TUGAS AKHIR – TM091486

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK *SEPARATION BUBBLE* DARI ALIRAN DUA DIMENSI MELINTASI *THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE* (r/t = 0.1) DENGAN PENGARUH *REYNOLDS NUMBER* (Re_t = 6.76×10^4 DAN Re_t = 10.15×10^4) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6.5 DAN c/t = 10)

AHMAD ALI WAFA
NRP. 02111540000089

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

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

TUGAS AKHIR – TM091486

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK *SEPARATION BUBBLE* DARI ALIRAN DUA DIMENSI MELINTASI *THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE* (r/t = 0.2) DENGAN PENGARUH *REYNOLDS NUMBER* (Re_t = 6.76×10^4 DAN Re_t = 10.15×10^4) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6.5 DAN c/t = 10)

AHMAD ALI WAFA
NRP. 02111540000089

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

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

FINAL PROJECT – TM091486

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON SEPARATION BUBBLE CHARACTERISTIC FROM TWO-DIMENSIONAL FLOW ON A THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0.2) WITH VARIATION OF REYNOLDS NUMBER (Re_t = 6.76×10^4 dan Re_t = 10.15×10^4) AND AXIAL LENGTH (c/t = 6.5 DAN c/t = 10)

AHMAD ALI WAFA
NRP. 02111540000089

***Advisor*:**
Prof. Dr. Ing Herman Sasongko

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK *SEPARATION BUBBLE* DARI ALIRAN DUA DIMENSI PADA *THICK PLATE–ROUNDED LEADING EDGE* (r/t = 0.2) DENGAN PENGARUH *REYNOLDS NUMBER* ($Re_t = 6.76\times10^4$ DAN $Re_t = 10.15\times10^4$) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6.5 DAN c/t = 10)

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

Ahmad Ali Wafa

NRP. 02111540000089

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko ..... (Pembimbing)
   NIP. 196010041986011001
2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. ..... (Penguji I)
   NIP. 196001291987011001
3. Dr. Wawan Aries W., S.T., M.T. ..... (Penguji II)
   NIP. 197104051997021001
4. Vivien Suphandani D., S.T., M.E., Ph.D. ..... (Penguji III)
   NIP. 198105292003122001

SURABAYA
AGUSTUS, 2020

STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DUA DIMENSI PADA THICK PLATE–ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0.2) DENGAN PENGARUH REYNOLDS NUMBER (Re_t = 6.76×10^4 dan Re_t = 10.15×10^4) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6.5 DAN c/t = 10)

Nama Mahasiswa	**:**	**Ahmad Ali Wafa**
NRP	**:**	**02111540000089**
Jurusan	**:**	**Teknik Mesin**
Dosen Pembimbing	**:**	**Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko**

ABSTRAK

Perkembangan teknologi membuat Engineer di dunia berusaha menciptakan kendaraan dengan performa yang optimal. Hal tersebut salah satunya dapat dicapai dengan penggunaan desain bodi aerodinamis sebagai upaya mereduksi gaya drag pada kendaraan. Terjadinya reduksi gaya drag akan mengurangi energi yang hilang sehingga konsumsi bahan bakar kendaraan menjadi semakin efisien. Salah satu metode untuk mereduksi drag adalah dengan memundurkan titik separasinya dengan cara mempercepat transisi boundary layer dari laminar ke turbulen. Aliran turbulen memiliki momentum yang lebih besar sehingga mampu melawan adverse pressure lebih lama dan memundurkan titik separasi lebih jauh. *Bubble Separation* terbentuk sebagai hasil dari aliran yang terseparasi kemudian *attach*. Penelitian mengenai kombinasi pengaruh *dynamic force* aliran yang direpresentasikan oleh *Reynolds number* pada bentuk *leading edge* tertentu serta panjang bidang tumpu aliran hampir tidak pernah dikemukakan. Penambahan panjang bidang tumpu aliran di belakang *leading edge*

diduga dapat memperbesar kesempatan aliran untuk *attach*. Fenomena ini sangat menarik untuk diteliti lebih jauh karena dengan mempercepat *reattachment* akan memundurkan separasi *massive* di belakangnya.

Penelitian dilakukan dengan eksperimen dan simulasi numerik dua dimensi pada *thick plate–rounded leading edge* (r/t=0.2) dengan variasi bilangan Reynolds (Ret = 6.76×104 dan 10.15×104) dan panjang aksial (c/t=6.5 dan 10). Eksperimen ini diawali dengan mengukur kecepatan *free flow* pada lorong angin dengan pitot static tube dan melakukan validasi *pressure tranducer*. Kemudian tekanan statis pada *midspan* benda uji diukur sesuai dengan konfigurasi uji. Simulasi numerik (dua dimensi) dilakukan dengan model turbulen k–kl–ω setelah melakukan pengujian *grid independence*. Setelah data dari eksperimen dan simulasi numerik didapatkan, data-data tersebut diolah dan dianalisa sebagai grafik koefisien tekanan, kontur dan *pathline* baik kecepatan maupun tekanan, profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy*.

Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah kenaikan nilai Re_t pada nilai c/t yang sama mampu membuat aliran mengalami *reattachment* lebih awal karena mendapatkan *entrainment energy* lebih besar dari *primary flow*. Kenaikan nilai c/t pada nilai Re_t yang sama mampu membuat aliran mengalami *reattachment* lebih awal karena jarak antara *adverse pressure* pada *leading edge* dan *trailing edge* menjadi lebih jauh. Kenaikan nilai Re_t dan c/t terbukti mampu memundurkan titik separasi massif pada daerah *downstream*.

Keyword : bubble separation, reduksi gaya drag, transisi *boundary layer*, panjang bidang tumpu aliran

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON SEPARATION BUBBLE CHARACTERISTIC FROM TWO-DIMENSIONAL FLOW ON A THICK PLATE–ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0.2) WITH VARIATION OF REYNOLDS NUMBER ($Re_t = 6.76\times10^4$ dan $Re_t = 10.15\times10^4$) AND AXIAL LENGTH (c/t = 6.5 DAN c/t = 10)

Name	**:**	**Ahmad Ali Wafa**
NRP	**:**	**02111540000089**
Major	**:**	**Mechanical Engineering**
Supervisor	**:**	**Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko**

ABSTRACT

The advance of technological development make engineers try to create an optimum-performance vehicle. One of the attempt is designing an aerodynamical body as way to reduce drag force. A reduction in drag force will reduce the energy lost in order to reduce usage of fossil fuel due to increase efficiency. One of the method to reduce drag force is narrowing wake area in a massive separation on downstream area. This condition can be achieved by shorten separation bubble in order to change incoming laminar freeflow into a high-energy turbulent flow. Research on variation in Reynolds number or the shape of leading edge has been widely conducted. But research about the collaboration of synamic forces represented by elative number on the leading edge shape and some flow-support plate has neer been conducted. The addition of flow-support axial plate behind leading edge apparently can increase flow's chance to reattach. This phenomenon is very interesting to be discussed because reduced reattachment point will increase

flow's energy and momentum in order to narrowing wake area on downstream.

This research will be done by doing experimental study and two dimensional numerical simulation with Reynolds number variation (Ret = 6.76×104 and 10.15×104) and axial length variation (c/t=6.5 and 10) on the upper side of the specimens. The specimens are shaped of "thick plate–rounded leading edge" with r/t = 0.2. The expected data from the experiments are static pressures that measured in midspan-upper side section of the specimens. While the numerical simulation will be measured with k–kl–ω turbulent model after the grid independence calculation. The data from experiments and numerical simulation will be processed and analysed as pressure coefficient graph, velocity contour and pathlines, pressure contour and pathlines, velocity profile and turbulent kinetic energy.

The result obtained in this study is for increasing Reynolds number in a constrant c/t gets the reattachment earlier due to increasing entrainment energy from primary flow. For increasing c/t in a constant Reynolds number gets the reattachment earlier due to increasing distance between adverse pressure at leading edge and trailing edge. increasing Reynolds number and increasing c/t is proven to be able to shift massive separation point at downstream further.

Keyword : bubble separation, Drag force reduction, boundary layer transition, flow-support axial plate

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT., tuhan yang maha esa atas segala limpahan rahmat dan hidayahnya sehingga saya bisa menunaikan tugas saya sebagai seorang mahasiswa untuk menuntut ilmu dan berhasil menyelesaikan tugas akhir saya yang bertajuk **STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DUA DIMENSI PADA THICK PLATE–ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0.2) DENGAN PENGARUH REYNOLDS NUMBER ($Re_t = 6.76\times10^4$ dan $Re_t = 10.15\times10^4$) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6.5 DAN c/t = 10).**

Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan andil dari berbaai pihak. sehingga, pada kesempatan kali ini saya ingin mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang setinggi – tingginya kepada:

1. Ibu, Ayah, Iqbal, Ami, dan Yasmin yang selalu memberikan doa dan dukungan selama saya mengerjakan Tugas Akhir.
2. Prof. Herman Sasongko, Dosen pembimbing Tugas Akhir yang tak pernah lelah dalam membimbing, mengajarkan, dan menjadi tauladan dari awal hingga akhir studi saya di Teknik Mesin FTIRS ITS.
3. Prof. Tri Yogi, Pak Wawan, Prof. Sutardi dan Bu Vivien sebagai dosen penguji yang telah emberikan masukan dan saran yang sangat membangun demi keberhasilan penulis di karir selanjutnya.
4. Prof sutardi yang telah membimbing saya dalam pengerjaan laporan Kerja Praktek meskipun laporan penulis harus molor 1 semester karena penulis harus ke Malaysia. Serta bu Gita selaku pembimbing KKN yang

berhasil menambah wawasan penulis mengenai Sosial dan Lingkungan.

5. Pak tris sebagai Tendik yang membuatkan benda uji yang penulis gunakan serta wejangan – wejangan beliau mengenai kehidupan kerja setelah lulus nanti.
6. Pak Firman dan dan Pak iman sebagai pembimbing Penulis dalam melaksanakan Kerja Praktek di PT. GMF AeroAsia serta memberikan ilmu – ilmu yang sangat berharga menganai *maintenance* pesawat terbang.
7. Dosen – dosen pengampu mata kuliah di Teknik Mesin yang selalu ikhlas dalam mengajar serta aktif dalam memberikan ilmu – ilmu yang mereka miliki sehinga penulis medapatkan bekal yang cukup untuk berkarir kedepannya.
8. Para punggawa – pungawa Tugas Akhir prof. herman, mulai dari Penulis, At, Haris, dan Ifa yang telah berjuang Bersama – sama dan saling menyokong satu sama lain hingga Tugas Akhir ini selesai.
9. Senior – senior di Teknik Mesin, terutama Mas Nico yang telah membimbing penulis saat maba hingga menjadi pribadi yang lebih baiki seperti sekarang ini.
10. Ghiffari dan Intan a.k.a Bocah yang bersedia membantu penulis untuk melakukan simulasi di sela – sela kesibukan mereka oleh karena penulis yang tidak memiliki ANSYS sendiri di laptopnya.
11. Dita Fakhrana, Surya Insomnia, Tora Sudiro, dan seluruh Kru MALAM – MALAM NET TV yang telah menghadirkan acara yang sangat menarik dan lucu sehingga berhasil membangkitkan lagi semangat penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir dikala capek dan hampir menyerah.

12. Para pengikut setia Sekte Kobra Independen yang telah didirikan oleh Penulis, mulai dari At, Yoyok, Ihza, Ayub, Derry, Tory, Anggi, Mille, Zain, Galih, Galuh, Putri, Kusuma, Dewi, Nosa, dan titan yang telah mengabdi dan memberikan rasa nyaman dan senang bagi semuanya. tak lupa juga Thanoswati karena telah menjadi peliharaan yang baik.
13. Lab. mekanika Fluida yang telah memberikan naungan dan tempat untuk belajar dan bersantai. juga kepada Kyai T-Rex beserta jajarannya, Eto, Magikarp, Budi, dan "mas – mas" yang ngajak ngobrol Rida, karena telah memberikan warna lain dalam kehidupan perkuliahan penulis.
14. Angkatan M58 yang telah menemani dan berjuang Bersama dari awal hingga akhir, dan juga kepada "the avengers" (At, Widan, Fadil, Penulis" yang selalu menjadi sahabat yang hebat.
15. Teman – teman, Mas mbak serta adik – adik MMC Crew yang telah bersedia menerima, mengajarkan music dan organisasi, serta membangunkan penulis Ketika akan masuk perkuliahan.
16. Angie, Wong, dan Ika Syafikah sebagai mahasiswa *Student Exchange* dari UTeM yang memberikan pengalaman baru dari sisi mahasiswa Internasional sehingga memberikan *encouragement* bagi penulis untuk bisa Studi ke luar negeri.
17. Dr. Ernie dan encik Dino yang membantu mengurusi segala kebutuhan penulis saat exchange ke UTeM Malaysia. juga kepada Airlangga, Yuwana, dan Madun yang telah menjadi *roommate* yang baik, menyenangkan, dan seru baik untuk diajak senang – senang ataupun untuk belajar. juga kepada Clara, Michelle, Steffy, dan Leo

sebagai teman bermain kartu di kafetaria menjelang tengah malam.

18. kedua sahabat saya, Arindya risma yang selalu bisa mendengar keluh kesah penulis selama mengerjakan Tugas Akhir serta bersedia untuk meluangkan waktu untuk sekedar melepas penat, dan Finsya Aditama yang selalu memberikan penulis semangat yang membara untuk bisa "Lulus sama – sama, sukses sama – sama".
19. semua pihak yang mamiliki andil dalam membentuk pribadi penulis seperti sekarang hingga dapa menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih banyak terjadi kesalahan dan kekeliruan. oleh karena itu, kritik dan masukan sangat penulis harapkan dari pihak manapun. akhir kata, penulis senantiasa berharap Tugas Akhir ini dapat digunakan Sebaik – baiknya dan dapat bermanfaat di kemudian hari.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya,
Agustus 2020

Penulis

Daftar Isi

.....**Error! Bookmark not defined.**

ABSTRAK v

ABSTRACT vii

KATA PENGANTAR ix

Daftar Isi xiii

Daftar Gambar xvii

Daftar Tabel xxi

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. Boundary Layer 7

2.1.2. Separasi Aliran 11
2.1.3. Bubble Separation 12
2.2. Penelitian Terdahulu 13
2.3 Numerical Modeling 23
2.3.1. Computational Fluid Dynamics (CFD) 23
2.3.2. Klasifikasi Model Turbulensi 25
2.3.3. Deskripsi RANS Turbulance Modeling 26
2.3.4. Deskripsi Grid Independency 27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 29
3.1. Konfigurasi Uji 29
3.2. Analisa Dimensi 31
3.3. Metode Eksperimen 33
3.3.1. Peralatan Eksperimen 33
3.3.2. Pengambilan Data Eksperimen 35
Metode Numerik 37
3.4.1. *Mesh* 37
3.4.2. *Boundary Condition* 38
3.4.3. *Post Processing* 40
3.4. Jadwal Pelaksanaan 40
3.5. Diagram Alir Metode Eksperimen dan Numerik 41

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 43
4.1. Validasi 43
4.2. Analisa *Grid Independency*..... 45
4.3. Gambaran Umum..... 46
4.4. Analisa Karakteristik Aliran..... 48
4.4.1. Konfigurasi Uji A (c/t=6.5 dan Re_t=6.76x10^4) 48
4.4.2. Konfigurasi Uji B (c/t=6.5 dan Re_t=10.15x10^4) 52
4.4.3. Konfigurasi Uji C (c/t=10 dan Re_t=6.76x10^4).57
4.4.4. Konfigurasi Uji D (c/t=10 dan Re_t=10.15x10^4)62
4.5. Analisa antar Konfigurasi Uji 67
4.5.1. Perbandingan antara Konfigurasi Uji A dan B 67
4.5.2. Perbandingan antara Konfigurasi Uji C dan D 71
4.5.3. Perbandingan antara Konfigurasi Uji A dan C 75
4.5.4. Perbandingan antara Konfigurasi Uji B dan D 79
4.6. Diskusi..... 82
BAB V PENUTUP 89
5.1. Kesimpulan..... 89

5.2. Saran 90

Daftar Pustaka 91

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Boundary Layer **Fox [6]** 8
Gambar 2.2 profil kecepatan pada *external flow* 8
Gambar 2.3 *momentum thickness* 9
Gambar 2.4 *displacement thickness* 10
Gambar 2.5 Mekanisme terjadinya separasi aliran **Fox [6]** 12
Gambar 2.6 Struktur Laminar Bubble Separation **Samson et al [3]** 13
Gambar 2.7 Variasi Reattachment dengan nilai Re **Samson et al [3]** 14
Gambar 2.8 iso-contour dari kecepatan stramwise pada Re = 35000 : (a) – (c) Panjang bubble dilihat pada 3 waktu berbeda, (d) panjang bubble rata – rata. **Samson et al [3]** 15
Gambar 2.9 distribusi c_p dengan variasi nilai AOA **Hu dan Yang [7]** 17
Gambar 2.10 estimasi titik separasi, transisi, dan *reattachment* **Hu dan Yang [7]** 18
Gambar 2.11 visualisasi aliran yang melewati airfoil dengan *instantaneous velocity vector* (kanan) dan *streamline of the mean flow* (kiri) pada (a) 10 deg dan (b) 12 deg **Hu dan Yang [7]** 19
Gambar 2.12 Meshgrid benda uji **Lee et al [8]** 20
Gambar 2.13 perbandingan nilai *pressure distribution* antara metode PSP dan hasil simulasi **Lee et al [8]** 20
Gambar 2.14 visualisasi *instantaneous flow structure* **Lee et al [8]** 21
Gambar 2.15 (a) visualisasi *laminar separation bubble* secara 2D dan (b) visualisasi *turbulent kinetic energy* **Lee et al [8]** 22
Gambar 2.16 Konfiurasi Benda uji **Yadi [12]** 23

Gambar 2. 17 Blok diagram simulasi dengan CFD **Yadi [12]** 24
Gambar 2. 18 Karakteristik *Eddy* dalam turbulensi 25
Gambar 2. 19 *Energy Cascade* antara *Large Eddy* dengan *Small Eddy* 25
Gambar 2. 20 Pendekatan *Turbulence Modeling* 25
Gambar 2. 21 Grafik profil kecepatan pada 93%C 28
Gambar 3. 1 Parameter pengukuran 29
Gambar 3. 2 Konfigurasi uji 30
Gambar 3. 3 Konfigurasi benda uji pada *test section* 31
Gambar 3. 4 Skema *wind tunnel* yang digunakan 33
Gambar 3. 5 *Wall pressure tap* pada benda uji 34
Gambar 3. 6 Skema validasi *manometer value* dengan nilai *pressure tranducer* 36
Gambar 3. 7 Model *meshing thick plate-rounded leading edge* pada c/t = 6.5 38
Gambar 3. 8 Penentuan parameter dan *boundary condition* 39
Gambar 3. 9 Zona *boundary condition* 39
Gambar 3. 10 Hasil *post processing* 40
Gambar 3. 11 Diagram alir metode penelitian 41
Gambar 4.1 grafik perbandingan koefisien terkanan antara hasil eksperimen dengan simulasi numerik (a) *k-omega sst* (b) *k-kl omega* 43
Gambar 4.2 skema pengambilan data profil kecepatan 44
Gambar 4.3 Profil kecepatan Benda uji c/t 10 dan Re $5.06x10^4$ 44
Gambar 4.4 kontur warna Konfigurasi uji c/t 6.5 (a) kecepatan (b) tekanan 46
Gambar 4.5 kontur warna Konfigurasi uji c/t 10 (a) kecepatan (b) tekanan 46
Gambar 4.6 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi uji A 48

Gambar 4.7 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge* 50
Gambar 4.8 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *trailing edge* 50
Gambar 4.9 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji A 52
Gambar 4.10 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi Uji B 53
Gambar 4.11 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge* 55
Gambar 4.12 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *trailing edge* 55
Gambar 4.13 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji B 57
Gambar 4.14 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi Uji C 58
Gambar 4.15 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge* 60
Gambar 4.16 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *trailing edge* 60
Gambar 4.17 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji C 62
Gambar 4.18 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi Uji D 63
Gambar 4.19 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge* 65
Gambar 4.20 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *trailing edge* 65
Gambar 4.21 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji D 67
Gambar 4.22 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji A dan B 69

Gambar 4.23 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi A dan B 70
Gambar 4.24 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi A dan B 71
Gambar 4.25 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji C dan D 72
Gambar 4.26 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi C dan D 74
Gambar 4.27 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi C dan D 75
Gambar 4.28 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji A dan C 76
Gambar 4.29 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi A dan C 78
Gambar 4.30 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi A dan C 78
Gambar 4.31 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji B dan D 79
Gambar 4.32 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi B dan D 81
Gambar 4.33 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi B dan D 82
Gambar 4.34 grafik Cp *trailing edge* untuk semua konfigurasi 84
Gambar 4.35 profil kecepatan di titik O untuk semua konfigurasi 85
Gambar 4.36 *turbulent kinetic energy* di titik O untuk semua konfigurasi 86
Gambar 4.37 perbandingan grafik Cp dengan variasi r/t (a) konfigurasi A (b) konfigurasi B (c) konfigurasi C (d) konfigurasi D 87

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Karakteristik Bubble untuk setiap nilai Re **Samson et al [3]** 14
Tabel 2.2 Analisis *grid* independensi dengan koefisien *drag* dan koefisien *lift* 28
Tabel 3.1 Konfigurasi uji 30
Tabel 3.2 *Mesh Quality* 38
Tabel 3.3 Jadwal pelaksanaan penelitian 41
Tabel 4.1 *Grid Independency* pada benda uji *c/t=6,5* 45
Tabel 4.1 *Grid Independency* pada benda uji *c/t=6,5* 45
Tabel 4.3 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji A 51
Tabel 4.3 data *Shape factor* konfigurasi A 52
Tabel 4.4 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji B 53
Tabel 4.5 data *Shape factor* Konfigurasi B 54
Tabel 4.6 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji C 56
Tabel 4.7 data *Shape factor* Konfigurasi C 57
Tabel 4.6 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji D 58
Tabel 4.8 data *Shape factor* Konfigurasi D 59
Tabel 4.9 Perbandingan dimensi *bubble* konfigurasi A dan B 60
Tabel 4.10 Perbandingan dimensi *bubble* konfigurasi C dan D 63
Tabel 4.11 Perbandingan dimensi *bubble* konfigurasi A dan C 66
Tabel 4.12 Perbandingan dimensi *bubble* konfigurasi B dan D 69
Tabel 4.13 analisa titik *reattachment* dan dimensi *bubble* 71
Tabel 4.14 *Shape factor* untuk semua konfigurasi 72
Tabel 4.15 Perbandingan karakteristik *bubble* dan *Shape factor* dengan penelitian **Rafrisah [13]** 88

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi membuat Engineer di dunia berusaha menciptakan kendaraan dengan performa yang optimal. Hal tersebut salah satunya dapat dicapai dengan penggunaan desain bodi aerodinamis sebagai upaya mereduksi gaya drag pada kendaraan. Terjadinya reduksi gaya drag akan mengurangi energi yang hilang sehingga konsumsi bahan bakar kendaraan menjadi semakin efisien. Salah satu metode untuk mereduksi drag adalah dengan memundurkan titik separasinya dengan cara mempercepat transisi boundary layer dari laminar ke turbulen. Aliran turbulen memiliki momentum yang lebih besar sehingga mampu melawan adverse pressure lebih lama dan memundurkan titik separasi lebih jauh. Mempercepat transisi boundary layer dapat dilakukan dengan memaksa aliran untuk bertransisi menggunakan metode active control.

Active control adalah metode mempercepat transisi boundary layer dengan cara menambahkan aksesoris – aksesoris tertentu. Salah satu upaya pemanfaatan metode *active control* adalah penambahan *obstacle* pada bodi. Penelitian yang dilakukan oleh **Ghoddoussi [1]** tentang studi peningkatan performa Airfoil dengan penambahan *obstacle* tertentu. Jenis *obstacle* yang di terapkan adalah *stall vane, cylinder,* dan *dimple* pada *Re* 6 x 10^6. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa Airfoil apabila di berikan *obstacle* tertentu dengan treatment yang sama. Hasil yang didapat pada penelitian ini adalah *obstacle* berupa *stall vane* memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan *obstacle* berupa *cylinder* dan *dimple*. Penelitian selanjutnya dari **Hariyadi et al [2]** yang membahas tentang pengaruh perbandingan bentuk vortex generator dengan posisi straight pada wing Airfoil. *Obstacle* yang digunakan berupa *Flat Plate Vortex generator* dengan konfigurasi *Straight* dan ditempatkan pada x/c = 10% dan 20% rad *chord Line* dari *Leading Edge*. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa performa Airfoil dengan penambahan *Obstacle* meningkat

dilihati dari distribusi C_L/C_D yang terus menigkat. Kedua percobaan ini menunjukkan pengaruh dari adanya *Obstacle* dalam membantu mempercepat transisi turbulen. Aliran yang telah mengalami transisi inilah yang memiliki tambahan momentum dan mampu melawan *Adverse Pressure*.

Selain menggunakan active control, metode lain yang bisa dilakukan adalah dengan menggunakan passive control. Salah satu bentuk passive control adalah pengupayaan transisi boundary layer dari laminar ke turbulen melalui terbentuknya bubble separation. Bubble separation terbentuk dari proses separasi alian yang Kembali *attach*. Proses terbentuknya bubble separation yang langsung diikuti dengan terbentuknya turbulent boundary layer ini dimanfaatkan untuk menunda atau bahkan dapat meniadakan terjadinya separasi aliran masif pada downstream. Salah satu penelitian mengenai hal ini adalah penelitian yang dilakukan oleh **Samson et al [3]** yang meneliti tentang separasi *bubble* yang terbentuk pada *flat plate* dengan *leading edge* berbentuk semi sirkular. Penelitian tersebut dilakukan pada *low-speed wind tunnel* dengan variasi *Reynold number* antara 25000 hingga 75000. Penelitian itu menunjukkan bahwa *laminar flow* terjadi pada 20% dari total *separation length* pada *bubble*, setelah itu terbentuk turbulent boundary layer. Panjang *bubble* yang terbentuk berkembang lebih besar sebanding dengan nilai RE. Terbentuknya aliran turbulen menaikkan momentum pada aliran tersebut sehingga mampu melawan *adverse pressure* lebih besar. Penelitian lain yang dilakukan oleh **Aribowo [4]** mengenai mekanisme *stall* akibat tumbuh, berkembang, dan pecahnya separasi *bubble* pada permukaan sayap NACA 0017. Variasi pada penelitian ini adalah *Reynold number* pada nilai 7.1×10^4 dan 1.06×10^5 serta sudut serang (angle of attack) mulai dari sudut 0° hingga mencapai sudut *stall*-nya dengan interval 2°. Hasil yang didapat adalah penambahan sudut serang akan menyebabkan terjadinya separasi *bubble* dan penambahan sudut serang mengakibatkan titik separasi dan titik *reattachment* pada separasi *bubble* bergeser menuju *leading edge* hingga menimbulkan efek *stall*. Penelitian lain juga dilakukan oleh **Herbst et al [5]** tentang Analisa *bubble separation* pada

airfoil NACA SD7003 dengan *chord* c = 0,2 cm dan variasi *angle of attack* antara 4 hingga 16 derajat diuji pada *Reynold number* 60.000. Hasil yang didapat adalah terbentuk *bubble separation* pada *leading edge* dengan intensitas turbulensi sebesar 10% pada suction side. Dari ketiga penelitian di atas dapat di simpulkan bahwa separasi *bubble* mampu memintas transisi dari laminar ke turbulen sehingga momentum yang di dapat menjadi lebih besar dan energi untuk melawan *adverse pressure gradient* menjadi lebih besar.

Bubble Separation terbentuk sebagai hasil dari aliran yang terseparasi kemudian *reattach*. Kemampuan aliran untuk *reattach* dipengaruhi oleh adanya penambahan energy (*entrainment energy*) yang didapatkan dari *primary flow* (*primary flow*) dan adanya kesempatan bagi aliran yang terseparasi untuk *reattach* melalui bidang tumpu aliran dibelakang yang cukup panjang. Penelitian mengenai pengaruh *Reynolds number* ataupun bentuk *Leading edge* telah banyak dikemukakan, namun penelitian mengenai kombinasi pengaruh *dynamic force* aliran yang direpresentasikan oleh *Reynolds number* pada bentuk *leading edge* tertentu serta panjang bidang tumpu aliran hampir tidak pernah dikemukakan. Panjang bidang tumpu aliran merupakan jarak antara dua titik potensi separasi aliran depan dan belakang. Penambahan panjang bidang tumpu aliran di belakang *leading edge* diduga dapat memperbesar kesempatan aliran untuk *reattach*. Fenomena ini sangat menarik untuk diteliti lebih jauh karena dengan mempercepat *reattachment* akan memundurkan separasi *massive* di belakangnya.

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 masif di daerah buritan. 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 buritan.

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* ($Re_t = 6.76\times10^4$ dan $Re_t = 10.15\times10^4$) 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 buritan. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimen yang divalidasi menggunakan metode numerik.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik aliran dua dimensi pada *thick plate-rounded leading edge* berupa Analisa :
   a. koefisien tekanan (c_p) pada daerah *upper side* hasil dari eksperimen dan simulasi numerik
   b. visualisasi kontur *pathlines*, kecepatan dan tekanan
   c. *velocity profile, turbulent kinetic energy* dan *shear* pada titik setelah *reattachment*.
2. Mengetahui hubungan antara panjang bidang tumpu aliran yang terkorelasi dengan bilangan Reynolds tertentu dan bentuk *leading edge* tertentu dengan ukuran *separation bubble* serta pengaruhnya terhadap separasi massif 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* 20 mm yang terkorelasi dengan panjang bidang tumpu aliran sepanjang 650 mm dan 1000 mm.
2. Kaji eksperimen dilakukan pada terowongan angin dan dipertegas melalui pemodelan numerik (CFD) menggunakan perangkat lunak *ANSYS (Fluent)* dengan *Boundary Condition* untuk *inlet*-nya adalah *Velocity inlet* sedangkan pada posisi *outlet* adalah *Pressure outlet.*
3. Penelitian dilakukan secara dua dimensi dengan fokus pengukuran pada daerah *upperside* di midspan.
4. Fluida kerja yang digunakan adalah udara, dengan sifat aliran pada *upstream* adalah *steady flow*, *incompressible viscous flow*, *uniform*, dan tanpa *heat transfer*.
5. Perubahan geometri pada daerah *lower side* diabaikan.

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 = 6.76×10^4 dan Re_t = 10.15×10^4) 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) 18.1* akibat pengaruh *Reynolds number* (Re_t = 6.76×10^4 dan Re_t = 10.15×10^4) 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 rumusan 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 pengujian yang disertai dengan *flow chart* baik untuk metode eksperimen maupun metode numerik.

BAB IV. HASIL 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 teori-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.

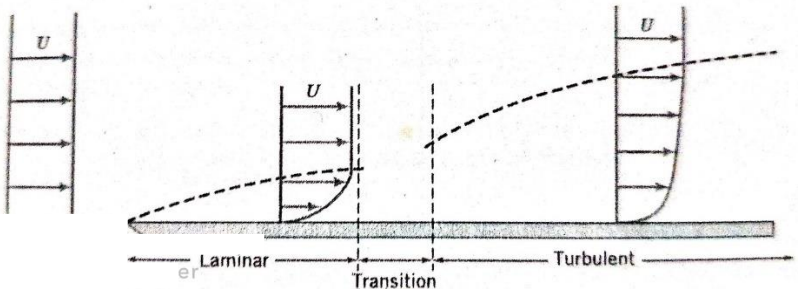
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1. Boundary Layer

Boundary Layer adalah lapisan tipis dekat permukaan dinding dimana aliran terpengaruh oleh tegangan geser. Tegangan geser pada permukaan bodi menurunkan kecepatan *primary flow*. Pengaruh ini secara bertahap berkurang seiring dengan jarak streamline terhadap permukaan bodi (Viscous Region) hingga pada jarak tertentu dimana profil kecepatan dari streamline tidak terpengaruh lagi dengan tegangan geser (Inviscid Region). Secara visual, Viscous region dan Inviscid region dipisahkan oleh garis semu yang dinamakan Boundary Layer Edge. **Fox [6]**

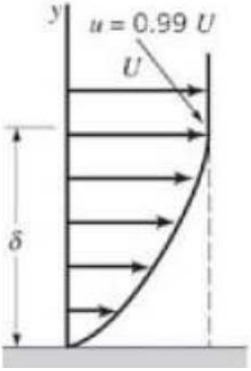
Fenomena terbentuknya Boundary Layer terjadi saat *freestream* menyentuh permukaan bodi. Pada saat aliran menyentuh permukaan bodi, karakteristik partikel – partikel aliran bergerak secara uniform atau berada pada kondisi Laminar Boundary Layer. Setelah fluida mengalir sepanjang permukaan, aliran fluida mengalami perubahan profil kecepatan akibat tegangan geser sehingga boundary layer mengalami perkembangan. Setelah boundary layer berkembang pada jarak tertentu, partikel – partikel fluida bergerak secara acak sehingga terjadi pertukaran momentum antar partikel. Adanya pertukaran momentum ini menyebabkan momentum aliran bertambah dan boundary layer aliran berubah menjadi Turbulent Boundary Layer. Gambar 2.1 memperlihatkan proses terbentuknya Laminar Boundary Layer dan Turbulent Boundary Layer.



Gambar 2.1 Boundary Layer **Fox [6]**

2.1.1.1. **Boundar Layer Thickness**

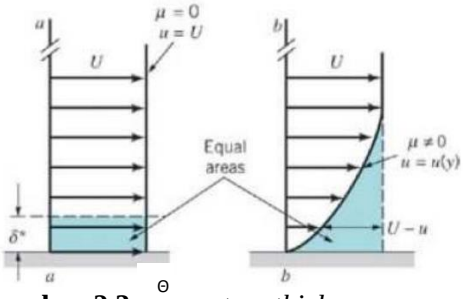
Aliran *uniform* yang mengalir dekat dengan permukaan benda yang dilaluinya akan mendapatkan *friction* akibat kekasaran pemukaan. Hal ini menyebabkan kecepatan di daerah dekat permukaan mengalami penurunan yang sangat drastis hingga mencapai u = 0 (aliran melekat pada permukaan). Pengaruh dari *friction* dari permukaan terhadap profil aliran perlahan melemah seiring dengan kenaikan jarak antara *streamline* dengan permukaan (disimbolkan dengan δ). Pegaruh dari *friction* bisa dikatakan sudah hilang apabila nilai kecepatan aliran pada *streamline* adalah 99% nilai kecepatan aliran *freestream*. Nilai δ pada nilai profil kecepatan 99% U adalah *boundary layer thickness*.



Gambar 2.2 profil kecepatan pada *external flow*

2.1.1.2. *Momentum thickness* dan *displacement thickness*

Momentum thickness (Θ) merupakan nilai yang menunjukkan defisit massa aliran dalam *boundary layer* jika dibandingkan dengan aliran *freestream*. *Streamline* yang berada dekat dengan permukaan benda akan mengelami defisit massa yang lebih besar daripada *streamline* di atasnya sehingga profil kecepatan membentuk kurva seperti gambar 2.3.



Gambar 2.3 *momentum thickness*

Untuk mendapatkan harga *momentum thickness* maka digunakan perumusan sebagai berikut dengan asumsi aliran *incompressible*.

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

Untuk mempermudah perhitungan, dilakukan integrasi numerik menggunakan metode trapezium untuk persamaan *momentum thickness* sehingga didapatkan :

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

Dimana :

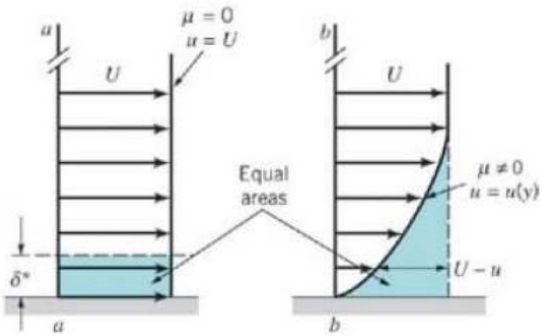
Θ : *momentum thickness*

δ : *boundary layer thickness*

u : kecepatan pada titik y (m/s)

U : kecepatan pada daerah *inviscid* (m/s)

Momentum thickness (Θ) merupakan nilai yang menunjukkan defisit momentum aliran dalam *boundary layer* jika dibandingkan dengan aliran *freestream*. *Streamline* yang berada dekat dengan permukaan benda akan mengelami defisit momentum yang lebih besar daripada *streamline* di atasnya sehingga profil kecepatan membentuk kurva seperti gambar 2.4



Gambar 2.4 *displacement thickness*

Untuk mendapatkan harga *displacement thickness* maka digunakan perumusan sebagai berikut dengan asumsi aliran *incompressible*.

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

Untuk mempermudah perhitungan, dilakukan integrasi numerik menggunakan metode trapezium untuk persamaan *displacement thickness* sehingga didapatkan :

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

Dimana :

δ^* : *displacement thickness*

δ : *boundary layer thickness*

u : kecepatan pada titik y (m/s)

U : kecepatan pada daerah *inviscid* (m/s)

2.1.1.3. ***Shape factor***

Shape factor merupakan bilangan tak berdimensi yang dapat menunjukkan kondisi *boundary layer* aliran, apakah laminar atau turbulen. Nilai *shape factor* didapatkan dari perbandingan antara *displacement thickness* dengan nilai *momentum thickness*. Secara rumus, nilai *shape factor* didapatkan sebagai berikut :

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

Dimana :

H : *Shape factor*

δ^* : *displacement thickness*

Θ : *momentum thickness*

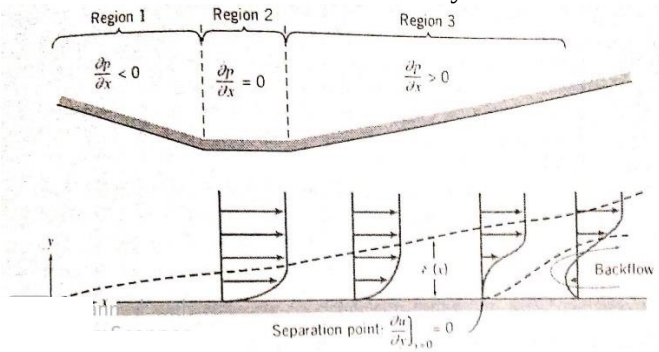
untuk analisa aliran pada *external flow*, terdapat beberapa batasan nilai untuk setiap kondisi. Nilai *shape factor* untuk aliran laminar berada pada kisaran 2.5 ~ 3.5, untuk aliran turbulen pada kisaran 1.2~1.4, sedagkan nilai *shape factor* 1 untuk aliran *inviscid*.

2.1.2. Separasi Aliran

Separasi aliran merupakan suatu fenomena yang terjadi pada suatu bodi dimana aliran yang melewatinya terpisah menjauhi surface bodi. Fenomena terpisahnya aliran biasa terjadi pada bodi dengan bentuk surface yang tidak datar pada daerah buritan. Fenomena ini terjadi akibat adanya *backflow* aliran yang terbentuk karena perbedaan tekanan antara *upstream flow* dengan *downstream flow*. Perbedaan tekanan ini disebabkan oleh perbedaan luas penampang *streamtube* yang menyebabkan tekanan *downstream flow* lebih besar daripada *upstream flow*. Perbedaan tekanan inilah yang akan mengakibatkan tekanan balik atau *adverse pressure* dan menimbulkan *backflow* yang arahnya berlawanan dengan arah aliran datang. Aliran datang yang tidak bisa melawan *adverse pressure* akan terdefleksi menjauhi permukaan bodi atau mengalami divergensi.

. Weldan et al (2008) menyatakan bahwa energi yang dibawa oleh aliran berpotensi (laminar *boundary layer*) sudah tidak mampu mempengaruhi daerah dengan intensitas energi tinggi akibat tegangan

geser (daerah *viscous*). Sehingga energi yang ada pada daerah *viscous* melemparkan aliran berpotensi menjauhi daerah *viscous* dan membentuk distribusi tekanan di bawahnya.

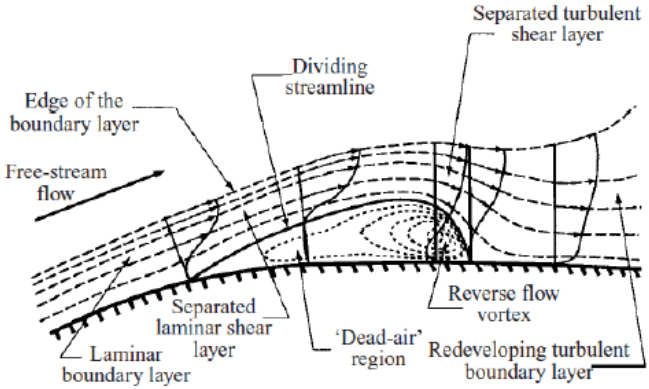


Gambar 2.5 Mekanisme terjadinya separasi aliran **Fox [6]**

Pada umumnya, separasi yang terjadi pada suatu permukaan bodi merupakan separasi [illegible] aliran terpisah menjauhi bodi yang dilewatinya. Namun pada kenyataannya, terdapat suatu fenomena menarik dimana suatu aliran yang terseparasi mengalami *recovery* dan *reattach* ke permukaan bodi. Fenomena ini dinamakan dengan *Bubble Separation*.

2.1.3. Bubble Separation

Ketika aliran yang terseparasi kemudian kembali *attach*, maka aliran di bawahnya akan mengalami *backflow* akibat tidak mampu melawan *adverse pressure*. Backflow akan terus mengalir dengan arah sirkular sehingga terjadi aliran stasioner berbentuk gelembung. Fenomena ini disebut *Bubble Separation*. Menurut **Samson et al [3],** aliran yang melewati *bubble separation* akan bertransisi menjadi aliran turbulen karena permukaan *bubble separation* telah membentuk *shear layer*. *Shear layer* yang terbentuk menambah momentum *primary flow* akibat aliran dalam *bubble* yang tidak stabil.



Gambar 2.6 Struktur Laminar Bubble Separation **Samson et al [3]**

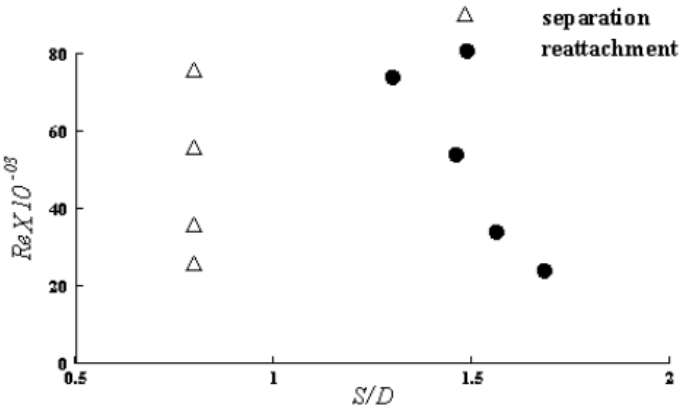
Terbentuknya *bubble separation* disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satunya adalah bertambahnya momentum aliran yang disebabkan oleh adanya *Entrainment Energy* dari aliran datang (*primary flow*) menuju aliran terseparasi (*secondary flow*) setelah melewati *bubble separation* sehingga memungkinkan aliran kembali *attach*. Faktor lain yang menyebabkan terjadinya *bubble separation* adalah adanya *supporting flow surface* yang tidak menginduksikan *adverse pressure* yang cukup besar sehingga aliran yang terseparasi memiliki kesempatan untuk *recovery* dan *attach* pada bodi penumpu aliran.

2.2. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui dan mempelajari fenomena terbentuknya *Bubble separation.* **Samson et al [3]** melakukan penelitian tentang terbentuknya bubble separation pada Flat Plate dengan bentuk leading edge semi sirkular. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari nilai Reynold number terhadap bubble separation yang terbentuk. Penelitian ini dilakukan dengan cara eksperimen. Eksperimen ini dilakukan pada low speed wind tunnel dengan dimensi test section sebesar 324mm x 178mm x 1350mm. dimensi spesimen yang diuji berupa flat plate dengan

diameter leading edge (D) sebesar 80mm, lebar spesimen menyentuh dinding test section, serta panjang flat portion sebesar 10D diikuti tail edge sepanjang 1.5D. Untuk penambilan data, Tekanan statis pada permukaan benda uji di ukur dengan Electronically Scanned Pressure Sensor (ESP) sedangkan visualisasi aliran menggunakan planar PIV.

Pada penelitian ini, **Samson et al [3]** menunjukkan berbagai hasil yang bisa didapat pada eksperimen yang telah dilakukan. Gambar 2.3 menunjukkan variasi panjang reattachment terhadap nilai Reynold Number. Pada esperimen ini, nilai Re yang digunakan adalah 25000 , 35000, 55000, dan 75000.



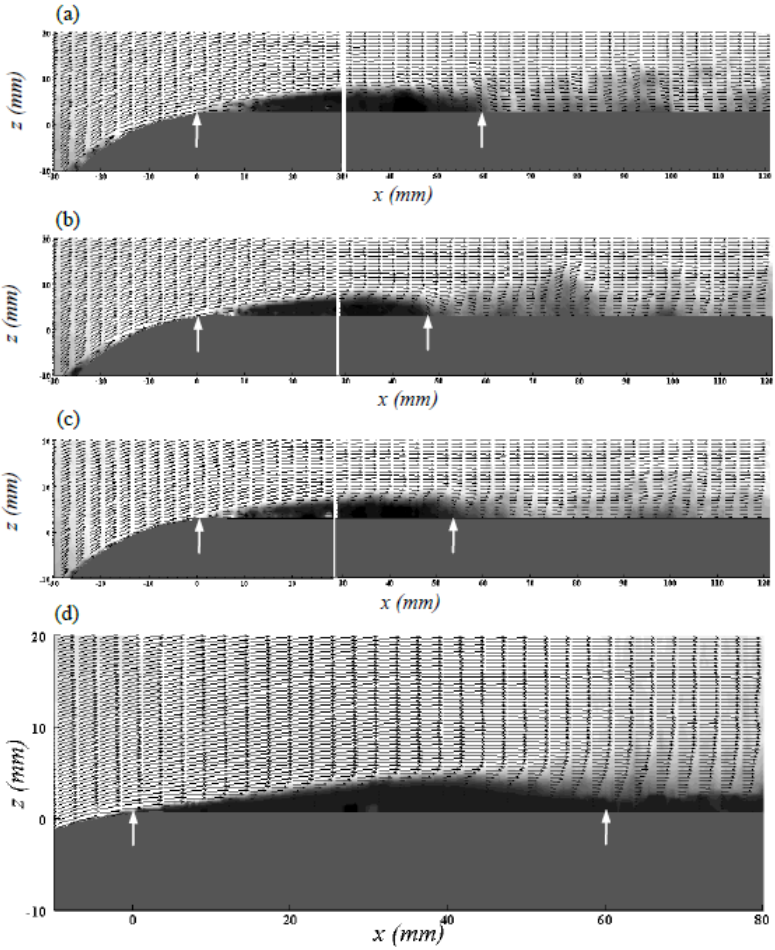
Gambar 2.7 Variasi Reattachment dengan nilai RE **Samson et al [3]**

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa pada RE = 25000, jarak antara titik separasi dan titik reattachment (S/D) relative lebih panjang jika dibandingkan pada nilai RE yang lain. Panjang S/D terus mengalami penurunan seiring dengan kenaikan nilai RE. Data lengkap mengenai *bubble* yang terbentuk dapat dilihat pada tabel 2.1.

Re	*l* (mm)	*h* (mm)	θ_s (mm)	l/θ_s	h/θ_s	u_e (m/s)	$St_{\theta s}$
25000	71.5	5	0.207	345.3	24.2	6.02	0.007
35000	62.1	4	0.171	363.2	23.4	8.25	0.008
55000	54.3	3.2	0.125	434.4	25.6	12.73	0.008
75000	37.1	1.5	0.101	368.0	14.9	17.87	0.012

Tabel 2.1 Karakteristik Bubble untuk setiap nilai Re **Samson et al [3]**

Gambar 2.5 menunjukkan visualisasi aliran yang terseparasi tepat setelah melewati leading edge hingga Kembali *attach* pada nilai x (mm) tertentu pada nilai RE = 35000.

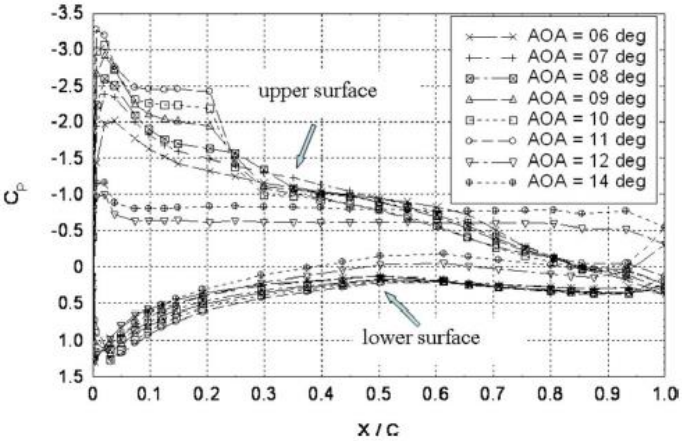


Gambar 2.8 iso-contour dari kecepatan stramwise pada RE = 35000 : (a) – (c) Panjang bubble dilihat pada 3 waktu berbeda, (d) panjang bubble rata – rata. **Samson et al [3]**

Penelitian yang telah dilakukan oleh **Samson et al [3]** telah berhasil menunjukkan pengaruh antara variasi nilai Re dengan *bubble separation* yang terjadi, dibuktikan dengan visualisasi panjang *bubble* yang terbentuk baik melalui visualisasi plot grafik maupun visualisasi PIV. Namun penelitian ini tidak menunjukkan pengaruh antara panjang bidang datar penumpu aliran di belakang *bubble* terhadap kemampuan aliran untuk kembali *reattach* sesuai dengan penelitian yang akan dilakukan. *Reynold number*

Hu dan Yang [7] juga melakukan penelitian yang membahas tentang Separasi *Bubble* yang terbentuk pada sebuah Airfoil dengan variasi *Angle of Attack* (AOA). Penelitian ini dilakukan secara eksperimental. Eksperimen dilakukan di dalam *close circuit low-speed wind tunnel* dengan luas penampang 30 x 30 cm^2. *Wind tunnel* yang digunakan memiliki daerah *contraction* yang berada di bagian *upstream test section*. Daerah ini berisi *honeycomb, screen structures,* dan*cooling section* untuk menkondisikan aliran di dalam *wind tunnel* sebagai *uniform flow*. Benda uji berupa Airfoil NASA LS(1)-0417) atau GA (W)-1 dengan panjang chord 101 mm dan *maximum thickness* sebesar 17% dari panjang chord. Di bagian *midspan* dipasang 43 *presure tap* untuk menangkap nilai *pressure coefficient*. Eksperimen dilakukan dengan kecepatan udara *freestream* U_∞ = 10,7 m/s yang merepresentasikan nilai Re = 70000. Variasi AOA yang digunakan dalam eksperimen ini adalah pada AOA 06 deg – 14 deg dengan interval 01 deg. Untuk menunjang pengambilan data *surface pressure distribution,* digunakan Particle Image Velocimetry (PIV).

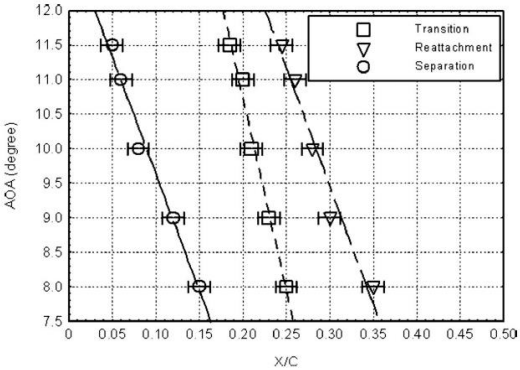
Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah terdapat kenaikan nilai *pressure coefficient* (c_p) seiring dengan kenaikan nilai AOA mulai dari 06 deg – 12 deg. Namun pada nilai AOA diatas 12 deg, nilai c_p mengalami penurunan yang sangat drastis. Hasil lainnya adalah terlihatnya perubahan proporsi *laminar separation bubble* dimana daerah *laminar portion* semakin melebar sedangkan daerah *turbulent portion* semakin menyempit seiring kenaikan nilai AOA.



Gambar 2.9 distribusi c_p dengan variasi nilai AOA **Hu dan Yang [7]**

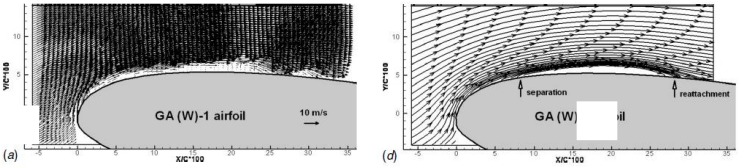
Pada grafik di atas, terlihat bahwa kurva yang terbentuk oleh nilai c_p untuk berbagai nilai AOA (symbol berbeda untuk tiap nilai AOA) semakin naik seiring dengan kenaikan nilai AOA. Hal ini terjadi karena aliran yang melewati *lamainar separation bubble* akan bertransisi menjadi *turbulent flow* dan mendapatkan tambahan momentum sehingga dapat melawan *adverse pressure gradient* di bagian *downstream.* Jika dilihat pada grafik diatas, maka dapat dijumpai sebuah kurva yang mendatar kemudian menurun secara tiba – tiba pada x/c 0.1 – 0.2. daerah itulah dimana aliran mengalami separasi kemudian *reattach* sehingga membentuk *laminar separation bubble.* Pada penelitian ini, diketahui bahwa dimensi dari *laminar separation bubble* tidak mengalami perubahan (~20% dari panjang chord length) namun posisi dari *laminar separation bubble* akan bergeser menuju *upstream* seiring dengan kenaikan nilai AOA. Jika di lihat pada grafik diatas, maka dapat dilihat bahwa titik tertinggi dari nilai c_p untuk nilai AOA yang semakin naik akan semakin mendekati nilai 0 (x/c). bentuk kurva yang uniform terbentuk pada nilai AOA 06 deg – 11 deg. Pada nilai AOA 12 deg – 14 deg, kurva yang terbentuk

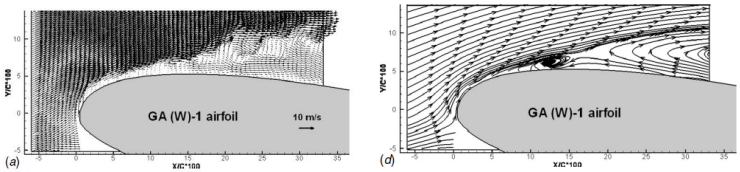
cenderung datar dengan nilai c_p yang rendah dan konstan. Hal ini terjadi karena mulai dari nilai AOA 12 deg, nilai *lift coefficient* menurun secara drastis diiringi dengan kenaikan nilai *drag coefficient* secara signifikan. *Laminar separation bubble* yang terbentuk kemudian "pecah" dan menimbulkan separasi massif yang sangat besar di daerah downstream sehinga menyebabkan fenomena *stall*.



Gambar 2.10 estimasi titik separasi, transisi, dan *reattachment* **Hu dan Yang [7]**

Jika dilihat pada gambar di atas, dapat diketahui bahwa pada nilai AOA 08 deg, *laminar portion* dan *turbulent portion* memiliki jarak yang sama. Namun seiring dengan kenaikan nilai AOA, titik transisi bergeser menuju ke titik *reattachment* sehingga mengakibatkan *laminar portion* menjadi semakin lebar dan *turbulent portion* semakin sempit.

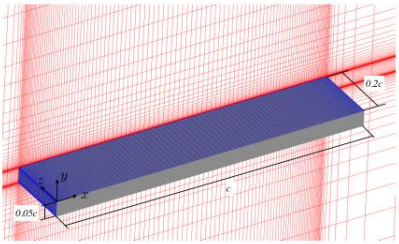




Gambar 2.11 visualisasi aliran yang melewati airfoil dengan *tantaneous velocity vector* (kanan) dan *streamline of the mean flow* (kiri) pada (a) 10 deg dan (b) 12 deg **Hu dan Yang [7]**

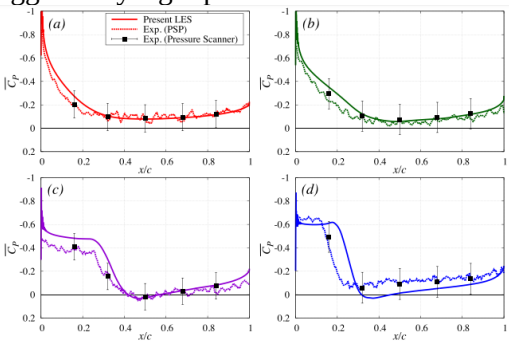
Gambar di atas menunjukkan perbandingan aliran yang melewati *leading edge* secara visual antara nilai AOA 10 deg dengan AOA 12 deg. Dapat di lihat pada gambar *streamline* di bagian kanan bahwa pada nilai AOA 10 deg, aliran mengalami separasi di suatu titik yang kemudian mengalami *reattachment* di belakangnya. Sedangkan pada nilai AOA 12 deg, dengan skala yang sama aliran yang melewati *leading edge* mengalami separasi namun tidak dijumpai adanya fenomena *reattachment* di belakangnya. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran mengalami separasi massif dan terjadi *stall*.

Lee et al [8] juga melakukan penelitian yang berhubungan dengan *laminar separation bubble*. Pada penelitian ini, dilakukan eksperimen untuk mengetahui mekanisme distribusi *surface pressure* pada *laminar separation bubble* dengan nilai Reynolds number (Re) yang berbeda. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimen dan numerik (simulasi) dengan benda uji berupa *blunt flat plate* dengan nilai *thickness* sebesar 5% dari total panjang chord. Variasi Reynolds number yang digunakan adalah 5.0 x 10^3, 6.1 x 10^3, 1.1 x 10^4, dan 2.0 x 10^4. Permodelan untuk simulasi (mesh) memiliki konfigurasi sebagai berikut : *blunt flat plate* memiliki *thickness* sebesar 0.05c dan untuk lebar penampang sebesar 0.2c. *Outer boundary* dari benda di atur sebesar 25 kali dari panjang chord. *Surface* dari benda uji dikondisikan sebagai *no slip* dan *adiabatic*. *Free stream Mach number* $M_\infty = u_\infty/a_\infty$ frngan *zero free stream turbulence*. Nilai *specific heat ratio* γ dan nilai Prandtl number di atur pada 0.2, 1.4, dan 0.72.



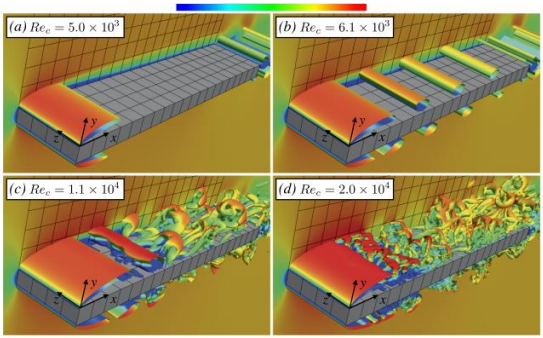
Gambar 2.12 Meshgrid benda uji **Lee et al [8]**

Untuk eksperimen, *pressure distribution* diukur dengan Tehnik PSP dan *multichannel pressure scanner*. Kemudian data *pressure distribution* yang diperoleh dari kedua metode di atas dibandingkan dengan data hasil simulasi dengan standar deviasi sebesar 2σ. Hasil dari kedua metode menunjukan bahwa nilai error berada di dalam batas toleransi sehingga data yang diperoleh adalah valid.



Gambar 2.13 perbandingan nilai *pressure distribution* antara metode PSP dan hasil simulasi **Lee et al [8]**

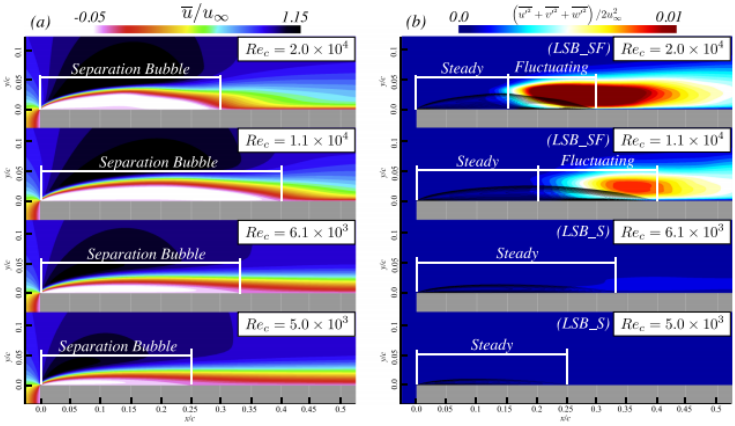
Hasil yang di dapatkan pada penelitian ini adalah adanya 2 klasifikasi *laminar sparation bubble* yang memiliki kaitan erat dengan kenaikan Reynolds number. Peneliti menyajikan sebuah visualisasi 3D (Gambar 2.10) untuk *Instantaneous flow structures* pada $tu_\infty/c = 24$ dan nilai Q – criterion (*isosurfaces* dari *second invariant* pada *velocity gradient tensor*) sama dengan 1, untuk mendapatkan visual yang lebih jelas.



Gambar 2.14 visualisasi *instantaneous flow structure* **Lee et al [8]**

Pada gambar 2.11 terlihat adanya perbedaan yang cukup signifikan. Pada Re 5.0 x 10^3, *laminar separation bubble* terjadi, namun tidak terlihat adanya olakan (*vortices)* yang terbentuk setelah aliran *reattach.* Pada Re 6.1 x 10^3, muncul *laminar vortices* yang uniform sepanjang span (olakan dapat di anggap sebagai 2 dimensi) dan terus berda pada fase laminar sepanjang *downstream*. Semakin tinggi kenaikan Reynolds number, maka olakan yang sebelumnya merupakan *laminar vortices* 2 dimensi kemudian pecah dan berubah menjadi *turbulent vortices* 3 dimensi pada Re 1.1 x 10^4 dan 2.0 x 10^4.

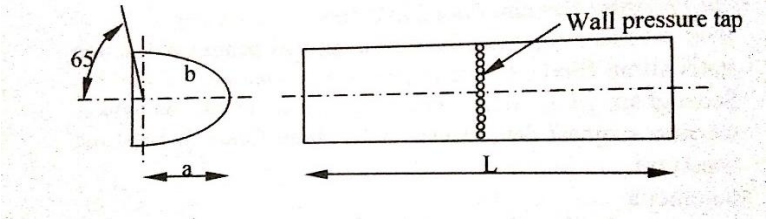
Pada gambar 2.11 (a) dapat diketahui bahwa untuk kenaikan nilai Re, *laminar separation bubble* maka titik *reattachment* semakin menuju *downstream*. Pada Re 5.0 x 10^3 titik *reattachment* berada pada $x_r/c = 0.25$. Pada Re 6.1 x 10^3 titik *reattachment* berada pada $x_r/c = 0.33$ dan pada Re 1.1 x 10^4 titik *reattachment* berada pada $x_r/c = 0.40$. akan tetapi untuk kenaikan nilai Re lebih jauh, titik *reattachment* akan mendekati *upstream* dibuktikan pada Re 2.0 x 10^4 titik *reattachment* berada pada $x_r/c = 0.30$. pada gambar 2.11 (b), disajikan data isual mengenai *turbulent kinetic energy*. Pada Re 5.0 x 10^3 dan 6.1 x 10^3, aliran mengalami fluktuasi yang sangat kecil (lebih kecil dari $0.0002u_\infty$) sehingga dapat diabaikan. Kondisi ini diklasifikasikan sebagai *Laminar Separation Bubble Steady* (LSB_S). sedangkan pada Re 1.1 x 10^4 dan 2.0 x 10^4 diketahui adanya dua region yang berbeda. Region



Gambar 2.15 (a) visualisasi *laminar separation bubble* secara 2D dan (b) visualisasi *turbulent kinetic energy* **Lee et al [8]**

pertama (0.0 . x/c . 0.25 pada Re = 1.1 × 10^4 dan 0.0 . x/c . 0.15 at Re = 2.0 × 10^4) memiliki fase yang sama dengan LSB_S sedangkan region kedua (0.25 . x/c . 0.40 pada Re = 1.1 × 10^4 dan 0.15 . x/c . 0.30 pada Re = 2.0 × 10^4) mulai terjadi fluktuasi dengan nilai *turbulent kinetic energy* yang tidak bisa diabaikan. Oleh karena kedua region ini selalu ada dan beriringan pada nilai Re yang lebih tinggi, maka kondisi ini diklasifikasikan sebagai *Laminar Separation Bubble Steady – Fluctuating* (LSB_SF).

Yadi [12] juga pernah melakukan penelitian yang mengenai karakteristik aliran fluida melintasi silinder teriris tipe-D dengan tambahan bentuk elips khusus. Penelitian ini dilakukan secara eksperimen. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *axis ratio* (b/a = 1, 3/5, 3/7, 3/9 dan 3/15) dengan nilai RE = 20000. Eksperimen ini dilakukan pada *wind tunnel* dengan dimensi *test section* 150 cm x 66 cm x 66 cm dan kecepatan maksimum *fan* sebesar 21 m/s. hasil yang didapat merupakan perbandingan nilai c_p dan perbandingan profil kecepatan di belakang tiap benda uji.



Gambar 2.16 Konfiurasi Benda uji **Yadi [12]**

dari penelitian ini dikatahui bahwa pada konfigurasi benda uji dengan b/a = 1, 3/5, 3/7, 3/9, dan 3/15 memiliki persamaan posisi terjadinya separasi massif di bagian depan, yakni pada sudut 65° (sisi *lower*) dan 285° (sisi *upper*). Namun pada konfigurasi benda uji dengan b/a = 1, 3/5, 3/7, dan 3/9 aliran tidak mengalami *reattachment* setelah terhempas dari dinding dan menimbulkan separasi masif. Sedangkan pada konfigurasi benda uji dengan b/a = 3/15 aliran yang terseparasi di depan Kembali *attach* dan membentuk separasi *bubble*. Hal ini bisa terjadi karena pada konfigurasi benda uji dengan b/1 = 1, 3/5, 3/7, dan 3/9 tidak memiliki cukup panjang di daerah belakang sehingga nilai *aderse pressure gradient* menjadi tinggi. Hal ini membuat momentum yang dimiliki *primary flow* tidak cukup kuat untuk membantu aliran yang terseparasi untuk Kembali *attach.* Sedangkan pada konfigurasi benda uji dengan b/a = 3/15 bagian belakang benda uji sudah cukup panjang seingga membuat nilai *adverse pressure gradient* menjadi rendah. Dengan begitu momentum *primary flow* mampu untuk *reattachment*.

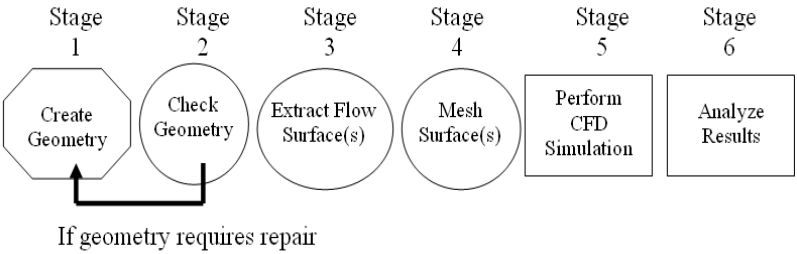
2.3 Numerical Modeling

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 seperi 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 2.12.



Gambar 2. 17 Blok diagram simulasi dengan CFD

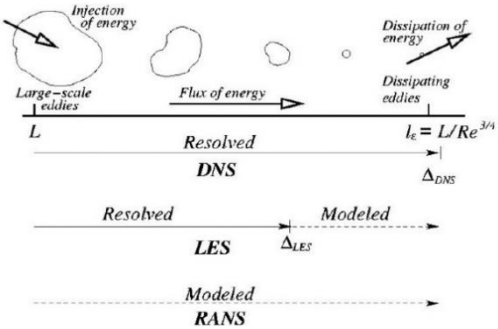
Sampai saat ini, CFD telah banyak digunakan dalam bidang aplikasi, baik untuk keperluan riset optimasi desain maupun untuk aplikasi praktis. Beragam industri dari pembangkit listrik sampai industri perminyakan memanfaatkan untuk menganalisa sistem.Industri pembangkit listrik menggunakan untuk mensimulasikan 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

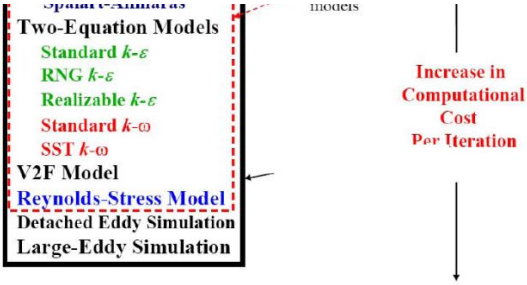
Turbulensi terjadi jika dalam aliran terdapat pusaran (*Eddy*), baik yang berukuran besar maupun kecil. Tiap ukuran *Eddy* memiliki karakteristik tertentu, sesuai dengan energi pusaran (kecepatan rotasi / *turbulent velocity scale* / u) yang dimilikinya.

Gambar 2. 18 Karakteristik *Eddy* dalam turbulensi

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 2.19 *Energy Cascade* antara *Large Eddy* dengan *Small Eddy*



Gambar 2. 20 Pendekatan *Turbulence Modeling*

2.3.3. Deskripsi RANS Turbulance 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-ε*: pemodelan yang mengguakan dua persamaan *transport* untuk menyelesaikan model *k-ε.* Model ini cocok untuk masalah *heating, buoyancy* dan *compressibility*, namun tidak cocok untuk aliran kompleks seperti pada *separation.*
- *RNG k-ε* : variasi pemodelan dari *Standard k-ε model.* Model ini dapat memperbaiki model yang mempunyai *highly strained flows* dan cocok untuk *Reynolds number* yang rendah yang mempunyai efek *swirling.*
- *Realizable k-ε*: variasi pemodelan dari *Standard k-ε model.* Dengan menggunakan model ini dapat dilakukan untuk menentang penggunaan *mathematical constrains.*
- *Standard k-ω*: pemodelan yang menggunakan dua persamaan *transport model* unuk memecahkan *k-ω.* Model ini cocok untuk *Reynolds number* kecil. Pemodelan ini dapat menampilkan transisi aliran dari aliran laminar menuju aliran turbulen.

- *Shear-Stress Transport (SST) k-ω* : variasi dari pemodelan *Standard k-ω.* Model ini digunakan untuk meningkatkan akurasi *k-ω model* di *near-wall region* dimana *free stream* yang tidak tergantung pada *k- model* untuk aliran *external flow* dengan mengkombinasikan *k-ε model. SST k-ω* cocok untuk mensimulasikan aliran yang mempunyai *advers pressure gradient.*
- *Reynolds Stress Model (RSM)* : pemodelan yang menggunakan lima persamaan *transport* unuk 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 Grid Independency

Dari penelitian terdahulu saat melakukan simulasi, perlu memperihatikan *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].

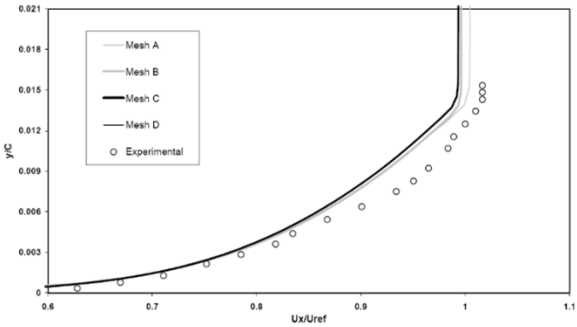
Pada penelitian Mulvany et al, *Grid* independensi menggunakan empat *mesh* dengan variasi jumlah *cell.* Penelitian ini menggunakan model *Realizable k-ε* untuk simulasinya dengan kecepatan *freestream* sebesar 3 m/s. Pada tabel 2.1 diperlihatkan analisa koefisien *lift,* koefisien *drag* dan masing–masing presentase *error post processing* numerik terhadap nilai eksperimental untuk setiap *mesh.* Pada tabel tersebut dapat dilihat penggabungan nilai *error*

dengan prediksi koefisien *lift* yang turun seiring dengan penghalusan *mesh*, namun nilai *error* meningkat dari prediksi koefisien *drag*. Pada mesh C dan mesh D memiliki nilai koefisien nilai yang sama, sehingga syarat *grid indepence* terpenuhi.

Tabel 2. 2 Analisis *grid* independensi dengan koefisien *Drag* dan koefisien *lift*

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

Pada gambar 2.16 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 dibandigkan *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.

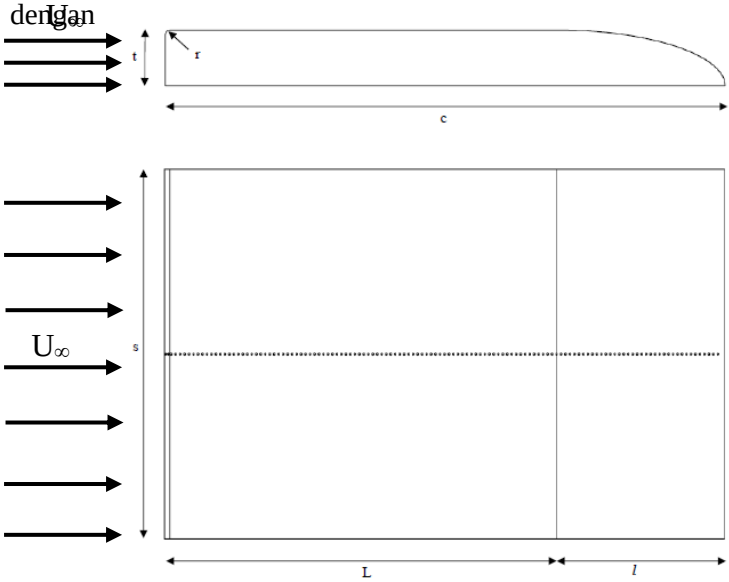


Gambar 2.21 Grafik profil kecepatan pada 93%C

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



Gambar 3. 1 Parameter pengukuran

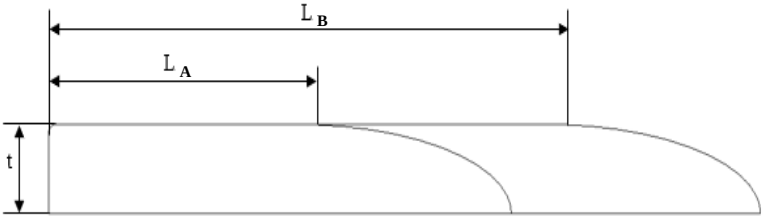
leading edge berupa *rounded* dengan jari-jari tertentu dan *trailing edge* yang berupa oval. Pada gambar 3.1 diperlihatkan parameter pengukuran yang digunakan pada penelitian ini.

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*

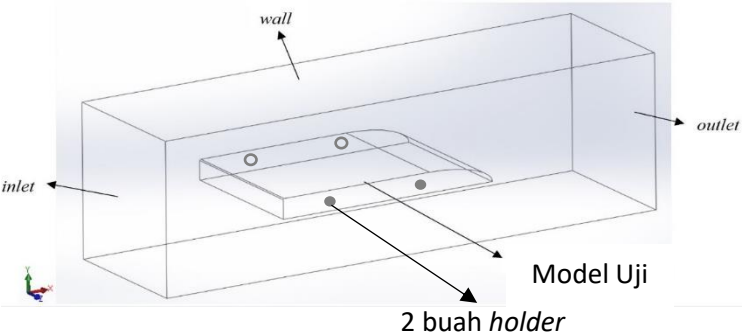


Gambar 3. 2 Konfigurasi uji

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 panjang *trailing edge* yang tetap (300 mm). Kedua panjang bidang tumpu aliran tersebut akan diamati pada dua bilangan Reynolds yang berbeda, yaitu pada $Re_t = 6.76\times10^4$ dan $Re_t = 10.15\times10^4$. Sehingga penelitian ini memiliki konfigurasi uji sebagai berikut.

Tabel 3.1 Konfigurasi uji

Konfigurasi	L/t	Re
A	3.5	6.76×10^4
B	3.5	10.15×10^4
C	7	6.76×10^4
D	7	10.15×10^4



Gambar 3. 3 Konfigurasi benda uji pada *test section*

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* ($Re_t = 6.76\times10^4$ dan $Re_t = 10.15\times10^4$) 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:

$$X_1 = \frac{\Delta p}{\rho {V_\infty}^2}$$

$$X_2 = \frac{\rho V_\infty D_h}{\mu}$$

$$X_3 = \frac{r}{t}$$

$$X_4 = \frac{L}{t}$$

$$X_5 = \frac{l}{t}$$

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:

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

$$\frac{\Delta p}{\rho {V_\infty}^2} = f_1(\frac{\rho V_\infty D_h}{\mu}, \frac{r}{t}, \frac{L}{t}, \frac{l}{t})$$

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

$$\frac{\Delta p}{\rho {V_\infty}^2} = f_2(\frac{\rho V_\infty D_h}{\mu}, \frac{L}{t})$$

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*, maka:

$$\frac{\Delta p}{\rho {V_\infty}^2} = f_2(\frac{\rho V_\infty t}{\mu}, \frac{L}{t})$$

Dengan kata lain:

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

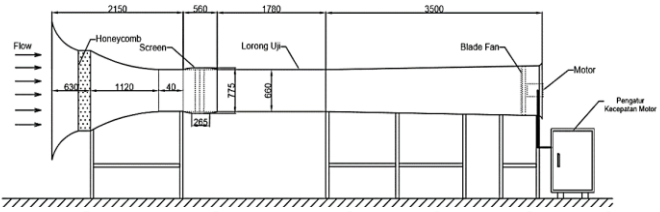
3.3. Metode Eksperimen

3.3.1. Peralatan Eksperimen

Adapun 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

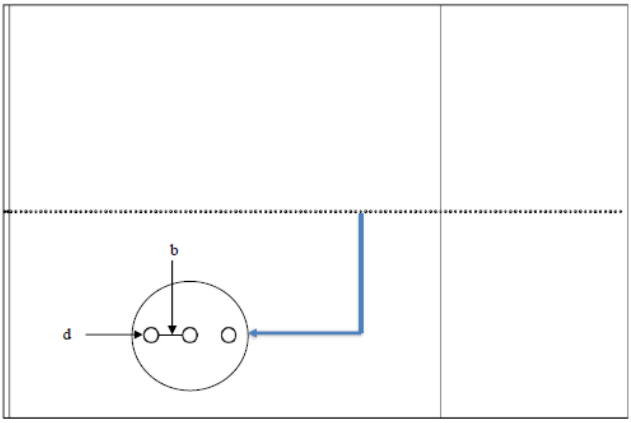


Gambar 3. 4 Skema *wind tunnel* yang digunakan

panjang 1780 mm, lebar 660 mm dan tinggi 660 mm serta mampu beroperasi pada kecepatan maksimum 21 m/s. Pada gambar 3.3 diperlihatkan skema *wind tunnel* yang digunakan pada penelitian ini.

2. ***Wall Pressure Tap***

   Sebanyak 156 *Wall pressure tap* (c/t = 6,5) dan 223 *Wall Pressure tap* (c/t = 10) digunakan untuk mengukur tekanan statis aliran fluida yang dipasang pada permukaan benda uji seperti pada gambar 3.4. Terdapat 2 buah *wall pressure tap* di bagian depan dengan masing-masing jaraknya adalah 5 mm, 3 buah di daerah *rounded leading edge* dengan masing-masing jaraknya adalah 2 mm, 85 buah sepanjang bidang tumpu aliran dan 37 buah di daerah *leading edge* dengan masing-masing jaraknya adalah 5 mm. 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 Tranducer*

   Pressure tranducer 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 tranducer*.

6. Manometer

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

7. *Thermometer*

Thermometer digunakan untuk mengukur temperature fluida kerja untuk menentukan propertinya.

3.3.2. Pengambilan Data Eksperimen

3.3.2.1. Proses Validasi Pengukuran Pressure Tranducer dan Manometer

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

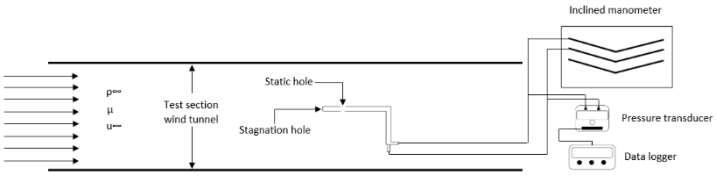
a. Mempersiapkan peralatan yang digunakan, meliputi *wind tunnel, pitot static tube, pressure tranducer*, data akuisisi, selang bercabang, manometer, dan termometer.
b. Memposisikan *pitot static tube* agar terletak tepat di titik tengah *test section wind tunnel* dengan arah tegak lurus arah aliran 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 tranducer*. Selang bercabang inilah yang menghubungkan *pitot static tube* ke manometer dan *pressure tranducer*.
d. Mengukur temperatur kerja ruangan dan mencatatnya dalam tabel perhitungan untuk menentukan *properties* udara.
e. Membaca nilai awal ketinggian *red oil* manometer dan nilai awal *pressure tranducer*.
f. 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 tranducer* yang sudah diambil nilai rata-rata dari 21 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 f sampai i sampai putaran 48 Hz.

k. Data Δh dari manometer diproses dalam perhitungan sampai menghasilkan data tekanan dan kecepatan kemudian diplot dengan data tegangan listrik dari data akuisisi kedalam bentuk grafik untuk mengetahui persamaannya.



Gambar 3. 6 Skema validasi *manometer value* dengan nilai *pressure tranducer*

3.3.2.2. Pengukuran Tekanan Statis

Prosedur yang digunakan pada eksperimen ini adalah sebagai berikut:

a. Memasang benda uji (c = 650 mm) 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 = 10 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 = 15 m/s.
j. Mengulangi Langkah a hingga i, dengan c = 1000 mm.

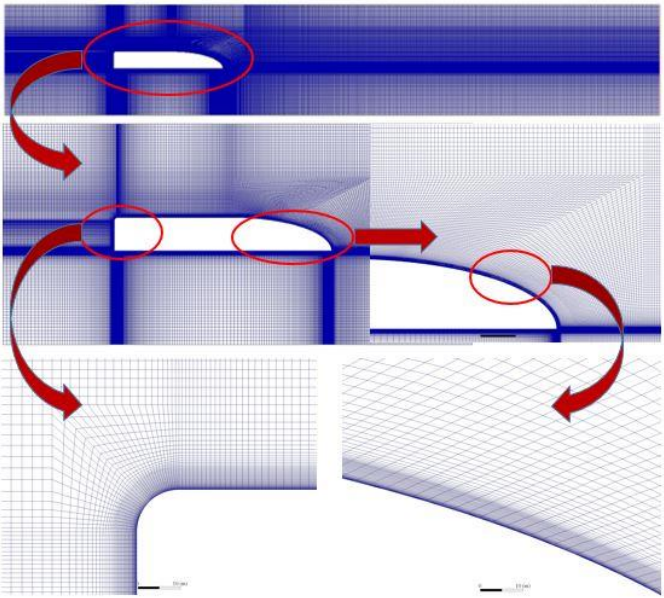
Metode Numerik

Metode numerik dilakukan dengan menggunaan *software ANSYS (Fluent) 18.1* dan dalam penelitian ini digunakan model uji berbentuk dua dimensi. Pemodelan yang digunakan adalah *viscous* turbulen k–kl Omega untuk mendapatkan hasil yang akurat dalam kontur baik tekanan maupun kecepatan, *bubble separation* dan *massive separation*.

3.4.1. *Mesh*

Membuat *mesh* adalah membagi model *solid* menjadi elemen-elemen kecil sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang dipilih dan mendekati hasil eksperimen adalah bentuk *quadrilateral* di semua bagian

permukaan dinding. Gambar *grid* dari model uji diperlihatkan pada gambar 3.7.



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

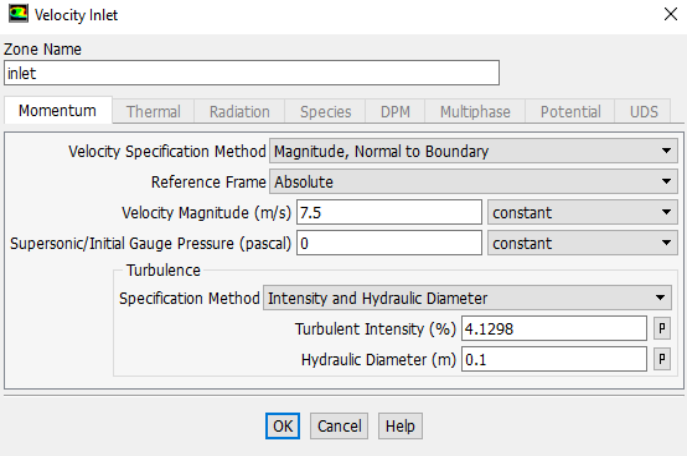
Tabel 3.2 *Mesh Quality*

mesh (c/t)	Quality aspect		
	aspect ratio	skewness	orthogonality
6,5	26,825	0,777	0,5921
10	55,011	0,6911	0,5109

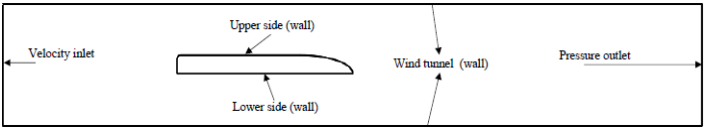
3.4.2. *Boundary Condition*

Merupakan penentuan parameter dan batasan pada aliran, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* serta

kondisi pada *wall*. Kondisi batas *inlet* diberi sesuai dengan variasi kecepatannya, yaitu 10 m/s dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* berupa *pressure outlet.* 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 parameter dan batasan pada aliran diperlihatkan pada gambar 3.7. Sementara zona *boundary condition* diperlihatkan pada gambar 3.8.



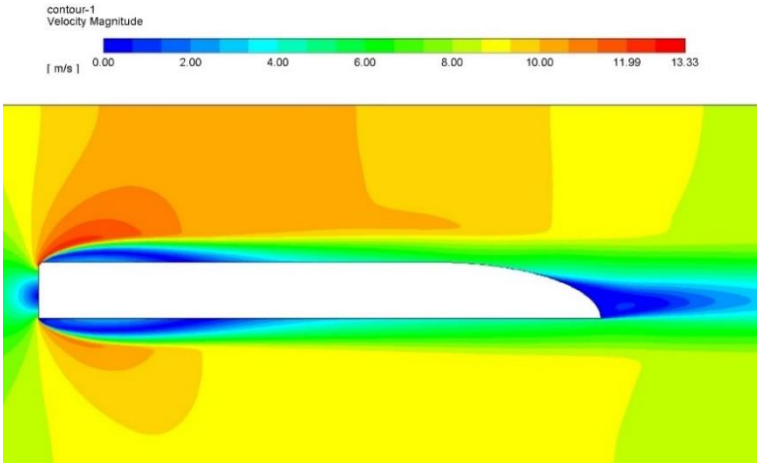
Gambar 3. 8 Penentuan parameter dan *boundary condition*



Gambar 3. 9 Zona *boundary condition*

3.4.3. *Post Processing*

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



Gambar 3. 10 Hasil *post processing*

3.4. Jadwal Pelaksanaan

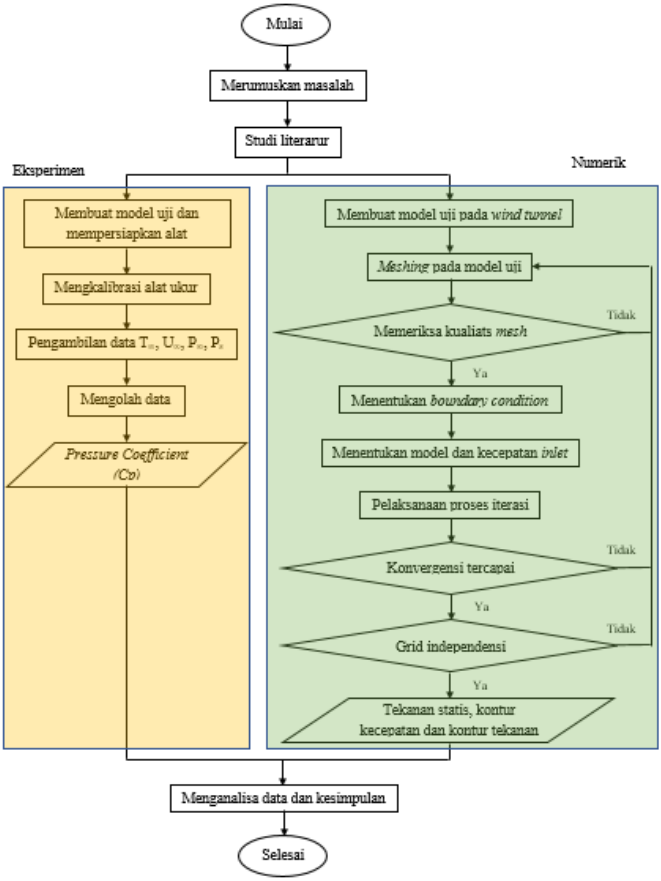
Jadwal pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.3 sebagai berikut:

No	Kegiatan	Bulan																							
		Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli			
		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	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	Pengolahan data dan analisis data																								
8	Penulisan laporan tugas akhir																								
9	Ujian tugas akhir																								

Tabel 3.3 Jadwal pelaksanaan penelitian

3.5. Diagram Alir Metode Eksperimen dan Numerik

Diagram alir dari metode eksperimen dan numerik yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.10.



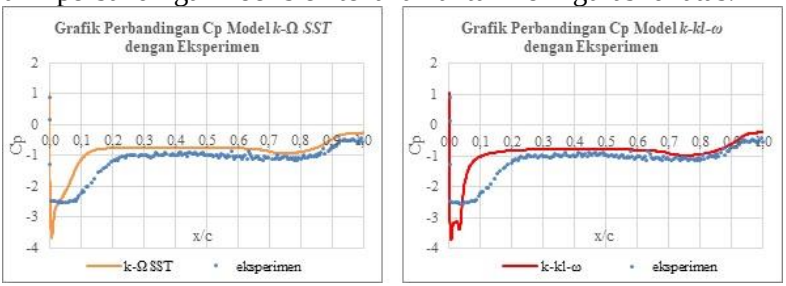
Gambar 3. 11 Diagram alir metode penelitian

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Validasi

Model numerik selanjutnya digunakan untuk melakukan validasi terhadap data hasil eksperimen yang telah dikumpulkan. Hal ini bertujuan agar model numerik yang digunakan mampu merepresentasikan fenomena yang sebenarya terjadi. Pada penelitian ini, saya melakukan validasi dengan membandingkan koefisien tekanan antara data eksperimen konfigurasi c/t = 10 dan Re_t = 5.06 x 10^4 dengan 2 simulasi numerik yang memiliki turbulent model yang berbeda, yaitu *k-omega sst* dan *k-kl omega*. Di bawah ini disajikan grafik perbandingan koefisien tekanan untuk konfigurasi di atas.



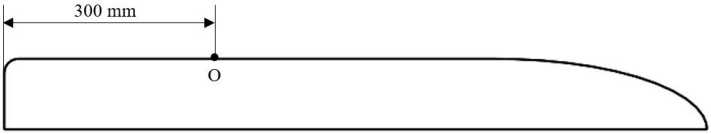
Gambar 4.1 grafik perbandingan koefisien terkanan antara hasil eksperimen dengan simulasi numerik (a) *k-omega sst* (b) *k-kl omega*

(a)

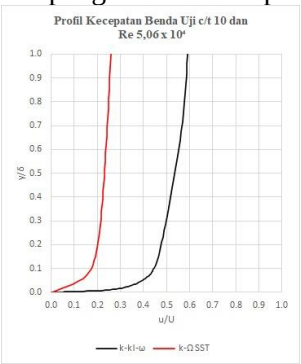
Jika diperhatikan, kedua grafik memiliki trendline yang hampir sama mulai dari x/c = 0,2 sampai x/c = 1. Namun trendline yang berbeda ditunjukkan pada x/c = 0 hingga x/c = 0,1 dimana nilai Cp pada grafik *k-kl omega* lebih besar daripada *k-omega sst*. Walaupun perbedaan nilai Cp antara hasil numerik *k-kl omega* dengan hasil eksperimen lebih besar, namun saya menganggap bahwa hasil numerik ini mampu menunjukkan fenomena aliran yang mendekati sama dengan hasil eksperimen. Fenomena tersebut adalah adanya proses separasi masif yang gagal terjadi setelah melewati *leading edge*, ditunjukkan dengan melandainya kenaikan nilai koefisien tekanan setelah melewati daerah akselerasi dan dilanjutkan dengan

terbentuknya *separation bubble* yang menandakan terjadinya proses *reattachment*. Setelah melewati titik *reattachment*, kedua grafik tersebut memiliki kecenderungan yang sama seperti saat melewati plat datar hingga mengalami separasi masif di buritan. Sehingga saya memilih simulasi numerik dengan model turbulen *k-kl omega* sebagai metode numerik yang cocok untuk eksperimen kali ini.

Selanjutnya juga dilakukan validasi dengan membandingkan profil kecepatan antara kedua model turbulen tersebut. Pengambilan data profil kecepatan dilakukan pada titik yang sama, yaitu titik O yang berjarak 300 mm dari depan seperti pada gambar 4.2 sehingga dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.3. Terlihat terdapat adanya cekungan pada profil kecepatan hasil dari metode turbulen *k–ω SST* yang menandakan adanya *back flow* pada daerah tersebut. Dimana seharusnya hanya terjadi jika ngambilan data tersebut dilakukan pada daerah *separation bubble*, sedangkan titik O berada di belakang titik *reattachment*.



Gambar 4.2 skema pengambilan data profil kecepatan



Gambar 4.3 Profil kecepatan Benda uji c/t 10 dan Re 5.06×10^4

Ketidak sesuaian data hasil eksperimen (koefisien tekanan) pada daerah *rounded* dikarenakan sulitnya pengambilan data pada daerah tersebut. Sulitnya pengambilan data diakibatkan oleh *space* pada daerah *rounded* yang cenderung sempit sehingga tidak banyak *wall pressure tap* yang mampu ditempatkan pad adaerah tersebut.

4.2. Analisa *Grid Independency*

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*) 139430 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 ≤ 2%), maka penambahan jumlah *grid points* hanya ditambah beberapa saja Anderson [11].

Selanjutnya jumlah *meshing* terpilih ditambahkan jumlah elemennya sebanyak ±10.000 *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. Selanjutnya dilakukan prosedur yang sama untuk benda uji dengan c/t = 10.

Tabel 4.1 *Grid Independency* pada benda uji *c/t=6,5*

Mesh	Cell	Cp 50%	Error	Y+
A	169856	-0.90212		1.0751
B	178488	-0.90217	0.005 %	1.0751
C	188248	-0.90291	0.074%	1.0751
D	199350	-0.90312	0.021%	1.0751
E	321764	-0.91082	0.77%	1.0748

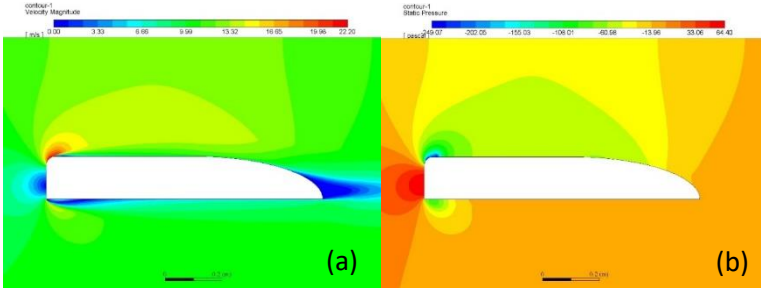
Tabel 4.2 *Grid Independency* pada benda uji *c/t=10*

Mesh	Cell	Cp 50%	Error	Y+
A	215952	-1.60144		1.0342
B	226732	-1.60239	0.095 %	1.0342

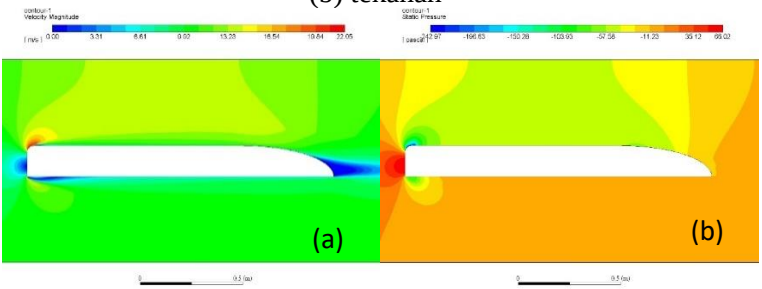
C	232988	-1.60134	0.105 %	1.0342
D	241590	-1.60144	0.01 %	1.0342
E	421424	-1.60776	0.632 %	1.0338

4.3. Gambaran Umum

Fenomena yang terjadi pada aliran yang melewati *thick-plate rounded leading edge* diawali dengan datangnya aliran *freestream* yang *laminar* menuju *thick-plate rounded leading edge*.



Gambar 4.4 kontur warna Konfigurasi uji c/t 6.5 (a) kecepatan (b) tekanan



Gambar 4.5 kontur warna Konfigurasi uji c/t 10 (a) kecepatan (b) tekanan

Streamline aliran pada *freestream* kemudian mengalami fenomena yang berbeda – beda. Aliran yang menabrak tepat di titik tengah penampang benda akan mengalami stagnasi sehingga menghasilkan tekanan yang sangat besar pada permukaan benda seperti yang ditunjukkan pada kontur tekanan pada gambar (b). Sedangkan

primary flow akan mengikuti kontur benda dan akan terus mengalir hingga melewati benda tersebut. Pada daerah *leading edge,* aliran akan memasuki daerah *convergence streamtube* yang dihasilkan oleh pertemuan antara *streamline* aliran pada permukaan benda dan *streamline primary flow* sehingga *streamtube* menjadi sempit. Menyempitnya *streamtube* mengakibatkan kecepatan aliran maksimum di daerah tersebut, seperti yang ditunjukkan pada kontur kecepatan pada gambar (a) dan kontur tekanan pada gambar (b). Aliran yang melewati *leading edge* akan memasuki daerah *divergence streamtube* yang memiliki *adverse pressure* yang besar. oleh karena momentum aliran tidak bisa melawan *adverse pressure* di daerah setelah *leading edge,* aliran kemudian mengalami separasi dan terdefleksi menjauhi *surface.* Namun karena adanya *entrainment energy* yang didapatkan dari *primary flow*, maka aliran yang terdefleksi mendapatkan momentum tambahan untuk Kembali melekat pada *surface* benda. Fenomena inilah yang disebut *reattachment.* Setelah *reattach,* aliran yang semula akan berubah menjadi turbulen. Aliran kemudian mengalami fenomena relaksasi di sepanjang bidang tumpu hingga menuju *trailing edge.* pada daerah *trailing edge,* terdapat *adverse pressure* yang timbul akibat terbentuknya *divergence streamtube* untuk kedua kalinya. Pada fenomena ini, momentum aliran sudah tidak mampu melawan *adverse pressure* di daerah itu sehingga aliran mengalami separasi dan terdefleksi menjauhi *surface.* Namun karena *primary flow* sudah tidak lagi memberikan *entrainment energy*, maka aliran yang terseparasi tidak akan Kembali menuju *surface* dan menjadi separasi masif.

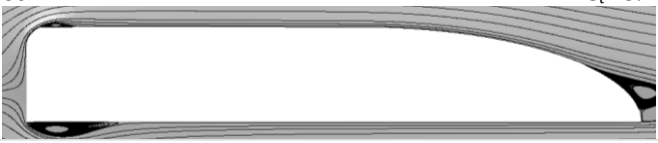
Jika dilihat pada gambar 4.4 dan 4.5, keduanya memiliki kecenderungan yang sama. Pengujian dengan nilai Re_t yang lebih besar (Re_t=10.15x10^4) akan menghasilkan ukuran *separation bubble* yang lebih kecil daripada pengujian dengan nilai Re_t lebih rendah (Re_t=6.76x10^4). hal ini juga dapat diartikan bahwa pengujian dengan nilai Re_t yang lebih besar akan membuat aliran mengalami *reattachment* lebih dulu. Kondisi ini diyakini mampu memundurkan titik separasi massif di daerah buritan. Lebih jauh, jika gambar 4.4 dan

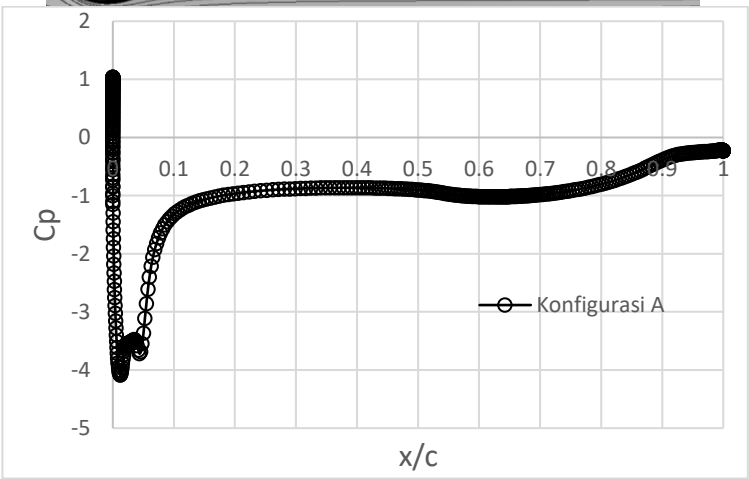
4.5 dibandingkan, maka dapat diketahui bahwa pengujian pada bidang tumpu aliran yang lebih panjang (c/t=10) memiliki dimensi *separation bubble* dan daerah *wake* yang lebih sempit.

4.4. Analisa Karakteristik Aliran

4.4.1. Konfigurasi Uji A (c/t=6.5 dan Re_t=6.76x10^4)

Pada konfigurasi uji ini, data yang di dapatkan pada eksperimen maupun simulasi adalah grafik *coefficient of pressure* (Cp). Cp merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan tekanan statis pada permukaan bena uji. Grafik Cp kemudian dianalisa untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada konfigurasi uji. Hasil Analisa yang diharapkan adalah titik *reattachment*, titik separasi massif di daerah buritan, dan kondisi aliran di atas bidang tumpu berupa profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy*. Berikut disajikan grafik Cp simulasi dan eksperimen pada konfigurasi uji c/t=6.5 dan Re_t=6.76x10^4.





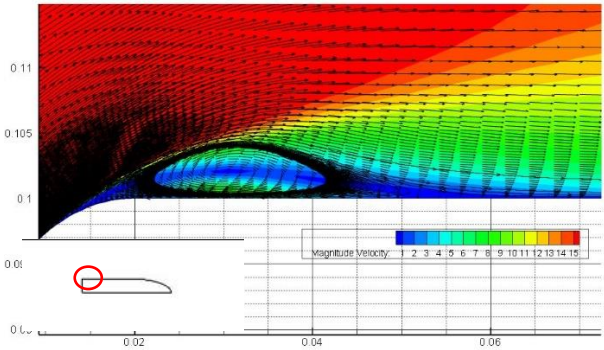
Gambar 4.6 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi uji A

Pada grafik di atas, dapat diketahui bahwa aliran mengalami penurunan nilai Cp yang sangat drastis . Hal ini terjadi karena aliran memasuki daerah *convergence streamtube* sehingga aliran dipercepat secara mendadak. Tepat setelah meningalkan *rounded leading edge, streamtube* melebar hingga membentuk *divergence region* dan memperlambat aliran secara mendadak pula dan menghasilkan perubahan nilai Cp yang drastis . Setelah naik, grafik Cp mendatar sesaat kemudian naik secara perlahan hingga akhirnya mendatar . Pada saat grafik Cp mendatar sesaat, terjadi proses transisi boundary layer aliran dari laminar menjadi turbulen. Pada saat grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan, terjadi proses *reattachment* aliran yang terseparasi dengan bantuan *entrainment energy* dari *primary flow* hingga aliran Kembali *attach* pada *surface* dan membentuk *separation bubble*. Grafik Cp setelahnya menunjukkan trendline yang datar di sepanjang bidang tumpu. Selanjutnya, grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan hingga grafik Cp mendatar. Pada saat grafik Cp mengelami kenaikan, aliran memasuki *trailing edge.* daerah ini memiliki *adverse pressure* yang sangat besar. oleh karena aliran sudah tidak mampu melawan *adverse pressure* di daerah *trailing edge,* maka aliran terdefleksi menjauhi *surface* dan menjadi separasi massif.

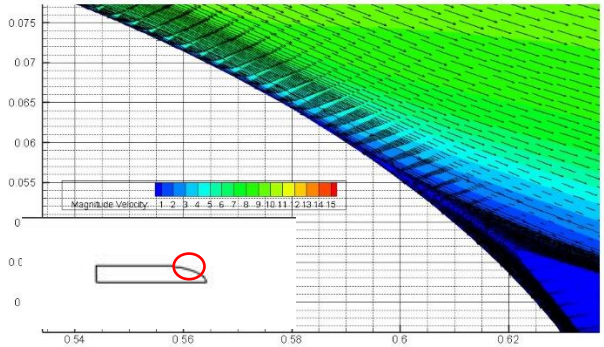
Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada x/c=0,01216 dengan Cp=-4,0859. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada x/c=0,124884 dengan Cp=-1,16107. Lebih jauh, separasi masif pada *trailing edge* terjadi pada x/c=0,926 dengan Cp=-0,2942.

Visualisasi profil kecepatan pada *separation bubble* dan pada separsi massif di *trailind edge* disajikan pada gambar 4.7 dan 4.8. visualisasi ini bertujuan untuk menunjukkan fenomen

aliran yang terjadi pada kedua daerah. Pad agambar 4.6 dapat dilihat bahwa ada beberapa panah pada profil kecepatan di daerah *bubble* yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi *circulating flow* (aliran berputar) pada daerah di dalam *bubble*. Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa terdapat beberapa panah pada profil kecepatan yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat *backflow* yang terjadi akibat ketidakmampuan aliran untuk melawan *adverse pressure* sehingga meninmbulkan separasi massif.

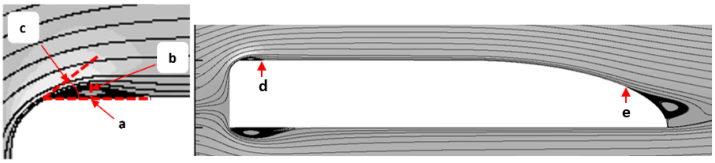


Gambar 4.7 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge*



Gambar 4.8 Profil kecepatan pada separasi massif di *trailing edge*

Dengan Grafik Cp di atas, dapat diperoleh data – data yang menunjukkan karakteristik aliran meliputi titik panjang *bubble*, tinggi maksimal *bubble*, sudut *bubble*, dan titik separasi masif. Berikut data – data karakteristik aliran untuk konfigurasi uji A:



Tabel 4.3 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji A

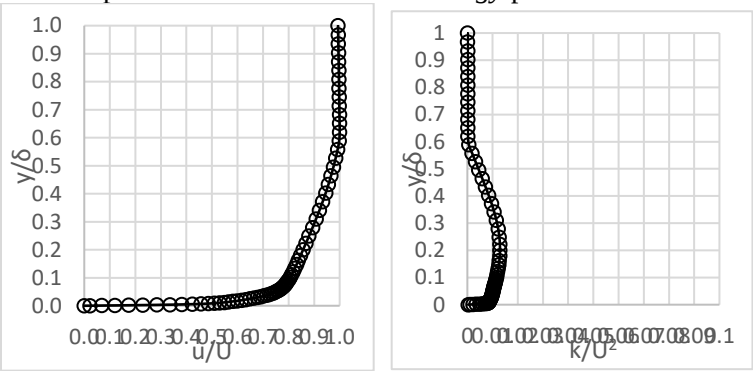
a	x/c = 0.103
b	x/c = 0.013
c	$\theta = 27^o$
d	x/c = 0.1249
e	x/c = 0.926

Keterangan :

a : Panjang relatif *bubble*
b : Tebal maksimum *bubble*
c : Sudut *bubble*
d : titik *reattachment*
e : Titik Separasi masif di *trailing edge*

Untuk mengetahui apakah *boundary layer* aliran telah berubah dari laminar menuju turbulen, maka dilakukan Pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada daerah *upperside*. Profil kecepatan diambil untuk menunjukkan variasi kecepatan Pengukuran dilakukan pada titik O dengan jarak dari titik *reattachment*. Titik ini diposisikan sedemikian rupa untuk memberikan kesempatan aliran untuk relaksasi setelah melewati *separation bubble*. Baik profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* diambil

pada daerah 99% *inviscid*. Dibawah ini disajikan profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O.



Gambar 4.9 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji A

Dengan menggunakan integrasi numerik dari persamaan *momentum thickness* dan *displacement thickness* yang dilanjutkan dengan membandingkan kedua persamaan tersebut, akan menghasilkan *shape factor* (H) yang dapat digunakan untuk menentukan apakah aliran tersebut laminer atau turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

(a)

Tabel 4.3 data *Shape factor* konfigurasi A

δ^*	Θ	H
0,04202	0,00509	1,3027

Keterangan :

δ^* : *displacement thickness*

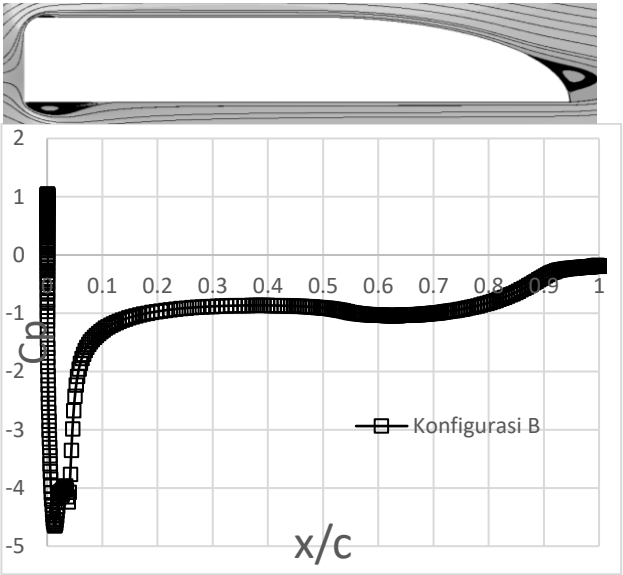
Θ : *momentum thickness*

H : *shape factor*

4.4.2. Konfigurasi Uji B (c/t=6.5 dan Re_t=10.15x10^4)

(b)

Pada konfigurasi uji ini, data yang di dapatkan pada eksperimen maupun simulasi adalah grafik *coefficient of pressure* (Cp). Cp merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan tekanan statis pada permukaan bena uji. Grafik Cp kemudian dianalisa untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada konfigurasi uji. Hasil Analisa yang diharapkan adalah titik *reattachment*, titik separasi massif di daerah buritan, dan kondisi aliran di atas bidang tumpu berupa profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy*. Berikut disajikan grafik Cp simulasi dan eksperimen pada konfigurasi uji c/t=6.5 dan Re_t=10,15x10^4.



Gambar 4.10 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi Uji B

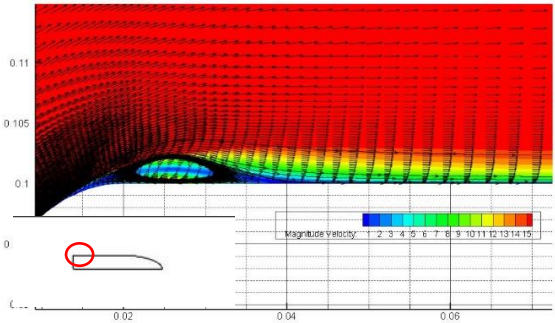
Pada grafik di atas, dapat diketahui bahwa aliran mengalami penurunan nilai Cp yang sangat drastis . Hal ini terjadi karena aliran memasuki daerah *convergence streamtube*

sehingga aliran dipercepat secara mendadak. Tepat setelah meningalkan *rounded leading edge*, *streamtube* melebar hingga membentuk *divergence region* dan memperlambat aliran secara mendadak pula dan menghasilkan perubahan nilai Cp yang drastis . Setelah naik, grafik Cp mendatar sesaat kemudian naik secara perlahan hingga akhirnya mendatar. Pada saat grafik Cp mendatar sesaat, terjadi proses transisi boundary layer aliran dari laminar menjadi turbulen. Pada saat grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan, terjadi proses *reattachment* aliran yang terseparasi dengan bantuan *entrainment energy* dari *primary flow* hingga aliran Kembali *attach* pada *surface* dan membentuk *separation bubble*. Grafik Cp setelahnya menunjukkan trendline yang datar di sepanjang bidang tumpu. Selanjutnya, grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan hingga grafik Cp mendatar. Pada saat grafik Cp mengelami kenaikan, aliran memasuki *trailing edge.* daerah ini memiliki *adverse pressure* yang sangat besar. oleh karena aliran sudah tidak mampu melawan *adverse pressure* di daerah *trailing edge*, maka aliran terdefleksi menjauhi *surface* dan menjadi separasi massif.

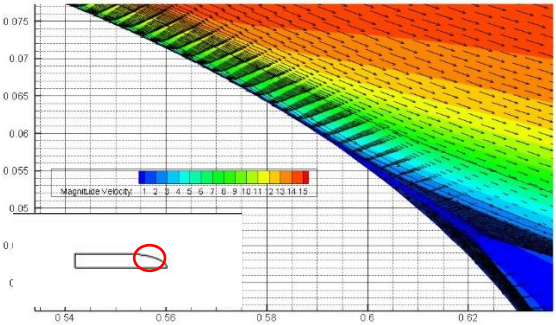
Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada x/c=0,01317 dengan Cp=-4,6482. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada pada x/c=0,11 dengan Cp=-1,2298. Lebih jauh, separasi masif pada *trailing edge* terjadi pada x/c=0,933 dengan Cp=-0,2453.

Visualisasi profil kecepatan pada *separation bubble* dan pada separsi massif di *trailind edge* disajikan pada gambar 4.6 dan 4.7. visualisasi ini bertujuan untuk menunjukkan fenomen aliran yang terjadi pada kedua daerah. Pad agambar 4.6 dapat dilihat bahwa ada beberapa panah pada profil kecepatan di daerah *bubble* yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi *circulating flow* (aliran berputar) pada daerah di dalam *bubble*. Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa terdapat beberapa panah pada profil kecepatan

yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat *backflow* yang terjadi akibat ketidakmampuan aliran untuk melawan *adverse pressure* sehingga meninmbulkan separasi massif.

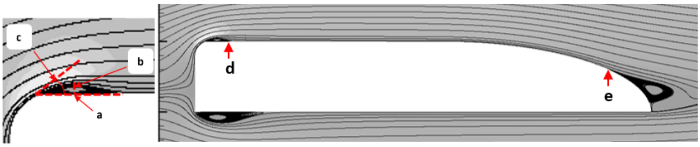


Gambar 4.11 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge*



Gambar 4.12 Profil kecepatan pada separasi massif di *trailing edge*

Dengan Grafik Cp di atas, dapat diperoleh data – data yang menunjukkan karakteristik aliran meliputi titik panjang *bubble*, tinggi maksimal *bubble*, sudut *bubble*, dan titik separasi massif masif. Berikut data – data karakteristik aliran untuk konfigurasi uji B:



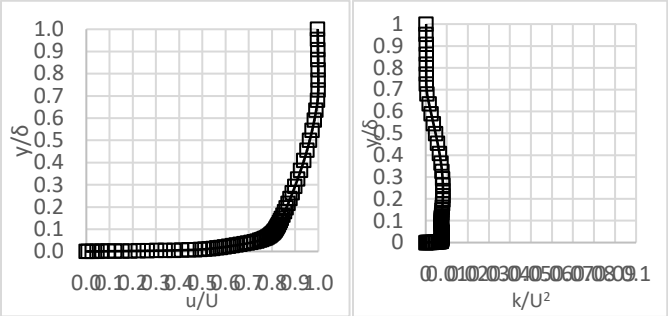
Tabel 4.4 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji B

a	x/c = 0.0879
b	x/c = 0.0095
c	θ = 20°
d	x/c = 0.11
e	x/c = 0.933

Keterangan :

a : Panjang relatif *bubble*
b : Tebal maksimum *bubble*
c : Sudut *bubble*
d : titik *reattachment*
e : Titik Separasi masif di *trailing edge*

Untuk mengetahui apakah *boundary layer* aliran telah berubah dari laminar menuju turbulen, maka dilakukan Pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada daerah *upperside*. Profil kecepatan diambil untuk menunjukkan variasi kecepatan Pengukuran dilakukan pada titik O dengan jarak dari titik *reattachment*. Titik ini diposisikan sedemikian rupa untuk memberikan kesempatan aliran untuk relaksasi setelah melewati *separation bubble*. Baik profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* diambil pada daerah 99% *inviscid*. Dibawah ini disajikan profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O:



Gambar 4.13 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji B

Dengan menggunakan integrasi numerik dari persamaan *momentum thickness* dan *displacement thickness* yang dilanjutkan dengan membandingkan kedua persamaan tersebut, akan menghasilkan *shape factor* (H) yang dapat digunakan untuk menentukan apakah aliran tersebut laminer atau turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 4.5 data *Shape factor* Konfigurasi B

δ^*	Θ	H
0,03653	0,002835	1,2285

Keterangan :

δ^* : *displacement thickness*

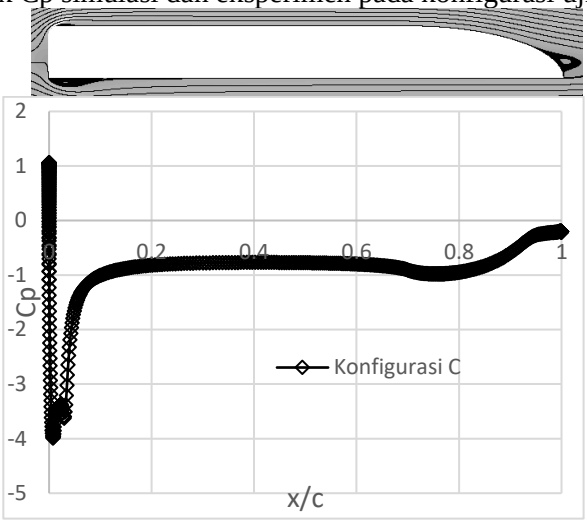
Θ : *momentum thickness*

H : *shape factor*

4.4.3. Konfigurasi Uji C (c/t=10 dan Re_t=6.76x10^4)

Pada konfigurasi uji ini, data yang di dapatkan pada eksperimen maupun simulasi adalah grafik *coefficient of pressure* (Cp). Cp merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan tekanan statis pada permukaan bena uji. Grafik Cp kemudian dianalisa untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada konfigurasi uji. Hasil Analisa yang diharapkan

adalah titik *reattachment*, titik separasi massif di daerah buritan, dan kondisi aliran di atas bidang tumpu berupa profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy*. Berikut disajikan grafik Cp simulasi dan eksperimen pada konfigurasi uji C.



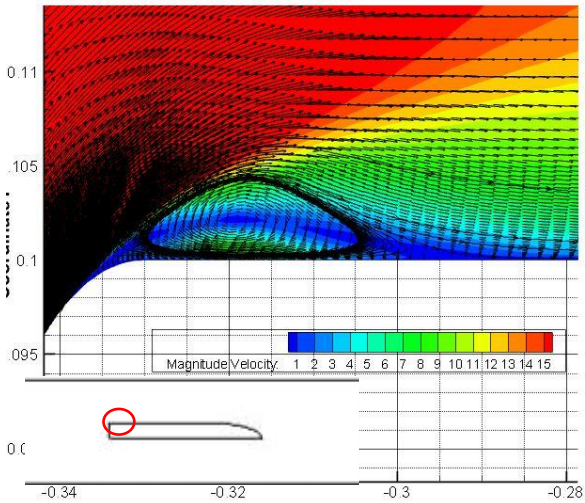
Gambar 4.14 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi Uji C

Pada grafik di atas, dapat diketahui bahwa aliran mengalami penurunan nilai Cp yang sangat drastis . Hal ini terjadi karena aliran memasuki daerah *convergence streamtube* sehingga aliran dipercepat secara mendadak. Tepat setelah meningalkan *rounded leading edge*, *streamtube* melebar hingga membentuk *divergence region* dan memperlambat aliran secara mendadak pula dan menghasilkan perubahan nilai Cp yang drastis . Setelah naik, grafik Cp mendatar sesaat kemudian naik secara perlahan hingga akhirnya mendatar. Pada saat grafik Cp mendatar sesaat, terjadi proses transisi boundary layer aliran dari laminar menjadi turbulen. Pada saat grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan, terjadi proses *reattachment* aliran yang terseparasi dengan bantuan

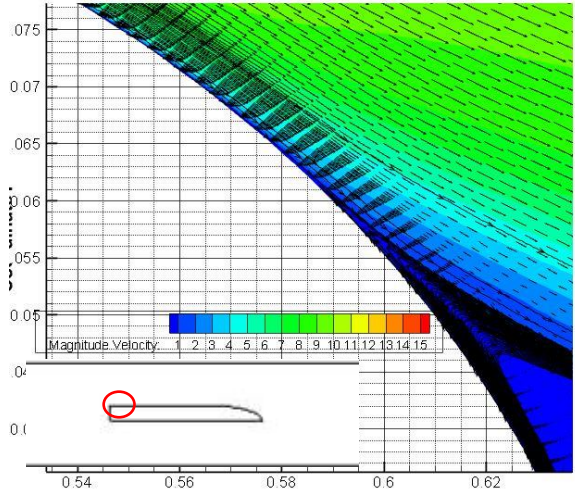
entrainment energy dari *primary flow* hingga aliran Kembali *attach* pada *surface* dan membentuk *separation bubble*. Grafik Cp setelahnya menunjukkan trendline yang datar di sepanjang bidang tumpu. Selanjutnya, grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan hingga grafik Cp mendatar. Pada saat grafik Cp mengelami kenaikan, aliran memasuki *trailing edge.* daerah ini memiliki *adverse pressure* yang sangat besar. oleh karena aliran sudah tidak mampu melawan *adverse pressure* di daerah *trailing edge*, maka aliran terdefleksi menjauhi *surface* dan menjadi separasi massif.

Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada x/c=0.0084 dengan Cp=-3.9804. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada pada x/c=0.0792 dengan Cp=-1.1265. Lebih jauh, separasi masif pada *trailing edge* terjadi pada x/c=0.9541 dengan Cp=-0.2561.

Visualisasi profil kecepatan pada *separation bubble* dan pada separsi massif di *trailind edge* disajikan pada gambar 4.6 dan 4.7. visualisasi ini bertujuan untuk menunjukkan fenomen aliran yang terjadi pada kedua daerah. Pad agambar 4.6 dapat dilihat bahwa ada beberapa panah pada profil kecepatan di daerah *bubble* yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi *circulating flow* (aliran berputar) pada daerah di dalam *bubble*. Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa terdapat beberapa panah pada profil kecepatan yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat *backflow* yang terjadi akibat ketidakmampuan aliran untuk melawan *adverse pressure* sehingga meninmbulkan separasi massif.

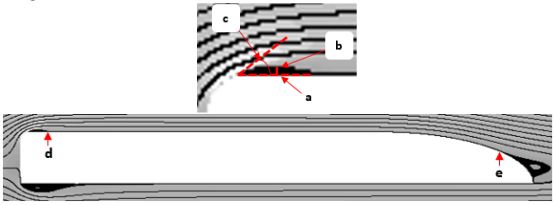


Gambar 4.15 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge*



Gambar 4.16 Profil kecepatan pada separasi massif di *trailing edge*

Dengan Grafik Cp di atas, dapat diperoleh data – data yang menunjukkan karakteristik aliran meliputi titik panjang *bubble*, tinggi maksimal *bubble*, sudut *bubble*, dan titik separasi masif. Berikut data – data karakteristik aliran untuk konfigurasi uji C:



Tabel 4.6 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji C

a	x/c = 0.0671
b	x/c = 0.0067
c	$\theta = 25^o$
d	x/c = 0.0792
e	x/c = 0.9541

Keterangan :

a : Panjang relatif *bubble*

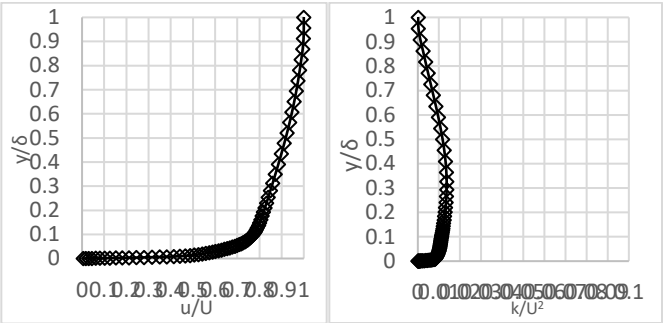
b : Tebal maksimum *bubble*

c : Sudut *bubble*

d : titik *reattachment*

e : Titik Separasi masif di *trailing edge*

Untuk mengetahui apakah *boundary layer* aliran telah berubah dari laminar menuju turbulen, maka dilakukan Pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada daerah *upperside*. Profil kecepatan diambil untuk menunjukkan variasi kecepatan Pengukuran dilakukan pada titik O dengan jarak dari titik *reattachment*. Titik ini diposisikan sedemikian rupa untuk memberikan kesempatan aliran untuk relaksasi setelah melewati *separation bubble*. Baik profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* diambil pada daerah 99% *inviscid*. Dibawah ini disajikan profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O:



Gambar 4.17 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji C

Dengan menggunakan integrasi numerik dari persamaan *momentum thickness* dan *displacement thickness* yang dilanjutkan dengan membandingkan kedua persamaan tersebut, akan menghasilkan *shape factor* (H) yang dapat digunakan untuk menentukan apakah aliran tersebut laminer atau turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 4.7 data *Shape factor* Konfigurasi C

δ^*	Θ	H
4.55×10^{-7}	3.48×10^{-7}	1.3077

Keterangan :

δ^* : *displacement thickness*

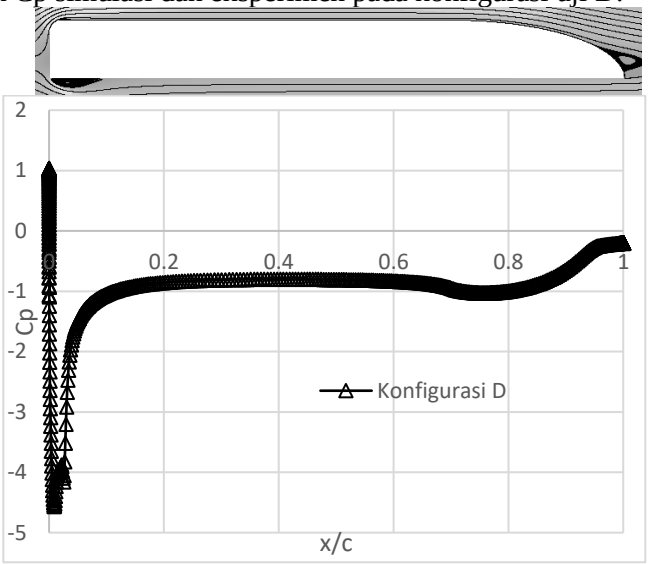
Θ : *momentum thickness*

H : *shape factor*

4.4.4. Konfigurasi Uji D (c/t=10 dan Re_t=10.15x10^4)

Pada konfigurasi uji ini, data yang di dapatkan pada eksperimen maupun simulasi adalah grafik *coefficient of pressure* (Cp). Cp merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan tekanan statis pada permukaan bena uji. Grafik Cp kemudian dianalisa untuk mengetahui fenomena yang

terjadi pada konfigurasi uji. Hasil Analisa yang diharapkan adalah titik *reattachment*, titik separasi massif di daerah buritan, dan kondisi aliran di atas bidang tumpu berupa profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy*. Berikut disajikan grafik Cp simulasi dan eksperimen pada konfigurasi uji D.



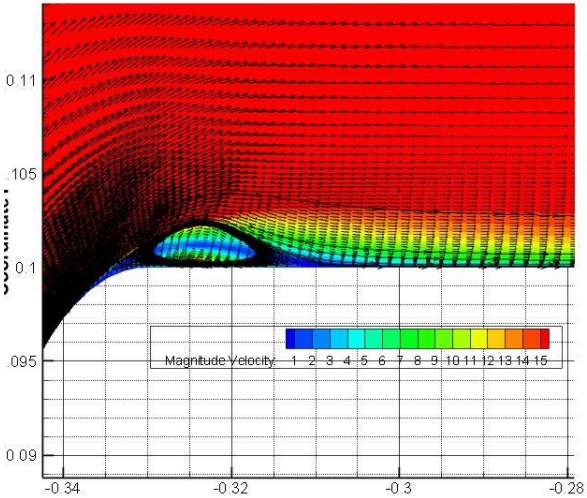
Gambar 4.18 Grafik Cp dan Visualisasi aliran Konfigurasi Uji D

Pada grafik di atas, dapat diketahui bahwa aliran mengalami penurunan nilai Cp yang sangat drastis . Hal ini terjadi karena aliran memasuki daerah *convergence streamtube* sehingga aliran dipercepat secara mendadak. Tepat setelah meningalkan *rounded leading edge*, *streamtube* melebar hingga membentuk *divergence region* dan memperlambat aliran secara mendadak pula dan menghasilkan perubahan nilai Cp yang drastis . Setelah naik, grafik Cp mendatar sesaat kemudian naik secara perlahan hingga akhirnya mendatar. Pada saat grafik Cp mendatar sesaat, terjadi proses transisi boundary layer aliran dari laminar menjadi turbulen. Pada saat

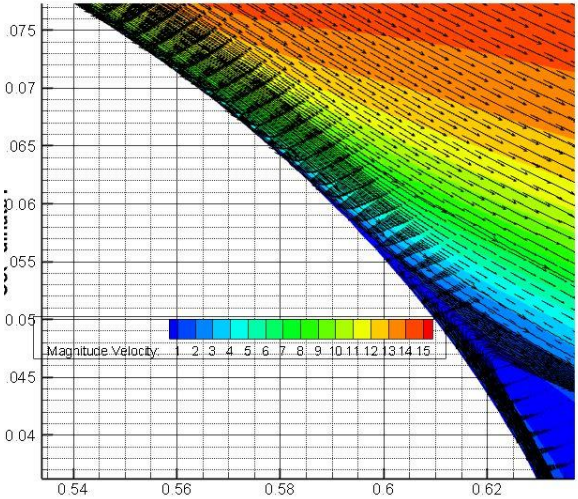
grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan, terjadi proses *reattachment* aliran yang terseparasi dengan bantuan *entrainment energy* dari *primary flow* hingga aliran Kembali *attach* pada *surface* dan membentuk *separation bubble*. Grafik Cp setelahnya menunjukkan trendline yang datar di sepanjang bidang tumpu. Selanjutnya, grafik Cp mengalami kenaikan secara perlahan hingga grafik Cp mendatar. Pada saat grafik Cp mengelami kenaikan, aliran memasuki *trailing edge.* daerah ini memiliki *adverse pressure* yang sangat besar. oleh karena aliran sudah tidak mampu melawan *adverse pressure* di daerah *trailing edge*, maka aliran terdefleksi menjauhi *surface* dan menjadi separasi massif.

Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada x/c=0.0089 dengan Cp=-4.565. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada pada x/c=0.0694 dengan Cp=-1.232. Lebih jauh, separasi masif pada *trailing edge* terjadi pada x/c=0.957 dengan Cp=-0.2461.

Visualisasi profil kecepatan pada *separation bubble* dan pada separsi massif di *trailind edge* disajikan pada gambar 4.6 dan 4.7. visualisasi ini bertujuan untuk menunjukkan fenomen aliran yang terjadi pada kedua daerah. Pad agambar 4.6 dapat dilihat bahwa ada beberapa panah pada profil kecepatan di daerah *bubble* yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi *circulating flow* (aliran berputar) pada daerah di dalam *bubble*. Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa terdapat beberapa panah pada profil kecepatan yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat *backflow* yang terjadi akibat ketidakmampuan aliran untuk melawan *adverse pressure* sehingga meninmbulkan separasi massif.

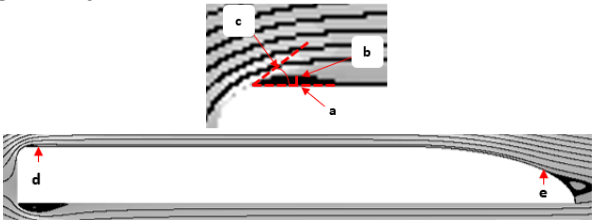


Gambar 4.19 Profil kecepatan pada *separation bubble* di *leading edge*



Gambar 4.20 Profil kecepatan pada separasi massif di *trailing edge*

Dengan Grafik Cp di atas, dapat diperoleh data – data yang menunjukkan karakteristik aliran meliputi titik panjang *bubble*, tinggi maksimal *bubble*, sudut *bubble*, dan titik separasi masif Berikut data – data karakteristik aliran untuk konfigurasi uji c/t=6,5 dan Re_t=10,15x10^4:



Tabel 4.6 Karakteristik aliran Konfigurasi Uji D

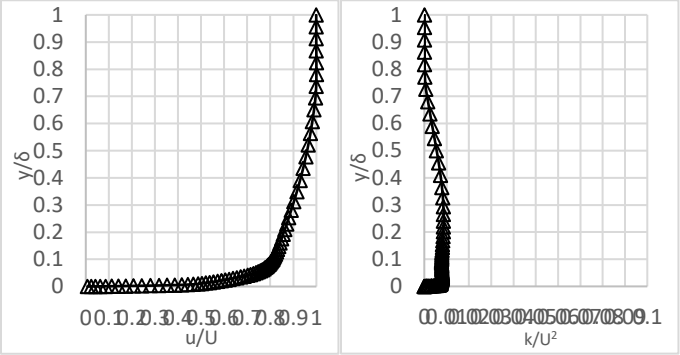
a	x/c = 0.0554
b	x/c = 0.00512
c	θ = 19º
d	x/c = 0.0694
e	x/c = 0.957

Keterangan :

a : Panjang relatif *bubble*
b : Tebal maksimum *bubble*
c : Sudut *bubble*
d : titik *reattachment*
e : Titik Separasi masif di *trailing edge*

Untuk mengetahui apakah *boundary layer* aliran telah berubah dari laminar menuju turbulen, maka dilakukan Pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada daerah *upperside*. Profil kecepatan diambil untuk menunjukkan variasi kecepatan Pengukuran dilakukan pada titik O dengan jarak dari titik *reattachment*. Titik ini diposisikan sedemikian rupa untuk memberikan kesempatan aliran untuk relaksasi setelah melewati *separation bubble*. Baik profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* diambil

pada daerah 99% *inviscid*. Dibawah ini disajikan profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O:



Gambar 4.21 (a) profil kecepatan (b) *turbulent kinetic energy* Konfigurasi uji D

Dengan menggunakan integrasi numerik dari persamaan *momentum thickness* dan *displacement thickness* yang dilanjutkan dengan membandingkan kedua persamaan tersebut, akan menghasilkan *shape factor* (H) yang dapat digunakan untuk menentukan apakah aliran tersebut laminer atau turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 4.8 data *Shape factor* Konfigurasi D

δ *	Θ	H
4.2×10^{-7}	3.24×10^{-7}	1.2981

Keterangan :

δ* : *displacement thickness*

Θ : *momentum thickness*

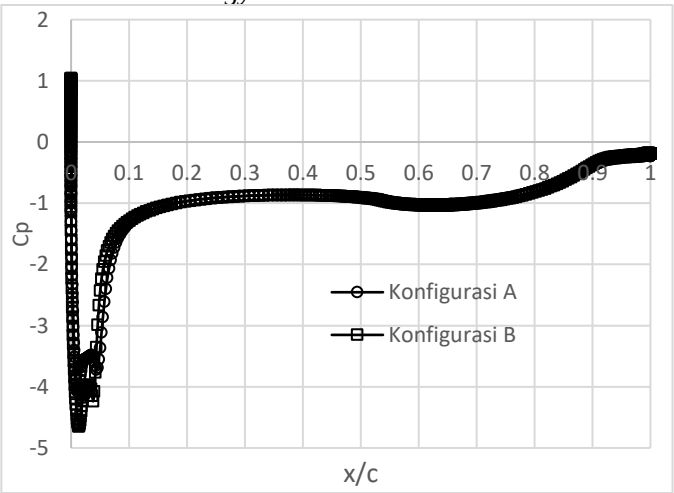
H : *shape factor*

4.5. Analisa antar Konfigurasi Uji

4.5.1. Perbandingan antara Konfigurasi Uji A dan B

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan hasil data simulasi numerik konfigurasi uji c/t=6.5 dengan dua nilai Re_t

yang berbeda (Konfigurasi A pada Re_t=6.76x10^4 dan Konfigurasi B pada Re_t=10.15x10^4). tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan nilai Re_t dengan fenomena *separation bubble* yang terjadi. Analisa yang dilakukan adalah perbandingan antara kedua Grafik Cp, perbandingan antara kedua profil kecepatan dan perbandingan antara kedua *turbulent kinetic energy*.



Gambar 4.22 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji A dan B

Garis biru menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi A dan garis oranye menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi B. jika dilihat pada gambar 4.13, tidak terlihat perbedaan yang signifikan baik konfigurasi A maupun B pada daerah antara x/c=0.2 dan x/c=0.9. perbedaan trendline terlihat jelas di daerah depan (antara x/c=0 dan x/c=0.1) serta daerah belakang (antara x/c=0.9 dan x/c=1), dimana daerah tersebut masing – masing merupakan daerah terbentuknya *separation bubble* dan daerah terjadinya separasi masif. Pada daerah depan, dapat dilihat bahwa posisi garis oranye lebih maju daripada garis biru. Apabila titik *reattachment* kedua konfigurasi

dibandingkan, maka dapat diketahui bahwa titik reattachment aliran pada konfigurasi A (x/c = 0.1249) berada di belakang konfigurasi B (x/c = 0.11). hal ini selaras dengan Hipotesa awal bahwa pada bentuk *rounded* yang sama, kenaikan nilai Re_t mampu mempercepat aliran untuk *reattach* menuju *surface* benda setelah terseparasi di depan. Dengan memperhatikan tabel perbandingan dimensi *bubble* di bawah, maka dapat diketahui bahwa kenaikan nilai Re_t aliran dapat mempengaruhi dimensi *bubble* menjadi lebih pendek dan pipih.

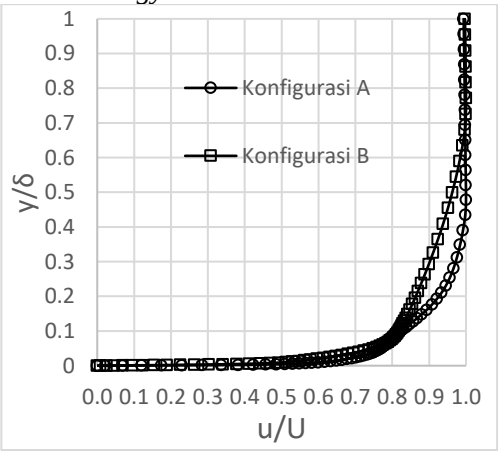
Tabel 4.9 Perbandingan dimensi *bubble* A dan B

Parameter Dimensi	Konfigurasi A	Konfigurasi B
Panjang *bubble*	x/c=0.103	x/c=0.0879
Tinggi *bubble*	x/c=0.013	x/c=0.0095
Sudut *bubbe*	27°	20°

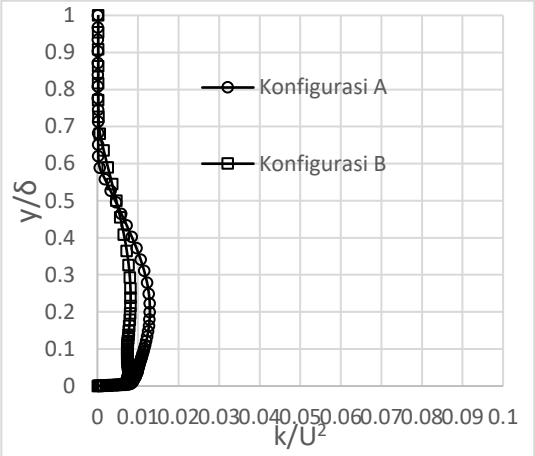
Plot profil kecepatan di titik O untuk Konfigurasi A dan B disajikan pada gambar 4.15 . garis biru menunjukkan profil kecepatan untuk konfigurasi A sedangkan garis oranye menunjukan profil kecepatan untuk konfigurasi B. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa profil kecepatan pada daerah dekat *surface* benda relatif lebih kecil daripada profil kecepatan *primary flow*. Hal ini terjadi karena aliran melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga momentum aliran berangsur – angsur turun. Apabila kedua profil kecepatan dibandingkan, maka dapat dilihat bahwa profil kecepatan untuk Konfigurasi A memiliki nilai u/U yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan profil kecepatan untuk Konfigurasi B. hal ini menunjukkan bahwa kenaikan nilai Re_t mempengaruhi kenaikan u/U Profil kecepatan aliran.

Plot *Turbulent kinetic energy* di titik O untuk Konfigurasi A dan B disajikan pada gambar 4.15 . garis biru menunjukkan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi A sedangkan garis oranye menunjukan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi B. Pada gambar tersebut, dapat dilihat

bahwa *Turbulent kinetic energy* pada konfigurasi B lebih besar daripada konfigurasi A. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menaikkan nilai Re_t akan meningkatkan *turbulent kinetic energy* sebab kenaikan nilai Re_t akan mempercepat terjadinya *reattachment* pada aliran yang gagal terseparasi di depan ang menyebabkan aliran bertransisi menjadi turbulen. Kondisi ini akan meningkatkan intensitas fluktuasi di daerah setelah *reattachment* sehingga meningkatkan energi yang dibutuhkan aliran untuk melawan *aderse pressure.* Walaupun demikian, dapat dilihat bahwa pada gambar 4.15, *turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi B memiliki kurva seacam takikan kecil di dekat dinding. Hal ini diduga timbul akibat adanya *reverse flow* yang terjadi di dekat dinding sehingga mempengaruhi *turbulent kinetic energy* di titik O.



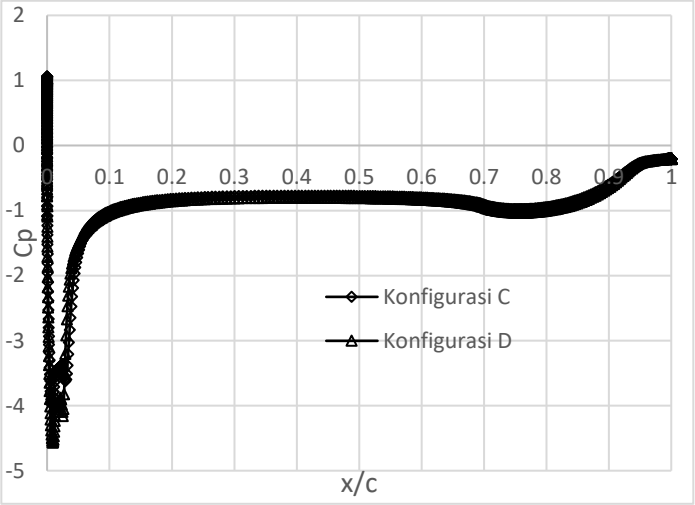
Gambar 4.23 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi A dan B



Gambar 4.24 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi A dan B

4.5.2. Perbandingan antara Konfigurasi Uji C dan D

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan hasil data simulasi numerik konfigurasi uji c/t=10 dengan dua nilai Re_t yang berbeda (Konfigurasi C pada Re_t=6.76x10^4 dan Konfigurasi D pada Re_t=10.15x10^4). tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan nilai Re_t dengan fenomena *separation bubble* yang terjadi. Analisa yang dilakukan adalah perbandingan antara kedua Grafik Cp, perbandingan antara kedua profil kecepatan dan perbandingan antara kedua *turbulent kinetic energy*.



Gambar 4.25 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji C dan D

Garis abu - abu menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi C dan garis kuning menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi D. jika dilihat pada gambar 4.16, tidak terlihat perbedaan yang signifikan baik konfigurasi C maupun D pada daerah antara x/c=0.2 dan x/c=0.9. perbedaan trendline terlihat jelas di daerah depan (antara x/c=0 dan x/c=0.1) serta daerah belakang (antara x/c=0.9 dan x/c=1), dimana daerah tersebut masing – masing merupakan daerah terbentuknya *separation bubble* dan daerah terjadinya separasi masif. Pada daerah depan, dapat dilihat bahwa posisi garis oranye lebih maju daripada garis biru. Apabila titik *reattachment* kedua konfigurasi dibandingkan, maka dapat diketahui bahwa titik reattachment aliran pada konfigurasi C (x/c = 0.1249) berada di belakang konfigurasi D (x/c = 0.11). hal ini selaras dengan Hipotesa awal bahwa pada bentuk *rounded* yang sama, kenaikan nilai Re_t mampu mempercepat aliran untuk *reattach* menuju *surface* benda setelah terseparasi di depan. Dengan

memperhatikan tabel perbandingan dimensi *bubble* di bawah, maka dapat diketahui bahwa kenaikan nilai Re_t aliran dapat mempengaruhi dimensi *bubble* menjadi lebih pendek dan pipih.

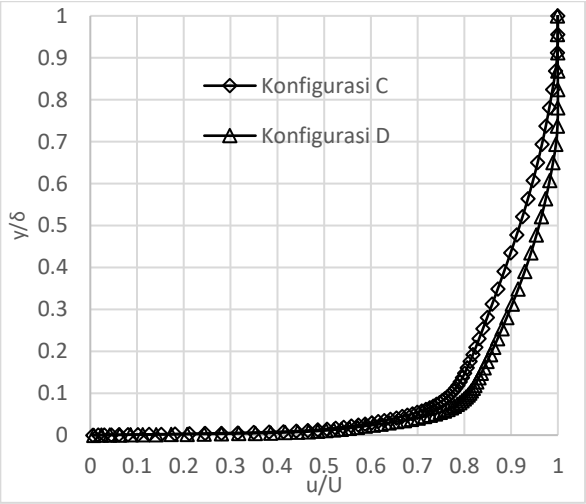
Tabel 4.10 Perbandingan dimensi *bubble* konfigurasi C dan D

Parameter Dimensi	Konfigurasi C	Konfigurasi D
Panjang *bubble*	x/c=0.0671	x/c=0.0554
Tinggi *bubble*	x/c=0.0067	x/c=0.00512
Sudut *bubbe*	25°	19°

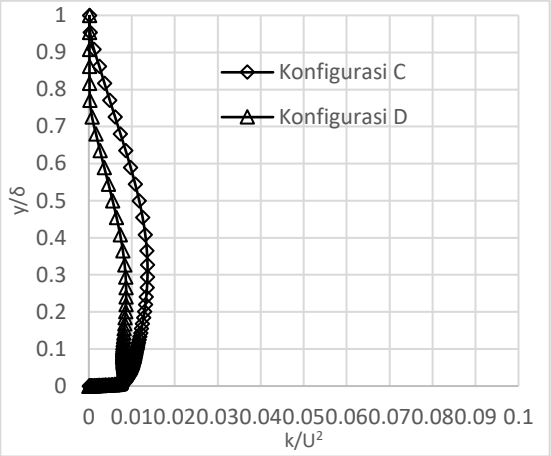
Plot profil kecepatan di titik O untuk Konfigurasi C dan D disajikan pada gambar 4.18 . garis abu - abu menunjukkan profil kecepatan untuk konfigurasi C sedangkan garis kuning menunjukan profil kecepatan untuk konfigurasi D. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa profil kecepatan pada daerah dekat *surface* benda relatif lebih kecil daripada profil kecepatan *primary flow*. Hal ini terjadi karena aliran melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga momentum aliran berangsur – angsur turun. Apabila kedua profil kecepatan dibandingkan, maka dapat dilihat bahwa profil kecepatan untuk Konfigurasi C memiliki nilai u/U yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan profil kecepatan untuk Konfigurasi D. hal ini menunjukkan bahwa kenaikan nilai Re_t mempengaruhi kenaikan u/U Profil kecepatan aliran.

Plot *Turbulent kinetic energy* di titik O untuk Konfigurasi C dan D disajikan pada gambar 4.19 . garis abu - abu menunjukkan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi C sedangkan garis oranye menunjukan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi D. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa *Turbulent kinetic energy* pada konfigurasi D lebih besar daripada konfigurasi C. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menaikkan nilai Re_t akan meningkatkan *turbulent kinetic energy* sebab kenaikan nilai Re_t akan mempercepat terjadinya *reattachment* pada aliran yang gagal

terseparasi di depan ang menyebabkan aliran bertransisi menjadi turbulen. Kondisi ini akan meningkatkan intensitas fluktuasi di daerah setelah *reattachment* sehingga meningkatkan energi yang dibutuhkan aliran untuk melawan *aderse pressure*. Walaupun demikian, dapat dilihat bahwa pada gambar 4.15, *turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi B memiliki kurva seacam takikan kecil di dekat dinding. Hal ini diduga timbul akibat adanya *reverse flow* yang terjadi di dekat dinding sehingga mempengaruhi *turbulent kinetic energy* di titik O.



Gambar 4.26 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi C dan D

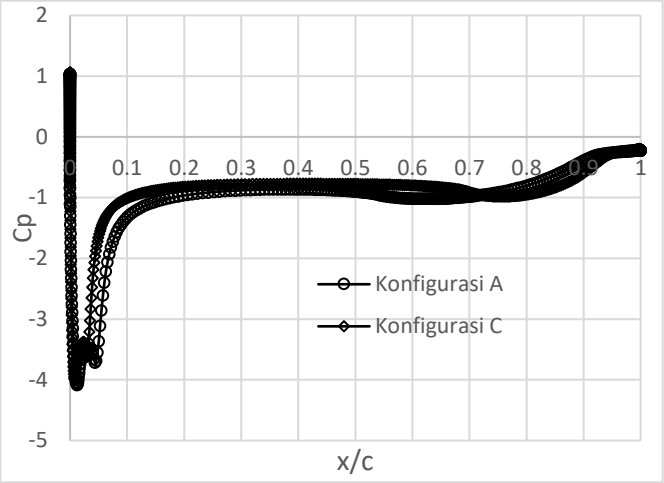


Gambar 4.27 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi C dan D

4.5.3. Perbandingan antara Konfigurasi Uji A dan C

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan hasil data simulasi numerik konfigurasi uji A (c/t 6.5 Re_t $6.76x10^4$) dan konfigurasi C (c/t 10 Re_t $6.76x10^4$). tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan panjang bidang tumpu aliran dengan fenomena *separation bubble* yang terjadi. Analisa yang dilakukan adalah perbandingan antara kedua Grafik Cp, perbandingan antara kedua profil kecepatan dan perbandingan antara kedua *turbulent kinetic energy*.

Garis Biru menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi A dan garis Abu-abu menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi C. jika dilihat pada gambar 4.20, terlihat perbedaan yang cukup jelas antara kedua grafik. Namun gambar 4.20 kurang bisa menggambarkan perbedaan antara kedua konfigurasi karena konfigurasi A dan C memiliki nilai c/t yang berbeda. Hal ini membuat grafik diatas tidak bisa dibandingkan secara langsung. Sehingga



Gambar 4.28 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji A dan C

analisa yang akan dilakukan hanya berfokus pada daerah depan (antara x/c=0 dan x/c=0.1) serta daerah belakang (antara x/c=0.9 dan x/c=1), dimana daerah tersebut masing – masing merupakan daerah terbentuknya *separation bubble* dan daerah terjadinya separasi masif. Apabila titik *reattachment* kedua konfigurasi dibandingkan, maka dapat diketahui bahwa titik reattachment aliran pada konfigurasi A (x/c = 0.1249) berada di belakang konfigurasi C (x/c = 0.0792). hal ini selaras dengan Hipotesa awal bahwa pada nilai Re_t yang sama, penambahan panjang bidang tumpu di belakang *rounded* mampu membantu aliran untuk *reattach* menuju *surface* benda setelah terseparasi di depan. Dengan memperhatikan tabel perbandingan dimensi *bubble* di bawah, maka dapat diketahui bahwa penambahan panjang bidang tumpu dapat mempengaruhi dimensi *bubble* menjadi lebih pendek dan pipih.

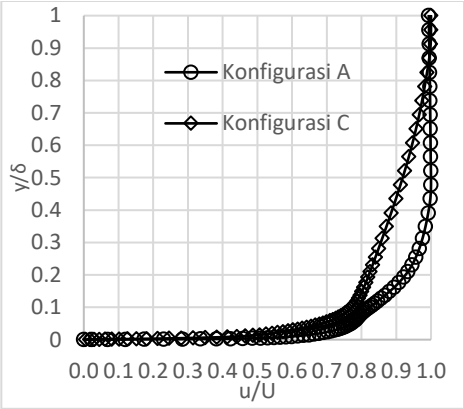
Tabel 4.11 Perbandingan dimensi *bubble* konfigurasi A dan C

Parameter Dimensi	Konfigurasi A	Konfigurasi C
Panjang *bubble*	x/c=0.103	x/c=0.0671
Tinggi *bubble*	x/c=0.013	x/c=0.0067
Sudut *bubble*	27°	25°

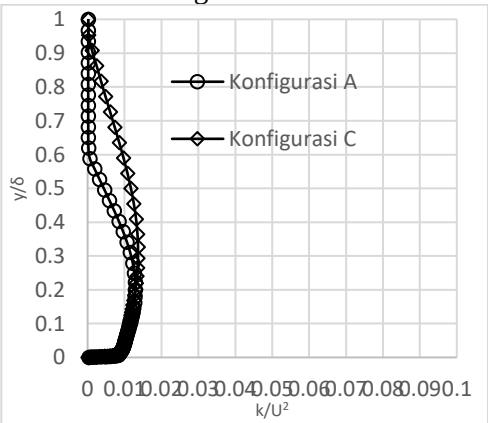
Plot profil kecepatan di titik O untuk Konfigurasi A dan C disajikan pada gambar 4.22 . garis biru menunjukkan profil kecepatan untuk konfigurasi A sedangkan garis abu-abu menunjukan profil kecepatan untuk konfigurasi C. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa profil kecepatan pada daerah dekat *surface* benda relatif lebih kecil daripada profil kecepatan *primary flow*. Hal ini terjadi karena aliran melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga momentum aliran berangsur – angsur turun. Apabila kedua profil kecepatan dibandingkan, maka dapat dilihat bahwa profil kecepatan untuk Konfigurasi A memiliki nilai u/U yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan profil kecepatan untuk Konfigurasi C. hal ini menunjukkan bahwa penambahan panjang bidang tumpu aliran mempengaruhi kenaikan u/U Profil kecepatan aliran.

Plot *Turbulent kinetic energy* di titik O untuk Konfigurasi A dan C disajikan pada gambar 4.23 . garis biru menunjukkan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi A sedangkan garis abu-abu menunjukan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi C. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa *Turbulent kinetic energy* pada konfigurasi C lebih besar daripada konfigurasi A. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan panjang bidang tumpu aliran akan meningkatkan *turbulent kinetic energy* sebab penambahan panjang bidang tumpu aliran akan mempercepat terjadinya *reattachment* pada aliran yang gagal terseparasi di depan ang menyebabkan aliran bertransisi menjadi turbulen. Kondisi ini akan meningkatkan

intensitas fluktuasi di daerah setelah *reattachment* sehingga meningkatkan energi yang dibutuhkan aliran untuk melawan *adverse pressure.*



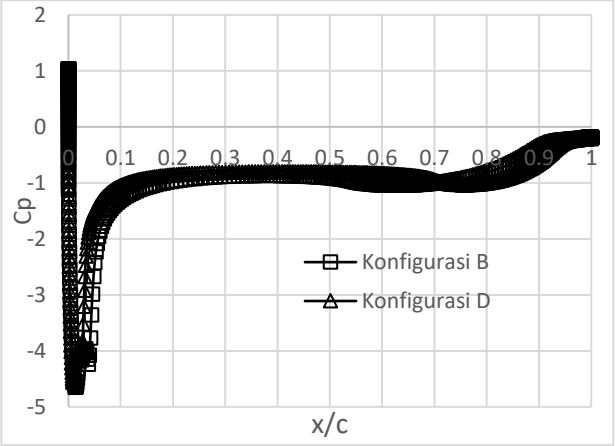
Gambar 4.29 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi A dan C



Gambar 4.30 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi A dan C

4.5.4. Perbandingan antara Konfigurasi Uji B dan D

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan hasil data simulasi numerik konfigurasi uji B (c/t 6.5 Re_t $10.15x10^4$) dan konfigurasi D (c/t 10 Re_t $10.15x10^4$). tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan panjang bidang tumpu aliran dengan fenomena *separation bubble* yang terjadi. Analisa yang dilakukan adalah perbandingan antara kedua Grafik Cp, perbandingan antara kedua profil kecepatan dan perbandingan antara kedua *turbulent kinetic energy*.



Gambar 4.31 Grafik Cp perbandingan konfigurasi uji B dan D

Garis oranye menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi B dan garis Kuning menunjukkan grafik Cp untuk konfigurasi D. jika dilihat pada gambar 4.24, terlihat perbedaan yang cukup jelas antara kedua grafik. Namun gambar 4.24 kurang bisa menggambarkan perbedaan antara kedua konfigurasi karena konfigurasi B dan D memiliki nilai c/t yang berbeda. Hal ini membuat grafik diatas tidak bisa dibandingkan secara langsung. Sehingga analisa yang akan dilakukan hanya

berfokus pada daerah depan (antara x/c=0 dan x/c=0.1) serta daerah belakang (antara x/c=0.9 dan x/c=1), dimana daerah tersebut masing – masing merupakan daerah terbentuknya *separation bubble* dan daerah terjadinya separasi masif. Apabila titik *reattachment* kedua konfigurasi dibandingkan, maka dapat diketahui bahwa titik reattachment aliran pada konfigurasi B (x/c = 0.11) berada di belakang konfigurasi D (x/c = 0.0554). hal ini selaras dengan Hipotesa awal bahwa pada nilai Re_t yang sama, penambahan panjang bidang tumpu di belakang *rounded* mampu membantu aliran untuk *reattach* menuju *surface* benda setelah terseparasi di depan. Dengan memperhatikan tabel perbandingan dimensi *bubble* di bawah, maka dapat diketahui bahwa penambahan panjang bidang tumpu dapat mempengaruhi dimensi *bubble* menjadi lebih pendek dan pipih.

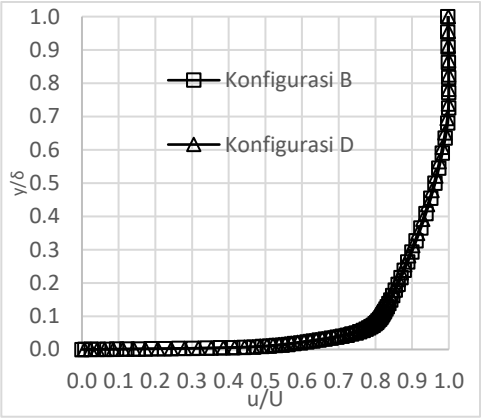
Tabel 4.12 Perbandingan dimensi *bubble* konfigurasi B dan D

Parameter Dimensi	Konfigurasi B	Konfigurasi D
Panjang *bubble*	x/c=0.0879	x/c=0.0554
Tinggi *bubble*	x/c=0.0095	x/c=0.00512
Sudut *bubble*	20°	19°

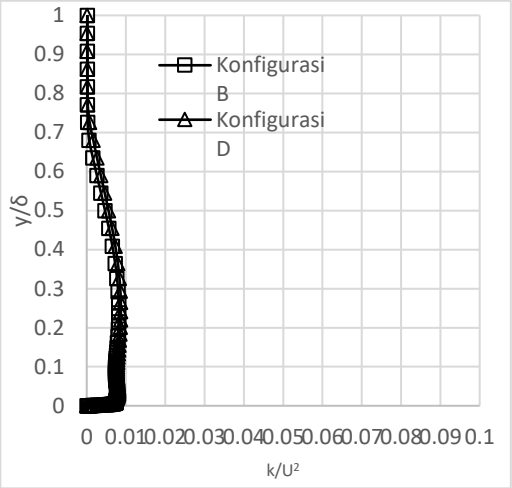
Plot profil kecepatan di titik O untuk Konfigurasi B dan D disajikan pada gambar 4.26 . garis oranye menunjukkan profil kecepatan untuk konfigurasi B sedangkan garis kuning menunjukan profil kecepatan untuk konfigurasi D. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa profil kecepatan pada daerah dekat *surface* benda relatif lebih kecil daripada profil kecepatan *primary flow*. Hal ini terjadi karena aliran melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga momentum aliran berangsur – angsur turun. Apabila kedua profil kecepatan dibandingkan, maka dapat dilihat bahwa profil kecepatan untuk Konfigurasi D memiliki nilai u/U yang relatif

lebih kecil dibandingkan dengan profil kecepatan untuk Konfigurasi B. hal ini menunjukkan bahwa penambahan panjang bidang tumpu aliran mempengaruhi kenaikan u/U Profil kecepatan aliran.

Plot *Turbulent kinetic energy* di titik O untuk Konfigurasi B dan D disajikan pada gambar 4.27 . garis oranye menunjukkan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi B sedangkan garis kuning menunjukan *Turbulent kinetic energy* untuk konfigurasi D. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa *Turbulent kinetic energy* pada konfigurasi D lebih besar daripada konfigurasi B. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menaikkan nilai Re_t akan meningkatkan *turbulent kinetic energy* sebab penambahan panjang bidang tumpu aliran akan mempercepat terjadinya *reattachment* pada aliran yang gagal terseparasi di depan ang menyebabkan aliran bertransisi menjadi turbulen. Kondisi ini akan meningkatkan intensitas fluktuasi di daerah setelah *reattachment* sehingga meningkatkan energi yang dibutuhkan aliran untuk melawan *adverse pressure.*



Gambar 4.32 Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi B dan D



Gambar 4.33 *Turbulent kinetic energy* pada titik O untuk konfigurasi B dan D

4.6. Diskusi

Untuk memberikan analisa yang lebih mendalam mengenai pengaruh kenaikan nilai Re_t dan penambahan panjang bidang tumpu aliran, maka perlu dilakukan sebuah diskusi mengenai data – data yang mampu menerangkan fenomena dan karakteristik aliran yang di uji pada bodi *thick plate-rounded leading edge* pada semua konfigurasi.

Tabel 4.13 analisa titik *reattachment* dan dimensi *bubble*

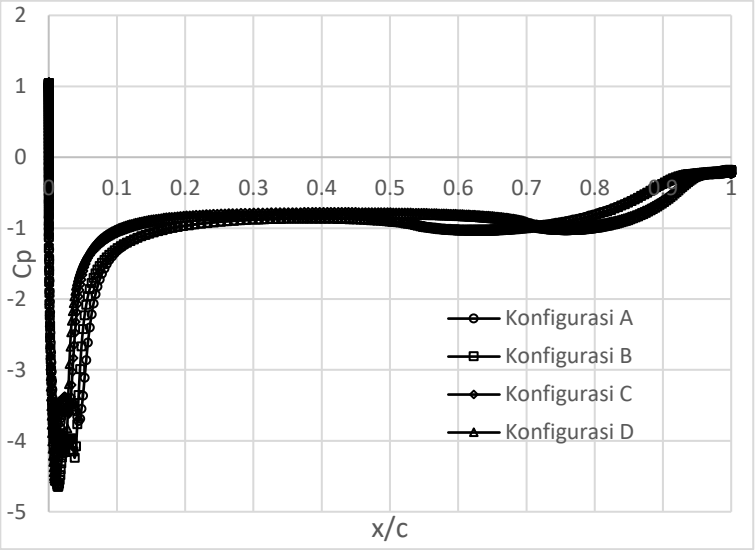
konfigurasi	Titik *reattachment* (x/c)	Panjang *bubble* (x/c)	Tebal *bubble* (x/c)		Sudut *bubble*
A	0.1249	0.1030	0.0130		27º
B	0.1124	0.0879	0.0095		20º
C	0.0792	0.0671	0.0067		25º
D	0.0694	0.0554	0.0051		19º

Tabel 4.13 menunjukkan tabulasi karakteristik aliran di daerah *rounded* meliputi titik *reattachment* dan dimensi *bubble*. Dari tabel 4.13, dapat disimpulkan bahwa dengan panjang bidang tumpu aliran yang sama, kenaikan nilai *reynolds number* akan membuat titik

reattachment aliran semakin maju, yang menandakan bahwa kenaikan nilai *Reynolds number* terbukti mampu membuat *reattachment* aliran semakin awal sehingga memintaskan aliran untuk bertransisi menjadi turbulen. Kenaikan nilai *reynolds number* juga terbukti mampu memundurkan titik separasi karena naiknya *turbulent kinetic energy* pada aliran sehingga lebih mampu untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*. Selain itu, *Reynolds number* juga mempengaruhi dimensi *bubble*, dimana *bubble* akan menjadi lebih pendek dan tipis seiring dengan kenaikan nilai *Reynolds number*. Dari tabel yang sama, dapat pula disimpulkan bahwa dengan nilai *Reynolds number* yang sama, penambahan panjang bidang tumpu aliran mampu memajukan titik *reattachment* dan memundurkan titik separasi massif di buritan. Hal ini bisa terjadi karena bidang tumpu aliran yag lebih panjang memberikan kesempatan bagi aliran untuk berelaksasi dan mentransfer *turbulent kinetic energy* menjadi energi tambahan untuk melawan *adverse pressure* di buritan. *Turbulent kinetic energy* juga merepresentasikan tingkat turbulensi aliran, dimana dengan menggunakan analisa *shape factor* (tabel 4.14), maka dapat diindikasikan bahwa aliran setelah melewati *separation bubble* sudah termasuk *turbulent medium intensity*. Gambar 4.28 menyajikan grafik Cp di *trailing edge* untuk tiap konfigurasi.

Tabel 4.14 *Shape factor* untuk semua konfigurasi

Konfigurasi	δ^*	Θ	H
A	0,04202	0,00509	1,3027
B	0,03653	0,002835	1,2285
C	4.55×10^{-7}	3.48×10^{-7}	1.3077
D	4.2×10^{-7}	3.24×10^{-7}	1.2981

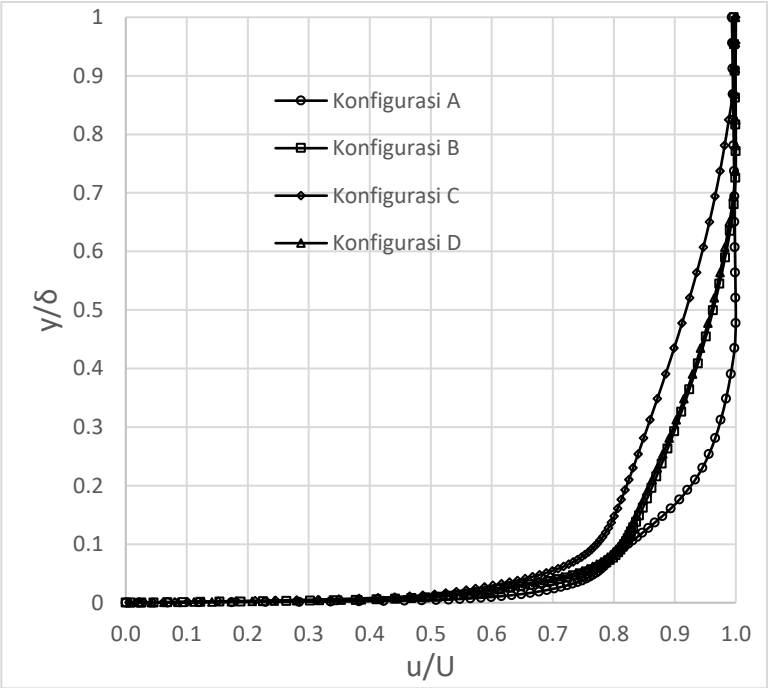


Gambar 4.34 grafik Cp untuk semua konfigurasi

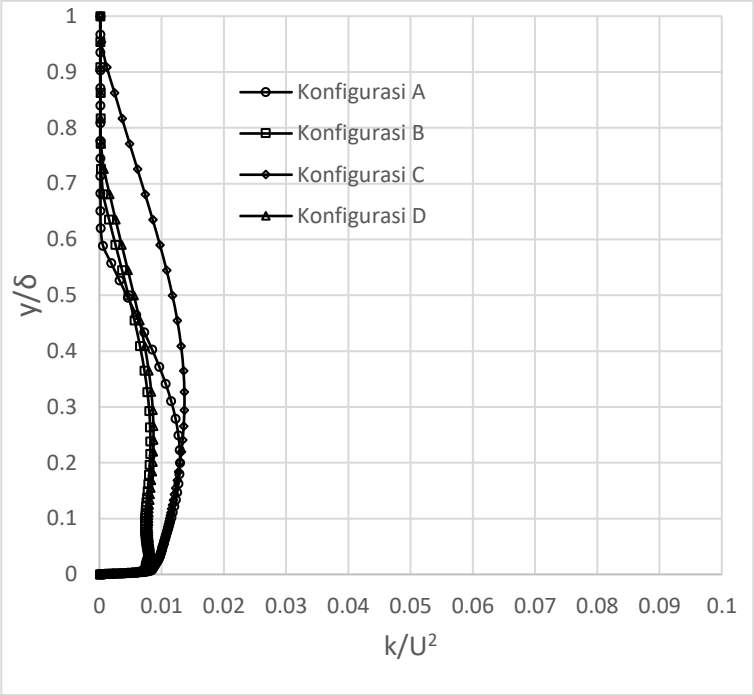
Untuk mendukung pernyataan di atas, maka disajikan grafik perbandingan profil kecepatan untuk semua konfigurasi pada gambar 4.29. dapat dilihat bahwa konfigurasi C memiliki profil kecepatan yang palin besar diantara semua konfigurasi. Fenomena ini menjadi menarik untuk dibahas karena apabila mengacu kepada hipotesa awal, maka seharusnya Konfigurasi D memiliki profil kecepatan yang lebih besar sebab konfigurasi D merupakan konfigurasi dengan panjang bidang tumpu paling besar dan nilai *Reynolds number* paling besar. walaupun demikian, apabila melihat data pada tabel 4.13 dan gambar 4.28, maka dapat disimpulkan bahwa kenaikan nilai *Reynolds number* dan penambahan bidang tumpu aliran mampu memajukan titik *reattachment* dan memundurkan titik separasi massif di buritan.

Gambar 4.29 menyajikan grafik *turbulent kinetic energy* di titik O untuk semua konfigurasi. Dapat dilihat bahwa konfigurasi D memiliki nilai *turbulent kinetic energy* yang paling besar di antara semua konfigurasi. Hal ini dapat terjadi karena *turbulent kinetic energy*

memerlukan beberapa saat untuk meluruhkan fluktuasi pada aliran menjadi energi tambahan untuk melawan *adverse pressure* di buritan. Sehingga, dapat di simpulkan bahwa konfigurasi D merupakan konfigurasi yang paling optimal untuk menunda separasi massif di buritan dan berhasil merepresentasikan hasil pengujian untuk nilai *Reynolds number* yang tinggi dan bidang tumpu aliran yang panjang.

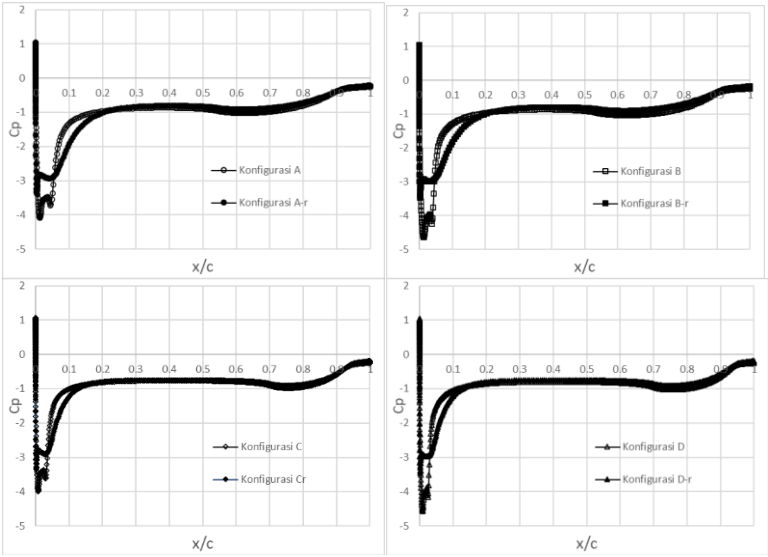


Gambar 4.35 profil kecepatan di titik O untuk semua konfigurasi



Gambar 4.36 *turbulent kinetic energy* di titik O untuk semua konfigurasi

Untuk analisa lebih lanjut, perlu dilakukan perbandingan hasil penelitian yang memiliki konfigurasi *rounded* pada *leading edge* (r/t). hal ini bertujuan untuk menetahui pengaruh antara bentuk *rounded* pada *leading edge* dengan mundurnya separasi massif di daerah *downstream*. Hasil penelitian yang saya bandingkan adalah hasil penelitian **rafrisah [13]** dimana konfigurasi yang digunakan adalah r/t = 0.1 dengan variasi nilai c/t dan Re_t yang sama dengan penelitian ini, yakni berturut – turut pada c/t 6.5 dan 10 serta Re_t 6.76 x 10^4 dan 10.15 x 10^4. Perbandingan antara kedua penelitian disajikan pada gambar 4.37.



Gambar 4.37 perbandingan grafik Cp dengan variasi r/t (a) konfigurasi A (b) konfigurasi B (c) konfigurasi C (d) konfigurasi D

Grafik cp untuk penelitian ini diwakilkan dengan simbol *hollow* sedangkan penelitian **rafrisah [13]** diwakilkan dengan simbol *solid.* Pada gambar 4.37 dapat dilihat bahwa untuk semua perbandingan, titik *reattachment* pada penelitian **rafrisah [13]** lebih terlambat daripada penelitian ini, dibuktikan dengan perbedaan *trendline* pada x/c = 1 hal ini menunjukkan bahwa dengan konfigurasi yang sama, perbedaan *rounded* pada *leading edge* memiliki pengaruh pada titik *reattachment* aliran, dimana dengan bentuk *rounded* yang semakin ramah maka aliran akan lebih mudah untuk dituntun kembali *attach*. Untuk melihat pengaruh antara bentuk *rounded* dengan titik separasi massif di daerah *downstream*, data kuntitatif disajikan pada tabel 4.15. jika dilihat pada tabel 4.15, dapat diketahui bahwa pada perbandingan tiap konfigurasi, nilai titik separasi massif penelitian **rafrisah [13]** lebih beras daripada penelitian ini, yang menunjukkan bahwa separasi massif di daerah *downstream* pada penelitian **rafrisah [13]** lebih mundur. Hal ini terjadi karena pada konfigurasi r/t = 0.1, titik

reattachment relatif lebih mundur daripada r/t 0.2 sehingga jarak antara titik *reattachment* dengan *trailing edge* menjadi relatif lebih pendek. Kondisi ini membuat momentum aliran masih mampu untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*. Sedangkan pada r/t = 0.2 jarak antara titik *reattachment* dengan *trailing edge* relatif lebih besar, sehingga momentum aliran lebih banyak hilang akibat *friction* dari bidang tumpu sebelum melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*.

Tabel 4.15 Perbandingan karakteristik *bubble* dan *Shape factor* dengan penelitian **Rafrisah [13]**

Konf.	**Titik *reattachment* (x/c)**	**Panjang relatif *separation bubble* (x/c)**	**Titik separasi masif (x/c)**	***Shape Factor* (H)**
A	0.163	0.142	0.933	1.429
A-r	0.125	0.103	0.926	1.303
B	0.148	0.127	0.940	1.419
B-r	0.112	0.088	0.933	1.229
C	0.075	0.063	0.971	1.259
C-r	0.079	0.067	0.954	1.308
D	0.059	0.047	0.979	1.252
Dr	0.069	0.055	0.957	1.298

BAB V
PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Setelah menganalisa karakteristik *separation bubble* pada *thick plate – rounded leading edge* dengan variasi c/t dan nilai Re_t secara numerik maupun eksperimen maka didapatan kesimpulan sebagai berikut. Kenaikan nilai *Reynolds number* dan penambahan panjang bidang tumpu aliran mampu memajukan titik *reattachment* aliran yang terseparasi di daerah *rounded* dan memundurkan titik separasi masif di buritan. Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Pada konfigurasi c/t yang sama dengan variasi nilai Re_t ($6.76x10^4$ dan $10.15x10^4$), dalam perbandingan antara konfigurasi A dan B serta Konfigurasi C dan D, dapat disimpulkan bahwa dengan kenaikan nilai Re_t maka separasi massif di daerah *downstream* menjadi lebih mundur. Hal ini bisa terjadi karena aliran mendapatkan energi dari *primary flow* lebih besar sehingga aliran mengalami *reattachment* lebih awal dan transisi *boundary layer* yang lebih awal juga.
2. Pada konfigurasi Re_t yang sama dengan variasi nilai c/t (6.5 dan 10), dalam perbandingan antara konfigurasi A dan C serta Konfigurasi B dan D, dapat disimpulkan bahwa dengan menanmbah panjang bidang tumpu aliran di belakang *leading edge* mampu memundurkan titik separasi massif di daerah *downstream*. Hal ini bisa terjadi karena jarak antara *blockage* aliran pada *trailing edge* menjadi lebih jauh sehingga memberikan kesempatan aliran yang berfluktuasi untuk relaksasi dan mengubah energi fluktuasi menjadi momentum tambahan untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*.

3. Jika keempat konfigurasi dibandingkan, dapat disimpulkan bahwa aliran yang mengalami *reattachment* lebih awal dan membentuk *separation bubble* lebih kecil mampu memundurkan titik separasi massif di daerah *downstream*. Hal ini bisa terjadi karena aliran mengalami transisi lebih awal dari laminar ke turbulen sehingga menghasilkan momentum aliran lebih besar untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream.*

5.2. Saran

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

1. Melakukan pembersihan dan peremajaan terhadap *wind tunnei* pada Gedung DTM lantai 3 untuk menjamin keabsahan data ang diambil. Peremajaan yang disarankan meliputi penggantian *fan* dan *tect section*, karena *fan* yang digunakan sekarang sudah tua dan tidak mampu memenuhi kapasitas aslinya dan *test section* sudah terlalu banyak memiliki lubang.
2. Menambah jumlah *wall pressure tap* pada benda uji, terutama pada daerah – daerah kritis seperti *rounded leading edge, trailing edge,* ataupun daerah yang menjadi titik pengamatan.
3. Melakukan pengambilan data pada interval waktu yang sama dan konstan. Hal ini harus dilakukan untuk menjaga agar data yang terekam memiliki datum yang sama.
4. Melakukan pengadaan DAQPro sebagai perangkat utama pengambilan data

Daftar Pustaka

[1] Armin Ghoddousi. 1998. **A CONCEPTUAL STUDY OF AIRFOIL PERFORMANCE ENHANCEMENTS USING CFD**. Sojo University : Thesis

[2] Setyo Hariyadi S.P., Wawan Aries Widodo, Bambang Junipitoyo, Wiwid Suryono, Supriadi. **Investigasi Perbandingan Posisi Rectangular Flat Plate Vortex Generator dengan Posisi Straight pada Wing Airfoil NACA 43018**. 2018 : Jurnal Penelitian September 2018

[3] A. Samson, S. Sarkar and K. Anand. **Experimental Investigation of a Separation Bubble on a Flat Plate with Semi-circular Leading Edge for different Reynolds Numbers**. 2012 : 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics.

[4] Agus Aribowo. **Penelitian Mekanisme Stall Akibat Perkembangan Gelembung Separasi Pada Sayap NACA 0017 Secara Eksperimen di Terowongan Angin Subsonik.** 1997 : Penditi unit uji Aerodinamika

[5] S.L. Herbst, C.J. Kähler, and R. Hain. **Influence of large-scale free-stream turbulence on an SD7003 airfoil at low Reynolds numbers**. June 2017: Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, Germany

[6] Fox, Robert W. and Mc. Donald, Alan T., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, 5th edition**. John Wiley and Son, Inc.

[7] Hui Hu and Zifeng Yang. **An Experimental Study of the Laminar Flow Separation on a Low-Reynolds-Number Airfoil.** 2008 : Department of Aerospace Engineering, Iowa State University, Ames, IA 50011

[8] Dongwi Lee, Soshi Kawai, Taku Nonomura, Masayuki Anyoji, Hikaru Aono, Akira Oyama, Kesuke Asai, dan Kozo Fujii. **Mechanisms of surface pressure distribution within a laminar separation bubble at different Reynolds numbers**. 2015 : AIP Publishing LLC.

[9] Versteeg H.K., dan Malalasekera W., **An Introduction To Computational Fluid Dynamics-The Finite Volume Method**, Longman Sientific & 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] Moh. Kholid Yadi, **Studi Eksperimental Karakteristik Aliran Fluida Melintasi Silinder Silkular Teriris Tipe-D Dengan Tambahan Bentuk Ellips Khusus,** Departemen Teknik Mesin, FTIRS – ITS, Surabaya, 2010.

[13] Athalla Rafrisah, **STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIK KARAKTERISTIK *SEPARATION BUBBLE* DARI ALIRAN DUA DIMENSI PADA THICK PLATE–ROUNDED LEADING EDGE (r/t = 0.2) DENGAN PENGARUH REYNOLDS NUMBER ($Re_t = 6.76\times10^4$ dan $Re_t = 10.15\times10^4$) DAN PANJANG AKSIAL (c/t = 6.5 DAN c/t = 10),** Departemen Teknik Mesin, FTIRS-ITS, Surabaya, 2020

Daftar Riwayat Hidup

Ahmad Ali Wafa Dilahirkan pada tanggal 08 Juni 1997 di kota Sidoarjo. Ahmad Ali Wafa memulai pendidikannya Roudhotul Athfal Sabilil Khoir, Madarasah Ibtidaiyah Sabilil Khoir, SMP Negeri 2 Jabon, SMA Negeri 1 Sidoarjo, dan yang terakhir di Teknik Mesin FTIRS ITS melalui jalur undangan. Selama masa pendidikannya, penulis aktif dalam kegiatan keorganisasian, dimana penulis pernah menjabat sebagai Ketua OSIS dan Ketua diraksi Majalah sekolah saat SMP, Kadep Syiar Kerohanian dan anggota Gita Smanisda Choir pada saat SMA, dan Sekertaris umum MMC pada saat kuliah. Penulis juga aktif dalam kegiatan berskala Internasional, dimana penulis pernah menjadi *Volunteer* pada konferensi internasional tahunan ICOME 2017, serta berkesempatan untuk melakukan program S*tudent Exhange* di salah satu Universitas di Malaysia yakni UTeM. Selama berkuliah, penulis mengambil bidang *study* Konversi Energi dengan pilihan Mekanika Fluida dengan alasan ingin mewujudkan impian penulis yakni membuat *personal flying suit*. moto hidup penulis yang selalu dipegang adalah *"nek nandur pari isih bakal iso cukul suket, nek nandur suket ora bakal iso cukul pari. mamulo ben dino di babati"*

Email : Ahmadaliwafa21089@gmail.com