki kecepatan yang sangat rendah yang mengakibatkan terjadinya *wake*.

Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data profil kecepatan dari hasil numerik pada titik O seperti pada gambar 4.25.

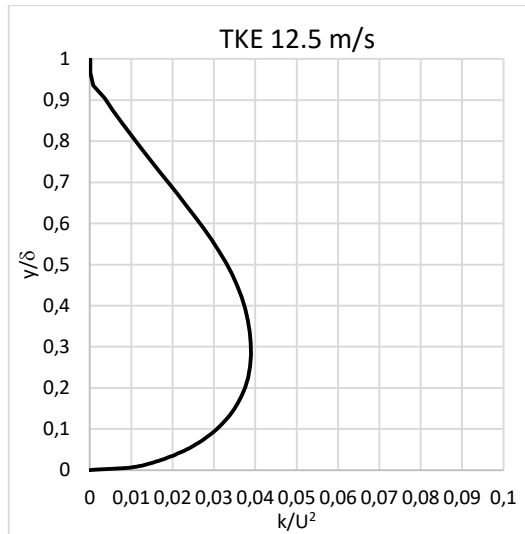


Gambar 4. 25 Profil kecepatan pada *upper side* dititik O

Berdasarkan gambar 4.25 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan

diper permukaan dekat dinding akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Hal ini sesuai dengan teori, dimana profil kecepatan aliran didekat dinding pada *turbulent boundary layer* memiliki momentum yang lebih besar. Momentum ini berguna untuk menunda separasi di daerah *downstream*.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Plot *turbulent kinetic energy* di titik O dengan $Ret = 8.46 \times 10^4$ ditunjukkan pada gambar 4.26.



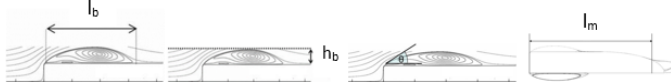
Gambar 4. 26 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upperside* dititik O

Berdasarkan gambar 4.26 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 tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi pada daerah *downstream* menjadi tertunda.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ seperti pada tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
10	8.46×10^4	0.129	0.1363	30.3	0.945	0.725	1.424

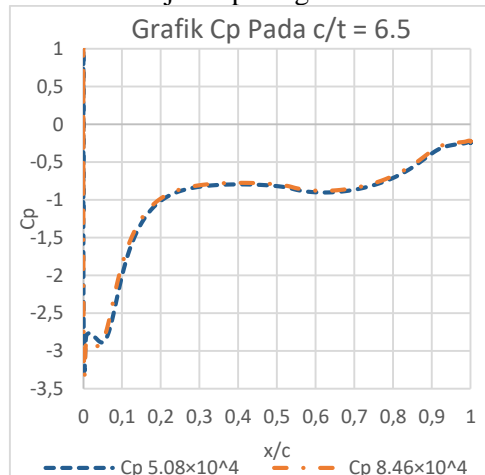
4.5. Analisa Perbandingan Karakteristik Aliran

Penelitian pada *thick plate-rounded leading edge* yang terkorelasi dengan panjang bidang tumpu aliran bertujuan untuk mempercepat transisi *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan hasil karakteristik aliran yang dibahas pada sub bab 4.4. Perbandingan tersebut meliputi grafik koefisien tekanan yang dikombinasikan dengan visualisasi *streamline*, profil kecepatan, *turbulent kinetic energy*, profil *separation bubble* dan *shape factor* pada variasi panjang $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam menunda separasi di daerah *downstream*.

4.5.1. Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Koefisien tekanan (C_p) merupakan bilangan tak berdimensi yang membandingkan antara tekanan statis terhadap tekanan *freestream*. Koefisien tekanan merupakan parameter yang dapat digunakan untuk mempelajari karakteristik aliran fluida melalui *upper side thick plate-rounded leading edge*. Distribusi tekanan statis sepanjang *thick plate-rounded leading edge* dapat menginterpretasikan karakteristik aliran fluida yang terjadi.

Nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ disajikan pada gambar 4.27.

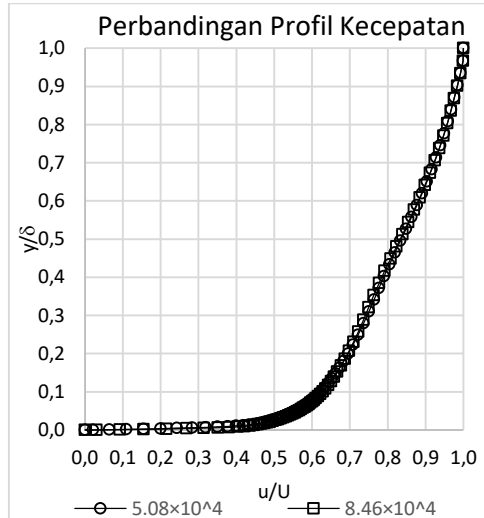


Gambar 4. 27 Grafik perbandingan C_p dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Berdasarkan gambar 4.27 diperlihatkan perbandingan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c

pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1 baik $Re_t = 5.08 \times 10^4$ maupun $Re_t = 8.46 \times 10^4$ terdapat pada $y/t = 0.355$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi saat $x/c = 0.003$ dengan nilai C_p minimum sebesar -3.27 untuk $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan sebesar -3.33 untuk $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali hingga titik *reattachment* yaitu pada $x/c = 0.215$ untuk $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan pada $x/c = 0.205$ untuk $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.885$ untuk $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan pada $x/c = 0.899$ untuk $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Semakin besar kecepatan aliran *freestream* maka aliran akan memiliki momentum yang semakin besar juga. Momentum aliran tersebut digunakan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi menjadi tertunda pada daerah *downstream*. Pada grafik tersebut menunjukkan pola nilai C_p yang sama pada bagian *upper side* dimana pada $Re_t = 8.46 \times 10^4$ lebih efektif untuk menunda separasi di daerah *downstream*.

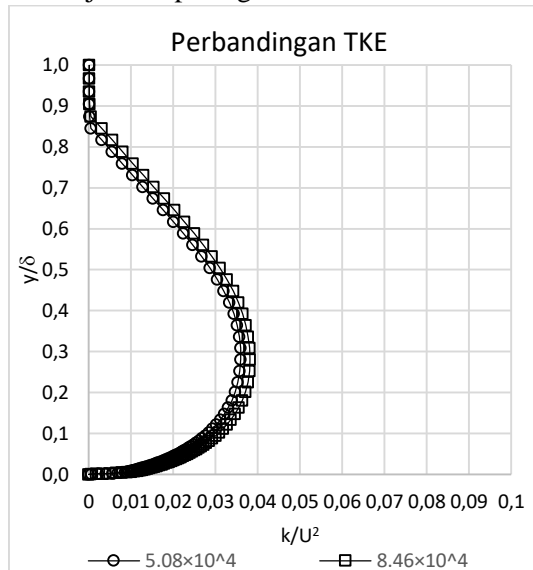
Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data perbandingan profil kecepatan antara $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ pada titik O seperti pada gambar 4.28.



Gambar 4. 28 Profil kecepatan pada *upsideside* dititik O

Berdasarkan gambar 4.28 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Semakin besar nilai *Reynolds number* mampu meningkatkan kecepatan aliran dekat permukaan model uji sehingga momentum aliran semakin bertambah. Momentum aliran ini digunakan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi pada *trailing edge* lebih tertunda. Pada gambar 4.28 terlihat benda uji dengan variasi $Re_t = 8.46 \times 10^4$ memiliki kecepatan dekat permukaan lebih besar dibandingkan dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Perbandingan plot *turbulent kinetic energy* di titik O antara $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ ditunjukkan pada gambar 4.29.



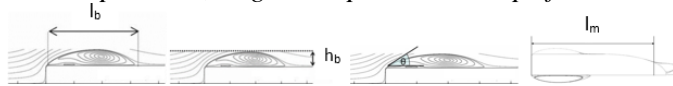
Gambar 4. 29 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upperside* dititik O

Berdasarkan gambar 4.29 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 *downstream* menjadi tertunda. Pada gambar 4.29 terlihat dengan variasi $Re_t = 8.46 \times 10^4$ memiliki nilai *turbulent kinetic*

energy dekat permukaan lebih besar dibandingkan dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh perbandingan profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai perbandingan panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ seperti pada tabel 4.7.

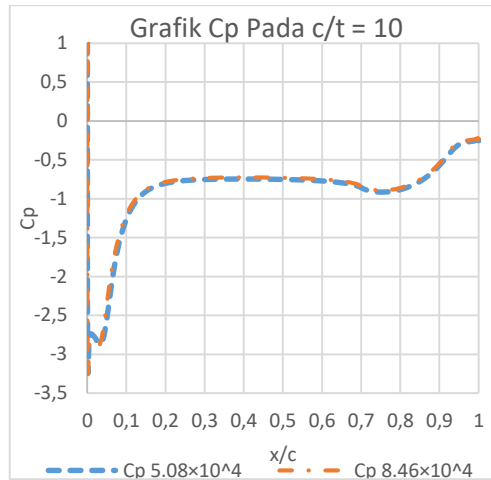
Tabel 4. 7 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
6.5	5.08×10^4	0.212	0.1528	42.1	0.885	0.678	1.441
	8.46×10^4	0.202	0.1368	33.7	0.899	0.656	1.431

4.5.2. Karakteristik Aliran Pada Konfigurasi Uji $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Seperi variasi pada $c/t = 6.5$, nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ disajikan pada gambar 4.30.



Gambar 4. 30 Grafik perbandingan C_p dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$

Berdasarkan gambar 4.30 diperlihatkan perbandingan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1 terdapat pada $y/t = 0.374$ untuk $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $y/t = 0.355$ untuk $Re_t = 8.46 \times 10^4$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi saat $x/c = 0.002$ dengan nilai C_p minimum sebesar -3.24 untuk $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan sebesar -3.31 untuk $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang

kemudian naik kembali hingga titik *reattachment* yaitu pada $x/c = 0.138$ untuk $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan pada $x/c = 0.131$ untuk $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.941$ untuk $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan pada $x/c = 0.945$ untuk $Re_t = 8.46 \times 10^4$. Semakin besar kecepatan aliran *freestream* maka aliran akan memiliki momentum yang semakin besar juga. Momentum aliran tersebut digunakan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi menjadi tertunda pada daerah *downstream*. Pada grafik tersebut menunjukkan pola nilai C_p yang sama pada bagian *upperside* dimana pada $Re_t = 8.46 \times 10^4$ lebih efektif untuk menunda separasi di daerah *downstream*.

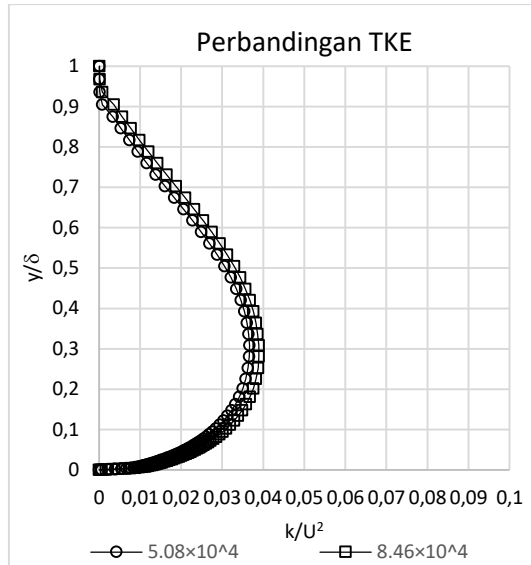
Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data perbandingan profil kecepatan antara $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ pada titik O seperti pada gambar 4.31.



Gambar 4. 31 Profil kecepatan pada *upsideside* dititik O

Berdasarkan gambar 4.31 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Semakin besar nilai *Reynolds number* mampu meningkatkan kecepatan aliran dekat permukaan model uji sehingga momentum aliran semakin bertambah. Momentum aliran ini digunakan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi pada *trailing edge* lebih tertunda. Pada gambar 4.31 terlihat benda uji dengan variasi $Re_t = 8.46 \times 10^4$ memiliki kecepatan dekat permukaan lebih besar dibandingkan dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Perbandingan plot *turbulent kinetic energy* di titik O antara $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ ditunjukkan pada gambar 4.32.



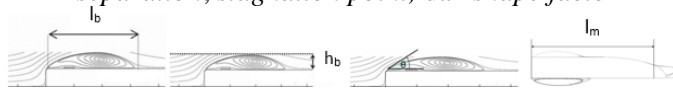
Gambar 4. 32 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upperside* titik O

Berdasarkan gambar 4.32 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 *downstream* menjadi tertunda. Pada gambar 4.32 terlihat dengan variasi $Re_t = 8.46 \times 10^4$ memiliki nilai *turbulent kinetic energy* dekat permukaan lebih besar dibandingkan dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh perbandingan profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai perbandingan panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan

nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $c/t = 10$ dengan $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ seperti pada tabel 4.8.

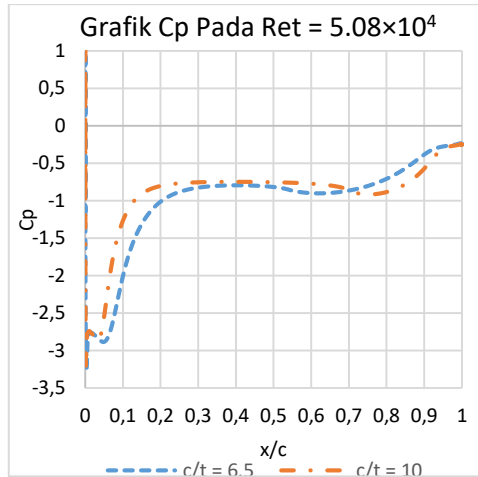
Tabel 4. 8 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
10	5.08×10^4	0.136	0.1523	37.6	0.941	0.749	1.435
	8.46×10^4	0.129	0.1363	30.3	0.945	0.725	1.424

4.5.3. Karakteristik Aliran Pada Variasi $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$

Seperti variasi pada c/t , nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c pada $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ disajikan pada gambar 4.33.

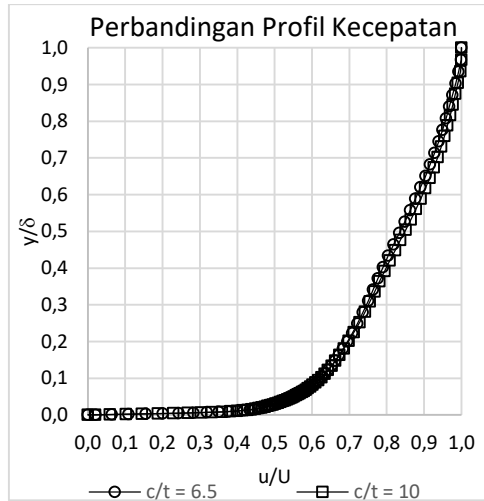


Gambar 4.33 Grafik perbandingan Cp pada $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$

Berdasarkan gambar 4.33 diperlihatkan perbandingan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1 terdapat pada $y/t = 0.355$ untuk $c/t = 6.5$ dan $y/t = 0.374$ untuk $c/t = 10$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi dengan nilai C_p minimum sebesar -3.27 saat $x/c = 0.003$ untuk $c/t = 6.5$ dan $C_p = -3.24$ saat $x/c = 0.002$ untuk $c/t = 10$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali

hingga titik *reattachment* yaitu pada $x/c = 0.215$ untuk $c/t = 6.5$ dan pada $x/c = 0.138$ untuk $c/t = 10$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.885$ untuk $c/t = 6.5$ dan pada $x/c = 0.941$ untuk $c/t = 10$. Semakin panjang bidang tumpu aliran maka aliran akan memiliki momentum yang semakin besar juga. Momentum aliran tersebut digunakan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi menjadi tertunda pada daerah *downstream*. Pada grafik tersebut menunjukkan pola nilai C_p yang sama pada bagian *upperside* dimana pada $c/t = 10$ lebih efektif untuk menunda separasi di daerah *downstream*.

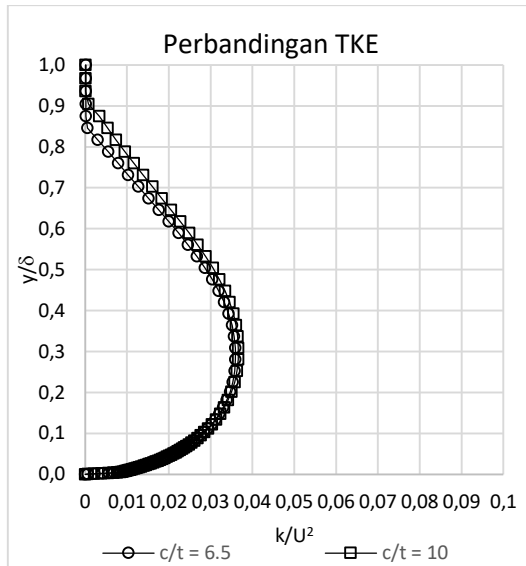
Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data perbandingan profil kecepatan antara $c/t = 6.5$ dengan $c/t = 10$ pada titik O seperti pada gambar 4.34.



Gambar 4.34 Profil kecepatan pada *upper side* dititik O

Berdasarkan gambar 4.34 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Semakin panjang bidang tumpu aliran mampu meningkatkan sedikit kecepatan aliran dekat permukaan model uji sehingga momentum aliran sedikit bertambah. Momentum aliran ini digunakan untuk melawan tegangan geser 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 besar dibandingkan dengan $c/t = 6.5$.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Perbandingan plot *turbulent kinetic energy* di titik O antara $c/t = 6.5$ dengan $c/t = 10$ ditunjukkan pada gambar 4.35.



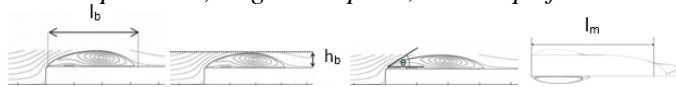
Gambar 4. 35 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upperside* titik O

Berdasarkan gambar 4.35 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 *downstream* menjadi tertunda. Pada gambar 4.35 terlihat dengan variasi $c/t = 10$ memiliki nilai *turbulent kinetic energy* dekat permukaan sedikit lebih besar dibandingkan dengan $c/t = 6.5$.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh perbandingan profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai perbandingan panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan

nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ seperti pada tabel 4.9.

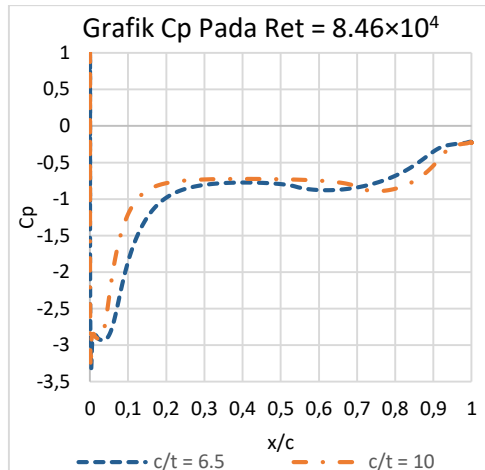
Tabel 4. 9 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
6.5	5.08×10^4	0.212	0.1528	42.1	0.885	0.678	1.441
10		0.136	0.1523	37.6	0.941	0.749	1.435

4.5.4. Karakteristik Aliran Pada Variasi $Re_t = 8.46 \times 10^4$ dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$

Seperti variasi pada c/t , nilai koefisien tekanan dari metode numerik diambil pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* karena memiliki bentuk dua dimensi. Data yang ditampilkan yaitu kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan (C_p) terhadap x/c pada $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ disajikan pada gambar 4.36.

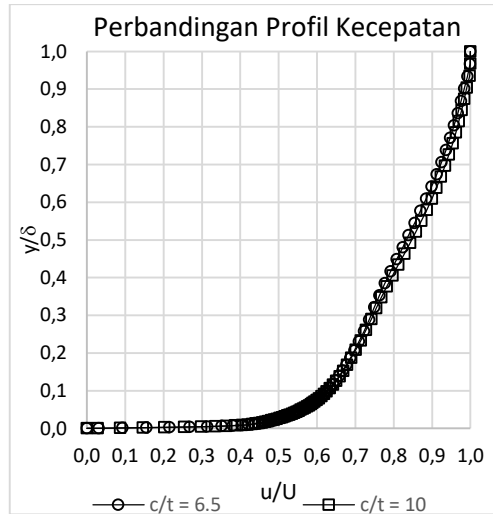


Gambar 4. 36 Grafik perbandingan Cp pada $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$

Berdasarkan gambar 4.36 diperlihatkan perbandingan hasil numerik distribusi koefisien tekanan (C_p) fungsi x/c pada bagian *upper side thick plate-rounded leading edge* dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$. Pada grafik diketahui *stagnation point* dimana memiliki nilai C_p tertinggi yaitu 1 baik $c/t = 6.5$ maupun $c/t = 10$ terdapat pada $y/t = 0.355$ saat $x/c = 0$. Setelah itu terlihat bahwa aliran mengalami percepatan tinggi pada sisi *leading edge* dibagian *upper side thick plate-rounded leading edge* yang ditandai dengan nilai C_p turun secara tajam hingga mengalami separasi dengan nilai C_p minimum sebesar -3.33 saat $x/c = 0.003$ untuk $c/t = 6.5$ dan $C_p = -3.31$ saat $x/c = 0.002$ untuk $c/t = 10$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *convergence streamtube* sehingga aliran mengalami percepatan fluktuatif. Kemudian nilai C_p mengalami kenaikan yang menandakan terjadinya separasi. Pada grafik hasil numerik terlihat terjadi *discontinuity* pada daerah *separation bubble*. Ditandai dengan sedikit menurunnya nilai C_p yang kemudian naik kembali hingga titik *reattachment* yaitu pada

$x/c = 0.205$ untuk $c/t = 6.5$ dan pada $x/c = 0.131$ untuk $c/t = 10$. Hal ini dikarenakan aliran melewati *divergence streamtube* sehingga kecepatan aliran berkurang. Pada saat ini terjadi transisi aliran dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Setelah melewati titik *reattachment*, nilai C_p relatif konstan. Kemudian aliran akan mengalami *massive separation* karena tidak mampu lagi melawan tegangan geser permukaan dan *adverse pressure* pada daerah *trailing edge*. Titik separasi terjadi pada $x/c = 0.899$ untuk $c/t = 6.5$ dan pada $x/c = 0.945$ untuk $c/t = 10$. Semakin panjang bidang tumpu aliran maka aliran akan memiliki momentum yang semakin besar juga. Momentum aliran tersebut digunakan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga separasi menjadi tertunda pada daerah *downstream*. Pada grafik tersebut menunjukkan pola nilai C_p yang sama pada bagian *upperside* dimana pada $c/t = 10$ lebih efektif untuk menunda separasi di daerah *downstream*.

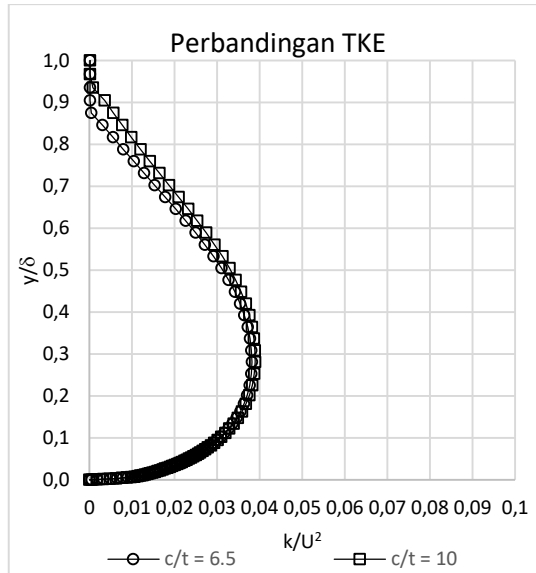
Untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran, disajikan data perbandingan profil kecepatan antara $c/t = 6.5$ dengan $c/t = 10$ pada titik O seperti pada gambar 4.37.



Gambar 4. 37 Profil kecepatan pada *upsides* dititik O

Berdasarkan gambar 4.37 dapat dilihat bahwa profil kecepatan fungsi u/U dan y/δ mengalami perlambatan akibat melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Semakin panjang bidang tumpu aliran mampu meningkatkan sedikit kecepatan aliran dekat permukaan model uji sehingga momentum aliran sedikit bertambah. Momentum aliran ini digunakan untuk melawan tegangan geser 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 $c/t = 6.5$.

Selain dari profil kecepatan, untuk mengetahui pengaruh panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* dalam meningkatkan momentum aliran dapat ditinjau dari grafik *turbulent kinetic energy*. Perbandingan plot *turbulent kinetic energy* di titik O antara $c/t = 6.5$ dengan $c/t = 10$ ditunjukkan pada gambar 4.38.



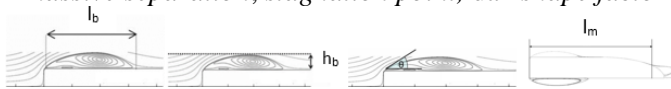
Gambar 4. 38 Plot *turbulent kinetic energy* pada *upper side* dititik O

Berdasarkan 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 *downstream* menjadi tertunda. Pada gambar 4.38 terlihat dengan variasi $c/t = 10$ memiliki nilai *turbulent kinetic energy* dekat permukaan sedikit lebih besar dibandingkan dengan $c/t = 6.5$.

Secara keseluruhan dari hasil numerik diperoleh perbandingan profil *separation bubble* seperti panjang *bubble*, tebal *bubble*, dan sudut *bubble*. Selain diperoleh juga informasi mengenai perbandingan panjang *massive separation* dari *leading edge*, *boundary layer thickness*, dan

nilai *shape factor*. Nilai *shape factor* diperoleh dari perhitungan dengan pendekatan integrasi numerik dimana data yang digunakan dari hasil simulasi yang konvergen. Adapun ringkasan hasil numerik pada variasi $Re_t = 8.46 \times 10^4$ dengan $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ seperti pada tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
6.5	8.46×10^4	0.202	0.1368	33.7	0.899	0.656	1.431
10		0.129	0.1363	30.3	0.945	0.725	1.424

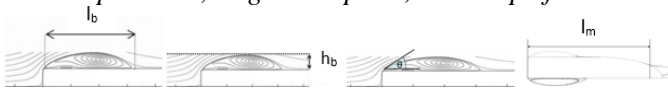
4.6. Diskusi

Untuk memberikan analisa yang lebih spesifik tentang pengaruh *Reynolds number* ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$) pada model *thick plate-rounded leading edge* dengan panjang bidang tumpu aliran ($c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$), maka diperlukan sebuah diskusi untuk mengkaji data-data yang mampu menerangkan karakteristik aliran disekitar *thick plate-rounded leading edge*.

Pada sub bab 4.5 dijelaskan perbandingan karakteristik aliran yang melintasi *thick plate-rounded leading edge* dengan menampilkan perbandingan kombinasi grafik antara hubungan *streamline* dengan koefisien tekanan, profil kecepatan dan *turbulen kinetic energy* dari hasil numerik. Pada tabel 4.11 dibandingkan hasil dari semua variasi yaitu $c/t = 6.5$, $c/t = 10$, $Re_t = 5.08 \times 10^4$, dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ untuk menganalisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point* dan *shape factor*. Dapat disimpulkan bahwa pada panjang bidang tumpu aliran yang sama, semakin besar *Reynolds number* maka panjang *separation bubble* semakin pendek sehingga *turbulent kinetic energy* semakin besar yang

mengakibatkan *massive separation* di *downstream* menjadi tertunda. Selain itu tebal *bubble* yang terbentuk semakin tipis dengan sudut *bubble* yang terbentuk semakin kecil. Didapatkan juga aliran pada *upperside* lebih turbulen jika dilihat dari *shape factor* dengan *boundary layer thickness* yang semakin mengecil. Sementara pada *Reynolds number* yang sama, semakin panjang dari bidang tumpu aliran maka panjang *separation bubble* semakin pendek sehingga *turbulent kinetic energy* sedikit lebih besar yang mengakibatkan *massive separation* di *downstream* menjadi tertunda. Selain itu sudut *bubble* yang terbentuk semakin kecil, namun tebal *bubble* yang terbentuk tidak berubah secara signifikan. Didapatkan juga aliran pada *upperside* lebih turbulen jika dilihat dari *shape factor* dengan *boundary layer thickness* yang semakin membesar. Berdasarkan nilai *shape factor* untuk semua variasi pada titik O mengindikasikan termasuk *turbulent medium intensity*.

Tabel 4. 11 Analisa profil *separation bubble*, panjang *massive separation*, *stagnation point*, dan *shape factor*



c/t	Re_t	l_b	h_b	Θ	l_m	δ_y	H
6.5	5.08×10^4	0.212	0.1528	42.1	0.885	0.678	1.441
	8.46×10^4	0.202	0.1368	33.7	0.899	0.656	1.431
10	5.08×10^4	0.136	0.1523	37.6	0.941	0.749	1.435
	8.46×10^4	0.129	0.1363	30.3	0.945	0.725	1.424

Keterangan :

- l_b : panjang *separation bubble* (fungsi x/c)
 h_b : tebal *separation bubble* (fungsi y/t)
 Θ : sudut *separation bubble* ($^\circ$)
 l_m : titik *masive separation* (fungsi x/c)
 δ_y : *boundary layer thickness* (fungsi y/t)
H : *shape factor* (fungsi δ^*/Θ)

Untuk mendukung penelitian ini maka hasil dari penelitian ini akan dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Rafriah [13]**. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Rafriah [13]** memiliki bentuk model uji yang sama seperti penelitian ini, misalnya besar *rounded* ($r/t=0.1$), variasi panjang bidang tumpu aliran dan bentuk dari *trailing edge*. Namun penelitian **Rafriah [13]** memiliki variasi *Reynolds number* yang berbeda dari penelitian ini yaitu sebesar $Re_t = 6.76 \times 10^4$ dan $Re_t = 10.15 \times 10^4$. Pada variasi $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 10.15 \times 10^4$ data yang diperoleh diantaranya panjang *separation bubble* (l_b) = 0.127, tebal *separation bubble* (h_b) = 0.1448, sudut *separation bubble* (Θ) = 29.5° , titik *massive separation* (l_m) = 0.94, dan *shape factor* (H) = 1.419. Sementara pada variasi $c/t = 10$ dengan $Re_t = 10.15 \times 10^4$ data yang diperoleh diantaranya panjang *separation bubble* (l_b) = 0.047, tebal *separation bubble* (h_b) = 0.0897, sudut *separation bubble* (Θ) = 26.7° , titik *massive separation* (l_m) = 0.979, dan *shape factor* (H) = 1.252. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada *rounded* yang sama semakin panjang bidang tumpu aliran dan semakin besar *Reynolds number* maka profil *separation bubble* yang terbentuk serta nilai *shape factor* yang dihasilkan semakin kecil yang mengakibatkan separasi di *downstream* menjadi lebih tertunda.

Selain itu hasil dari penelitian ini juga akan dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Rahayu [14]**. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Rahayu [14]** memiliki variasi yang sama seperti penelitian ini, yaitu variasi panjang bidang tumpu aliran dan besar *Reynolds number* dan bentuk dari *trailing edge* yang sama. Namun penelitian **Rahayu [14]** memiliki besar *rounded* yang berbeda dari penelitian ini yaitu sebesar $r/t=0.2$. Pada variasi $c/t = 6.5$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ data yang diperoleh diantaranya panjang *separation bubble* (l_b) = 0.057, tebal *separation bubble* (h_b) = 0.0321, sudut *separation bubble* (Θ) = 23.6° , titik *massive separation* (l_m) = 0.8966, dan *shape factor* (H) = 1.2845. Sementara pada variasi $c/t = 10$ dengan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ data yang diperoleh diantaranya panjang

separation bubble (l_b) = 0.0631, tebal *separation bubble* (h_b) = 0.0609, sudut *separation bubble* (Θ) = 27.6°, titik *massive separation* (l_m) = 0.927, dan *shape factor* (H) = 1.274. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada panjang bidang tumpu aliran dan *Reynolds number* yang sama semakin besar *rounded* maka profil *separation bubble* yang terbentuk serta nilai *shape factor* yang dihasilkan semakin kecil yang mengakibatkan separasi di *downstream* menjadi lebih tertunda.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Setelah menganalisa karakteristik *separation bubble* pada *upperside thick plate-rounded leading edge* dengan panjang bidang tumpu aliran $c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$ terhadap $Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$ secara eksperimen maupun numerik maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut. Semakin panjang dari bidang tumpu aliran dan semakin besar *Reynolds number* maka profil *separation bubble* yang terbentuk semakin kecil yang mengakibatkan separasi di *downstream* menjadi lebih tertunda. Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Pada panjang bidang tumpu aliran dan *rounded* yang sama, semakin besar *Reynolds number* maka panjang *separation bubble* semakin pendek sehingga *turbulent kinetic energy* semakin besar didekat dinding *upperside* yang mengakibatkan *massive separation* di *downstream* menjadi tertunda. Selain itu tebal *bubble* yang terbentuk semakin tipis dengan sudut *bubble* yang terbentuk semakin kecil. Didapatkan juga aliran pada *upperside* lebih turbulen jika dilihat dari *shape factor* dengan *boundary layer thickness* yang semakin mengecil.
2. Pada *Reynolds number* dan *rounded* yang sama, semakin panjang dari bidang tumpu aliran maka panjang *separation bubble* semakin pendek sehingga *turbulent kinetic energy* sedikit lebih besar didekat dinding *upperside* yang mengakibatkan *massive separation* di *downstream* menjadi tertunda. Selain itu sudut *bubble* yang terbentuk semakin kecil, namun tebal *bubble* yang terbentuk tidak berubah secara signifikan. Didapatkan juga aliran pada *upperside* lebih turbulen jika dilihat dari *shape factor* dengan *boundary layer thickness* yang semakin membesar.
3. Secara keseluruhan, variasi yang paling optimal untuk menunda *massive separation* di daerah *downstream* adalah

panjang bidang tumpu aliran (c/t) = 10 dengan *Reynolds number* (Re_t) = 8.46×10^4 .

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 lubang *pitot static tube* yang terlalu besar. Sedangkan kendala penelitian numerik adalah pembuatan beberapa model *mesh* pada *thick plate-rounded leading edge* untuk mencari geometri yang menghasilkan profil *separation bubble* yang sesuai dengan teori.
2. Perlu dilakukan optimasi yang lebih baik untuk mendapatkan hasil yang optimal antara pengaruh besar *rounded* pada *leading edge*, panjang bidang tumpu aliran dan bentuk dari *trailing edge*.
3. Perlu ditinjau model turbulensi terbaik dari metode numerik dengan dibandingkan hasil antara *turbulence model k-kl- ω* dengan *RSM* atau model turbulensi lainnya untuk menghasilkan profil *separation bubble* yang sesuai dengan hasil eksperimen. Disarankan melakukan metode numerik dengan *unsteady*.
4. 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. C. Corke, F. O. Thomas, N. Dame, and N. Dame, **Active and Passive Turbulent Boundary-Layer Drag Reduction**, AIAA J., vol. 56, no. 10, 2018.
- [2] B. N. Zakher, M. El-hadary, and A. N. Aziz, **The Effect of Vortex Generators on Aerodynamics for Sedan Cars**, Akademia Baru, no. January, 2019.
- [3] E. Lamballais, J. Silvestrini, and S. Laizet, **Direct numerical simulation of flow separation behind a rounded leading edge : Study of curvature effects**, Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 31, no. 3, pp. 295–306, 2010.
- [4] J. Niu, Y. Wang, L. Zhang, and Y. Yuan, **Numerical analysis of aerodynamic characteristics of high-speed train with different train nose lengths**, Int. J. Heat Mass Transf., vol. 127, pp. 188–199, 2018.
- [5] E. H. Bani, **Boundary-Layer Theory of Fluid Flow past a Flat-Plate : Numerical Solution Boundary-Layer Theory of Fluid Flow past a Flat-Plate : Numerical Solution using MATLAB**, Int. J. Computer Applications, vol. 180, no. 18, pp. 16–19, 2018.
- [6] T. Khan, **Numerical Study on a Single-bladed Darrieus Wind Turbine**, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.
- [7] E. Esmaeilzadeh, H. Mahdavy-moghaddam, M. Mirzaei, and S. G. Pouryoussefi, **Experimental Study of Plasma Actuator Effects on Flow Field Separation Bubble around Blunt Flat Plate Experimental Study of Plasma Actuator Effects on Flow Field Separation Bubble around Blunt Flat Plate**, J. Applied Fluid Mechanics, vol.

- 9, no. 1, pp. 397–406, 2016.
- [8] N. Djilali, **Turbulent Flow Around a Bluff Rectangular Plate . Part I: Experimental Investigation**, J. Fluids Eng., vol. 113, no. May, 1991.
- [9] Versteeg H.K., dan Malalasekera W., **An Introduction To Computational Fluid Dynamics-The Finite Volume Method**, Longman Scientific & Technical, 1995.
- [10] N. J. Mulvany, L. Chen, J. Y. Tu, and B. Anderson, **Steady-State Evaluation of ' Two-Equation ' RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) Turbulence Models for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations**, DSTO Platform Sciences Laboratory, 2004.
- [11] J. D. Anderson, **Computational Fluid Dynamics : The Basics with Applications**, McGraw-Hill, Inc. , 1995.
- [12] Fox, Robert W. dan Mc. Donald, Alan T, **Introduction to Fluid Mechanics, 5th edition**, John Wiley and Son, Inc., 1998.
- [13] Rafrisah, Athalla, **studi eksperimen dan numerik karakteristik separation bubble dari aliran dua dimensi melintasi thick plate-rounded leading edge ($r/t=0.1$) dengan variasi reynolds number ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$) dan panjang aksial plat ($c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$), 2020.**
- [14] Rahayu, Cholifatus E., **studi eksperimen dan numerik karakteristik separation bubble dari aliran dua dimensi melintasi thick plate-rounded leading edge ($r/t=0.1$) dengan variasi reynolds number ($Re_t = 5.08 \times 10^4$ dan $Re_t = 8.46 \times 10^4$) dan panjang aksial plat ($c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$), 2020.**

BIOGRAFI PENULIS



Abdul Haris Irfani lahir di Kediri pada tanggal 04 Desember 1997. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis memulai belajar di TK ABA I Kandangan, MI Al-Hidayah

Kandangan, SMPN 1 Kandangan, SMAN 2 Pare, hingga ke jenjang sarjana di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2020. Penulis juga pernah mengikuti pendidikan non formal yaitu di Pondok Pesantren Darul Falah Kandangan saat TK sampai MI. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif menjadi staff divisi Syiar Kreatif Ash-Shaff 2017/2018 dan staff ahli divisi Syiar Kreatif Ash-Shaff 2018/2019.

Penulis pernah mengikuti Program *Student Exchange* selama satu semester di Universiti Teknikal Melaka Malaysia (UTeM) pada tahun 2018. Penulis juga aktif dalam kepanitiaan berbagai *event*, terutama pada *event* terbesar dari Kemenristekdikti yaitu KMHE (Kontes Mobil Hemat Energi) sebagai anggota *racing committee*. Penulis dapat dihubungi melalui *email* abdulharis269@gmail.com