



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**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*  
( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  DAN  $Re_t = 10.15 \times 10^4$ ) DAN PANJANG  
AKSIAL ( $c/t = 6.5$  DAN  $c/t = 10$ )**

**ATHALLA RAFRISAH  
NRP. 0211154000062**

**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*  
( $r/t = 0.1$ ) DENGAN PENGARUH *REYNOLDS NUMBER*  
( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  DAN  $Re_t = 10.15 \times 10^4$ ) DAN PANJANG  
AKSIAL ( $c/t = 6.5$  DAN  $c/t = 10$ )**

**ATHALLA RAFRISAH  
NRP. 0211154000062**

**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**

**SEPARATION BUBBLE CHARACTERISTIC OF TWO DIMENSIONAL FLOW ALONG THICK PLATE-ROUNDED LEADING EDGE ( $r/t = 0.1$ ) WITH THE EFFECTS OF REYNOLDS NUMBER ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  DAN  $Re_t = 10.15 \times 10^4$ ) AND AXIAL LENGTH ( $c/t = 6.5$  DAN  $c/t = 10$ ) EXPERIMENTAL STUDY AND SIMULATION**

**ATHALLA RAFRISAH  
NRP. 0211154000062**

**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* ( $r/t = 0.1$ ) DENGAN PENGARUH**  
***REYNOLDS NUMBER* ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  DAN  $Re_t = 10.15 \times 10^4$ )**  
**DAN PANJANG AKSIAL ( $c/t = 6.5$  DAN  $c/t = 10$ )**

**TUGAS AKHIR**


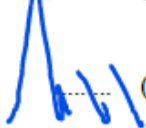
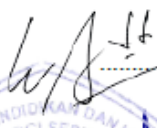

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

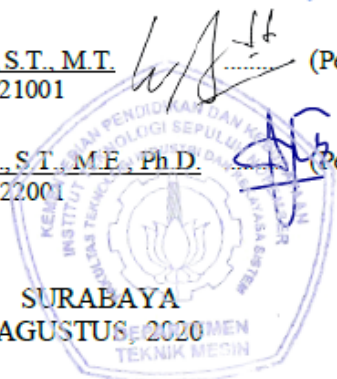
**Athalla Rafrisah**

NRP. 02111540000062

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 *SEPARATION BUBBLE* DARI  
ALIRAN DUA DIMENSI PADA *THICK PLATE-  
ROUNDED LEADING EDGE* ( $r/t = 0.1$ ) DENGAN  
PENGARUH *REYNOLDS NUMBER* ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  DAN  
 $Re_t = 10.15 \times 10^4$ ) DAN PANJANG AKSIAL ( $c/t = 6.5$  DAN  
 $c/t = 10$ )**

**Nama Mahasiswa** : Athalla Rafrisah  
**NRP** : 0211154000062  
**Jurusan** : Teknik Mesin  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko

**ABSTRAK**

Berbagai bentuk dan model transportasi yang ada saat ini didesain sedemikian rupa agar memiliki kerugian energi seminimal mungkin. Salah satu metode untuk meminimalkan rugi energi adalah memundurkan titik separasinya dengan memanfaatkan *bubble separation*. Metode ini memaksa *boundary layer* aliran untuk bertransisi secara pintas dari laminar menjadi turbulen, sehingga momentum yang dimiliki aliran akan menjadi lebih kuat. *Bubble separation* merupakan fenomena dimana aliran mengalami separasi dan kemudian akan kembali melekat lagi pada dinding (*reattachment*). Kesempatan terjadinya *reattachment* pada suatu aliran akan dipengaruhi oleh *entrainment energy* dari *primary flow* dan adanya kesempatan bagi aliran untuk melekat kembali berupa bidang tumpu aliran yang cukup panjang. Korelasi yang tepat antara *dynamic force* yang diwakili oleh bilangan Reynolds, bentuk dari *leading edge*, serta panjang aksial perlu diteliti. Dengan memperpanjang jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang, diduga akan semakin memudahkan aliran untuk *reattachment* setelah aliran terseparasi saat melewati *leading edge* dan menunda separasi pada daerah *downstream*.

Penelitian dilakukan dengan eksperimen dan simulasi numerik dua dimensi pada *thick plate–rounded leading edge* ( $r/t=0.1$ ) dengan variasi bilangan Reynolds ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  dan  $10.15 \times 10^4$ ) 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 transducer*. Kemudian tekanan statis pada *midspan* benda uji diukur sesuai dengan konfigurasi uji. Simulasi numerik (dua dimensi) dilakukan dengan model turbulen  $k-k_l-\omega$  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*.

Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik *separation bubble* yang terbentuk dipengaruhi oleh bilangan Reynolds dan panjang aksialnya. Semakin besar bilangan Reynolds maka akan semakin awal aliran mengalami *reattachment*. Begitu juga dengan panjang aksial, semakin panjang bidang tumpu alirannya maka akan semakin awal aliran mengalami *reattachment*. Aliran yang mengalami *reattachment* lebih awal menyebabkan aliran tersebut bertransisi dari laminar ke turbulen lebih awal juga, sehingga aliran tersebut memiliki momentum yang lebih kuat untuk menunda separasi masif di buritan.

**Kata kunci:** *bubble separation, passive boundary layer control, massive separation.*

**SEPARATION BUBBLE CHARACTERISTIC OF TWO  
DIMENSIONAL FLOW ALONG THICK PLATE–  
ROUNDED LEADING EDGE ( $r/t = 0.1$ ) WITH THE  
EFFECTS OF REYNOLDS NUMBER ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  AND  
 $Re_t = 10.15 \times 10^4$ ) AND AXIAL LENGTH ( $c/t = 6.5$  DAN  $c/t =$   
 $10$ ) EXPERIMENTAL STUDY AND SIMULATION**

**Name** : Athalla Rafrisah  
**NRP** : 0211154000062  
**Major** : Teknik Mesin  
**Advisor** : Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko

**ABSTRACT**

*Many kinds of transportation have been designed to reduce their energy losses as minimum as possible. One of those designs are made to reduce its energy losses by delaying massive separation that occurs, by taking advantages of bubble separation. Bubble separation can force the laminar air flow to shift to turbulent faster and give the air flow stronger momentum. Bubble separation is a phenomenon where the air flow is separated from the wall and reattached again after it obtained enough energy from primary flow. The chance of reattachment also depends on how long the wall behind is. An optimum combination of dynamic force from primary flow, shape of leading edge and axial length are needed. By lengthen the axial length, we expect that it will make it easier for the air flow to reattach again to the wall and delays massive separation in the downstream section.*

*This research will be done by doing experimental study and two-dimensional numerical simulation with Reynolds number variation ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  and  $10.15 \times 10^4$ ) 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  $r/t = 0.1$ . 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  $k-k_l-\omega$  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 results from this research show that the characteristic of separation bubble is very influenced by Reynolds number and axial length. Increase in both Reynolds number and axial length will results in early reattachment of the separated flow. Earlier reattachment point of separated flow will let said flow transitioning and become turbulent flow earlier than usual. This is very beneficial since turbulent flow has stronger momentum to delay massive separation in downstream section.*

**Keywords:** *bubble separation, passive boundary layer control, massive separation.*



## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr. wb.

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT., Tuhan semesta alam yang selalu memberikan kasih dan sayangNya, sehingga saya mampu menyelesaikan dengan baik Tugas Akhir ini yang berjudul:

**Studi Eksperimen dan Numerik Karakteristik *Separation Bubble* dari Aliran Dua Dimensi pada *Thick Plate–Rounded Leading Edge* ( $R/T = 0.1$ ) dengan Pengaruh *Reynolds Number* ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  dan  $Re_t = 10.15 \times 10^4$ ) dan Panjang Aksial ( $C/T = 6.5$  Dan  $C/T = 10$ )**

Saya menyadari bahwa buku TA ini masih jauh dari kata sempurna dan dalam penyelesaiannya pun, saya tidak henti-hentinya dibantu oleh berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini saya ingin menghaturkan rasa terima kasih sebanyak-banyaknya pada:

1. Ayah, Ibu dan kedua adik saya yang senantiasa mendoakan dan memberi dukungannya.
2. Pak Herman Sasongko, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir dan dosen wali saya, yang telah membimbing saya dari awal hingga akhir masa perkuliahan ini, sehingga saya lulus dan kelak akan membanggakan almamater.
3. Pak Tri Yogi, Pak Wawan, Bu Vivien dan Pak Sutardi selaku dosen penguji yang telah mengkritisi saya dan semakin menyempurnakan Tugas Akhir ini.
4. Pak Alief yang telah membimbing Kerja Praktek saya dan Bu Gita yang telah membimbing KKN saya. Berkat beliau-beliau ini pandangan saya di bidang politik dan sosial menjadi semakin luas.

5. Serta seluruh dosen-dosen saya dan karyawan yang telah mengajarkan dan membimbing saya baik di dalam kelas, maupun di luar kelas.
6. Pak Tris, teknisi laboratorium Mekanika Fluida yang telah membuatkan alat dan membantu dalam eksperimen saya, serta wejangan-wejangan yang diberikan.
7. Kelompok Tugas Akhir saya, Wafa, Haris dan Ifa yang dalam susah dan senang terus berjuang bersama.
8. Pak Suharyono, Pak Imam serta seluruh karyawan dari PT.PINDAD (Persero), khususnya Divisi Alat Berat, yang telah membantu saya selama melakukan kerja praktik.
9. Mas Mul serta senior-senior yang telah mengkader dan mengajarkan apa artinya menjadi seorang mahasiswa.
10. Wafa, Yoyok, Ayub, Derry, Tory, Ihza, Zain, Galih, Intan Putri, Anggi, Mille, Thanoswati dan anggota Sekte Kobra (independen) lainnya yang telah menunjukkan kalau setiap orang itu memang punya kelebihan dan kekurangannya masing-masing.
11. Tadahira\_, Miiicin serta teman-teman di *club* NekoPoi dan NKRI yang telah menunjukkan dan mengajarkan saya kalau keluarga pun bisa dibentuk dari manapun.
12. Adit, Mael, Mas Fandrik dan teman-teman warkop lainnya yang telah membantu saya *push rank* sampai ke *Mythic*.
13. Widan, Fadil dan teman-teman M58 lainnya yang telah menemani dan berjuang bersama sejak awal hingga akhir, serta menjadi keluarga ke dua saya selama kuliah.
14. Teman-teman, Mas-mbak dan Adik-adik pengurus DIMENSI yang telah menerima dan mengajarkan saya banyak hal selama di DIMENSI.
15. Seluruh pengurus dan anggota Himpunan Mahasiswa Taman Colok yang telah menemani dan menghibur di antara padatnya jam perkuliahan.

16. Mas-Mbak dan Adik-adik di mesin, yang baik sadar maupun tidak, pernah membantu saya selama kuliah.
17. Semua pihak yang telah membantu dan membentuk saya menjadi diri saya yang saat ini, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini semaksimal mungkin.

Saya menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu kritik dan masukan sangat saya harapkan dari pihak manapun. Akhir kata saya senantiasa berharap Tugas Akhir ini dapat digunakan sebaik-baiknya dan dapat bermanfaat di kemudian hari.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1 Dasar Teori .....	7
2.2 Penelitian Terdahulu.....	12
2.3 Numerical Modelling.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	23
3.1 Konfigurasi Uji.....	23
3.2 Analisa Dimensi .....	24
3.3 Metode Eksperimen.....	26
3.4 Metode Simulasi Numerik.....	30
3.5 Jadwal Pelaksanaan .....	34
3.6 Flowchart Penelitian.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1. Validasi.....	37
4.2. Analisa Grid Independence .....	41
4.3. Gambaran Umum .....	42
4.4. Analisa Karakteristik Aliran.....	44

4.4.1. Konfigurasi Uji A ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ).....	44
4.4.2. Konfigurasi Uji B ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).....	49
4.4.3. Konfigurasi Uji C ( $c/t=10$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ).....	53
4.4.4. Konfigurasi Uji D ( $c/t=10$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).....	59
4.5. Analisa antar Konfigurasi Uji.....	64
4.5.1. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=6.5$ dengan $Re_t=6.76 \times 10^4$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ .....	64
4.5.2. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=10$ dengan $Re_t=6.76 \times 10^4$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ .....	69
4.5.3. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=6.5$ dengan $c/t=10$ pada $Re_t=6.76 \times 10^4$ .....	73
4.5.4. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=6.5$ dengan $c/t=10$ pada $Re_t=10.15 \times 10^4$ .....	77
4.6. Diskusi.....	81
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	91
5.1. Kesimpulan.....	91
5.2. Saran.....	92
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	93

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	<i>boundary layer</i> pada plat datar.....	7
<b>Gambar 2.2</b>	<i>boundary layer</i> pada airfoil, <b>Anderson [7]</b> .....	9
<b>Gambar 2.3</b>	<i>separation bubble</i> , <b>Pauley et al [8]</b> .....	10
<b>Gambar 2.4</b>	visualisasi aliran, <b>Sutardi &amp; Widodo [3]</b> .....	12
<b>Gambar 2.5</b>	distribusi tekanan pada aliran dengan bilangan Reynolds (a) $Re = 1.3 \times 10^4$ , (b) $Re = 2.1 \times 10^4$ , <b>Sutardi &amp; Widodo [3]</b> .....	13
<b>Gambar 2.6</b>	profil kecepatan aliran pada (a) $x/w = -3$ , (b) $x/w = 0.5$ , (c) $x/w = 3$ dengan $Re = 1.3 \times 10^4$ , <b>Sutardi &amp; Widodo [3]</b> .....	13
<b>Gambar 2.7</b>	visualisasi aliran, <b>Sutrisno et al [4]</b> .....	15
<b>Gambar 2.8</b>	(a)kontur kecepatan aliran dan (b)kontur intensitas turbulensi aliran, <b>Sutrisno et al [4]</b> ...	16
<b>Gambar 2.9</b>	perbandingan profil kecepatan aliran, <b>Sutrisno et al [4]</b> .....	17
<b>Gambar 2.10</b>	perbandingan intensitas turbulensi aliran, <b>Sutrisno et al [4]</b> .....	17
<b>Gambar 2.11</b>	<i>separation bubble</i> pada simulasi 3D, <b>Lamballais et al [5]</b> .....	18
<b>Gambar 2.12</b>	profil kecepatan pada simulasi 3D, <b>Lamballais et al [5]</b> .....	19
<b>Gambar 2.13</b>	blok diagram dari CFD, <b>Versteeg dan Malalasekera, [10]</b> .....	20
<b>Gambar 2.14</b>	pendekatan <i>turbulence modelling</i> , <b>Versteeg dan Malalasekera, [10]</b> .....	20
<b>Gambar 3.1</b>	parameter pengukuran.....	23
<b>Gambar 3.2</b>	konfigurasi uji.....	24
<b>Gambar 3.3</b>	Skema <i>wind tunnel</i> yang digunakan.....	26
<b>Gambar 3.4</b>	Skema validasi manometer <i>value</i> terhadap nilai keluaran <i>pressure transducer</i> (V) data validasi.....	28
<b>Gambar 3.5</b>	<i>wall pressure tap</i> pada benda uji.....	29
<b>Gambar 3.6</b>	grafik kalibrasi $\Delta h$ manometer (mm) terhadap	

	tegangan <i>pressure transducer</i> ( $v$ ) pada pengukuran tekanan dinamis.....	30
<b>Gambar 3.7</b>	grafik kalibrasi $\Delta h$ manometer (mm) terhadap tegangan <i>pressure transducer</i> ( $v$ ) pada pengukuran tekanan statis.....	30
<b>Gambar 3.8</b>	Model <i>meshing body</i> ( $L = 650$ mm) .....	31
<b>Gambar 3.9</b>	penentuan parameter dan batasan aliran.....	32
<b>Gambar 3.10</b>	zona <i>boundary condition</i> .....	33
<b>Gambar 3.11</b>	Hasil <i>postprocessing</i> .....	33
<b>Gambar 3.12</b>	skema posisi titik O.....	34
<b>Gambar 4.1</b>	grafik koefisien tekanan ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) validasi model numerik $k-kl-\omega$ dengan data hasil eksperimen (a) dan validasi model numerik $k-\omega SST$ dengan data hasil eksperimen (b).....	37
<b>Gambar 4.2</b>	skema pengambilan data profil kecepatan.....	38
<b>Gambar 4.3</b>	perbandingan profil kecepatan ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) pada titik O dengan model numerik $k-kl-\omega$ terhadap model numerik $k-\omega SST$ .....	39
<b>Gambar 4.4</b>	grafik koefisien tekanan ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) validasi model numerik $k-kl-\omega$ dengan data hasil eksperimen.....	39
<b>Gambar 4.5</b>	grafik koefisien tekanan ( $c/t=10$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) validasi model numerik $k-kl-\omega$ dengan data hasil eksperimen.....	40
<b>Gambar 4.6</b>	grafik koefisien tekanan ( $c/t=10$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) validasi model numerik $k-kl-\omega$ dengan data hasil eksperimen.....	40
<b>Gambar 4.7</b>	visualisasi aliran ( $c/t=6.5$ ) pada $Re_t=6.76 \times 10^4$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ .....	42
<b>Gambar 4.8</b>	visualisasi aliran ( $c/t=10$ ) pada $Re_t=6.76 \times 10^4$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ .....	42
<b>Gambar 4.9</b>	visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi A ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ).....	44



<b>Gambar 4.10</b>	visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi A.....	45
<b>Gambar 4.11</b>	profil kecepatan konfigurasi A pada titik O.....	47
<b>Gambar 4.12</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi A pada titik O.....	48
<b>Gambar 4.13</b>	visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi B ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).....	49
<b>Gambar 4.14</b>	visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi B.....	50
<b>Gambar 4.15</b>	profil kecepatan konfigurasi B pada titik O.....	52
<b>Gambar 4.16</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi B pada titik O.....	53
<b>Gambar 4.17</b>	visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi C ( $c/t=10$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ).....	54
<b>Gambar 4.18</b>	visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi C.....	55
<b>Gambar 4.19</b>	profil kecepatan konfigurasi C pada titik O.....	57
<b>Gambar 4.20</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi C pada titik O.....	58
<b>Gambar 4.21</b>	visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi D ( $c/t=10$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).....	59
<b>Gambar 4.22</b>	visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi D.....	60
<b>Gambar 4.23</b>	profil kecepatan konfigurasi D pada titik O.....	62
<b>Gambar 4.24</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi D pada titik O.....	63
<b>Gambar 4.25</b>	koefisien tekanan konfigurasi A ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi B ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).....	65
<b>Gambar 4.26</b>	profil kecepatan konfigurasi A dan B pada titik O.....	67
<b>Gambar 4.27</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi A dan B pada titik O.....	68
<b>Gambar 4.28</b>	koefisien tekanan konfigurasi C ( $c/t=10$ dan	

	$Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi D ( $c/t=10$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).....	69
<b>Gambar 4.29</b>	profil kecepatan konfigurasi C dan D pada titik O.....	71
<b>Gambar 4.30</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi C dan D pada titik O.....	72
<b>Gambar 4.31</b>	koefisien tekanan konfigurasi A ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi C ( $c/t=10$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ ).....	73
<b>Gambar 4.32</b>	profil kecepatan konfigurasi A dan C pada titik O.....	75
<b>Gambar 4.33</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi A dan C pada titik O.....	76
<b>Gambar 4.34</b>	koefisien tekanan konfigurasi B ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) dan konfigurasi D ( $c/t=10$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).....	77
<b>Gambar 4.35</b>	profil kecepatan konfigurasi B dan D pada titik O.....	80
<b>Gambar 4.36</b>	<i>turbulent kinetic energy</i> konfigurasi B dan D pada titik O.....	80
<b>Gambar 4.37</b>	analisa grafik koefisien tekanan.....	82
<b>Gambar 4.38</b>	analisa profil kecepatan.....	84
<b>Gambar 4.39</b>	analisa <i>turbulent kinetic energy</i> .....	85
<b>Gambar 4.40</b>	perbandingan grafik koefisien tekanan.....	86

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	konfigurasi uji.....	24
<b>Tabel 3.2</b>	Jadwal pelaksanaan penelitian.....	34
<b>Tabel 4.1</b>	analisa <i>grid independence</i> Cp pada $x=50\%C$ untuk $c/t=6.5$ .....	41
<b>Tabel 4.2</b>	analisa <i>grid independence</i> Cp pada $x=50\%C$ untuk $c/t=10$ .....	41
<b>Tabel 4.3</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi A.....	46
<b>Tabel 4.4</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi A.....	48
<b>Tabel 4.5</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi B.....	51
<b>Tabel 4.6</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi B.....	53
<b>Tabel 4.7</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi C.....	56
<b>Tabel 4.8</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi C.....	58
<b>Tabel 4.9</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi D.....	61
<b>Tabel 4.10</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi D.....	63
<b>Tabel 4.11</b>	analisa karakteristik aliran.....	64
<b>Tabel 4.12</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi A dan B.....	66
<b>Tabel 4.13</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi A dan B.....	68
<b>Tabel 4.14</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi C dan D.....	70
<b>Tabel 4.15</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi C dan D.....	72
<b>Tabel 4.16</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi A dan C.....	75
<b>Tabel 4.17</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi A dan C.....	77
<b>Tabel 4.18</b>	analisa karakteristik aliran konfigurasi B dan D.....	79
<b>Tabel 4.19</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran konfigurasi B dan D.....	81
<b>Tabel 4.20</b>	analisa karakteristik aliran.....	83
<b>Tabel 4.21</b>	analisa <i>shape factor</i> aliran.....	85
<b>Tabel 4.22</b>	perbandingan karakteristik aliran.....	89

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

$b$	:	jarak antar <i>wall pressure tap</i> (mm)
$c$	:	panjang <i>chord</i> (mm)
$c/t$	:	rasio panjang <i>chord</i> terhadap tebal <i>body</i>
$C_p$	:	koefisien tekanan
$d$	:	diameter <i>wall pressure tap</i> (mm)
$l$	:	panjang <i>trailing edge</i> (mm)
$l/t$	:	rasio panjang <i>trailing edge</i> terhadap tebal <i>body</i>
$L$	:	panjang bidang tumpu aliran (mm)
$L/t$	:	rasio panjang bidang tumpu aliran terhadap tebal <i>body</i>
$r$	:	jari-jari <i>leading edge</i> (mm)
$r/t$	:	rasio besar <i>rounded</i> terhadap tebal <i>body</i>
$Re$	:	bilangan Reynolds
$Re_t$	:	bilangan Reynolds terhadap tebal <i>body</i>
$s$	:	panjang <i>span</i> /lebar <i>body</i> (mm)
$t$	:	tebal <i>body</i> (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 <i>chord</i>
$\Delta h$	:	perbedaan ketinggian (mm)
$\delta$	:	tebal <i>boundary layer</i>
$\delta^*$	:	<i>displacement thickness</i>
$\theta$	:	<i>momentum thickness</i>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Berbagai bentuk dan model transportasi yang ada saat ini didasari oleh ilmu aerodinamika. Terutama pada transportasi yang melaju dengan kecepatan tinggi, seperti kereta cepat, mobil balap, pesawat terbang dan lain sebagainya. Model-model transportasi tersebut didesain sedemikian rupa agar memiliki kerugian energi seminimal mungkin. Salah satu metode untuk meminimalkan rugi energi adalah memundurkan titik separasinya dengan mempercepat transisi *boundary layer* laminar menjadi turbulen, karena aliran turbulen memiliki momentum aliran yang lebih besar. Semakin besar momentum yang dimiliki aliran, aliran tersebut dapat melawan tegangan geser lebih lama dan memundurkan titik separasi lebih jauh. Mempercepat transisi *boundary layer* dapat dilakukan baik dengan kontrol aktif maupun kontrol pasif. Salah satu metode kontrol pasif transisi *boundary layer* adalah dengan memanfaatkan *bubble separation*. Metode ini memaksa *boundary layer* aliran untuk bertransisi secara pintas dari aliran laminar menjadi turbulen, sehingga akan memundurkan titik separasinya.

Pada dasarnya airfoil merupakan bentuk yang baik untuk meminimalkan kerugian energi aliran. Kerugian energi aliran dapat diminimalkan dengan memundurkan titik separasinya, terutama dengan mempercepat transisi *boundary layer*. Penelitian untuk mempercepat transisi *boundary layer* tersebut pernah dilakukan oleh **Seshagiri et al [1]** dengan melakukan percobaan mengenai pengaruh dari *vortex generator* pada airfoil. Hasil dari penelitiannya menunjukkan pengaruh dari *vortex generator* yang dapat memundurkan titik separasinya dengan menaikkan nilai dari koefisien *lift* ( $C_L$ ) hingga 25%. Namun dengan menambahkan *vortex generator* atau aksesoris lainnya, tidak didapatkan data mengenai seberapa besar pengaruh dari transisi *boundary layer* pada mundurnya titik separasi karena penelitiannya yang berfokus pada *vortex generator*.

Penelitian mengenai *bubble separation* pernah dilakukan oleh **Hansen et al [2]**, yaitu mengenai pengaruh *bubble separation* pada airfoil tipe NACA 0021 dan NACA 65-021 di berbagai *angle of attack*. Percobaan tersebut menghasilkan kenaikan gaya angkat pada *angle of attack* ( $\alpha$ ) =  $5^\circ$  hingga  $8^\circ$  pada NACA 0021 dan ( $\alpha$ ) =  $0^\circ$  hingga  $4^\circ$  pada NACA 65-021. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini juga menunjukkan mundurnya titik separasi sebagai penyebab dari naiknya gaya angkat pada kedua airfoil tersebut.

Penundaan titik separasi juga dilakukan dengan menambah momentum aliran fluida menggunakan turbulator. Turbulator digunakan untuk memanipulasi aliran dengan memberi *obstacle* (penghalang) pada *body* yang dialirinya sehingga terbentuk *bubble separation*. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh **Sutardi & Widodo [3]**, dimana percobaan ini dilakukan dengan mengalirkan plat datar yang diberikan penghalang berupa persegi melintang pada nilai  $Re = 1.3 \times 10^4$  dan pada  $Re = 2.1 \times 10^4$ . Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan yaitu semakin tinggi nilai  $Re$  maka titik *reattachment* akan semakin maju. Penelitian mengenai *bubble separation* ini juga dilakukan oleh **Sutrisno et al [4]**, yaitu pengaruh *disturbance* berupa *bluff rectangular* terhadap *free flow*. Penelitian ini dilakukan untuk mengamati fenomena *bubble separation* terhadap ketebalan dari penghalang. Hasil yang dapat disimpulkan adalah semakin kecil *shape factor*-nya maka hasilnya akan semakin bagus, sama halnya dengan hasil dari penelitian ini dimana nilai optimumnya didapatkan pada ketebalan penghalang sebesar  $0.075d/L_U$  sebagai turbulator. Namun penelitian-penelitian tersebut tidak menjelaskan mengenai pengaruh dari bentuk *leading edge* terhadap separasi *bubble* dan juga pengaruhnya terhadap titik separasi karena penelitian dilakukan pada plat datar.

**Lamballais et al [5]** melakukan penelitian secara 2 dimensi dan 3 dimensi dengan menggunakan *direct numerical simulation (DNS)*. Benda uji yang diujikan memiliki ukuran  $L_x \times L_y \times L_z = 20.25H \times 16H \times 6H$  dengan variasi kelengkungan pada *leading edge* ( $\eta$ ) sebesar 0.125, 0.25, 0.5, 1 dan bilangan Reynolds sebesar 2000. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin



besar lengkungan pada *leading edge* maka *separation bubble* yang terbentuk akan semakin pendek dan ketebalannya semakin menurun. Profil kecepatan yang didapatkan menunjukkan bahwa semakin kecil kelengkungan pada *leading edge*, maka *backflow* yang terjadi akan semakin meningkat. Pada  $\eta=1$  menuju ke  $\eta=0.125$  *backflow* meningkat sebesar +65 %. Namun penelitian tersebut tidak bisa menjelaskan bagaimana pengaruh dari berbagai ukuran *separation bubble* tersebut terhadap penundaan separasi.

Kesempatan terjadinya *reattachment* pada suatu aliran akan dipengaruhi oleh *entrainment energy* dari *primary flow* dan adanya kesempatan bagi aliran untuk melekat kembali berupa bidang tumpu aliran yang cukup panjang. Panjang aksial sebagai bidang tumpu aliran yang dimaksud adalah jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang aliran. Pengaruh dari *dynamic force* yang diwakili oleh bilangan Reynolds, bentuk dari *leading edge*, serta panjang dari bidang tumpu aliran belum banyak diteliti sebelumnya. Dengan memperpanjang jarak bidang tumpu aliran diduga akan semakin memudahkan aliran untuk *reattachment* setelah aliran terseparasi saat melewati *leading edge* dan menunda separasi pada daerah *downstream*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Panjang dan tebal dari *separation bubble* yang terbentuk akan bergantung pada kapan aliran mengalami *reattachment*. Kesempatan terjadinya *reattachment* pada suatu aliran akan dipengaruhi oleh *entrainment energy* dari *primary flow* dan adanya kesempatan bagi aliran untuk melekat kembali berupa bidang tumpu aliran yang cukup panjang.

Jika energi yang diberikan oleh *primary flow* terlalu sedikit, maka aliran tidak akan mengalami *reattachment*. Sebaliknya jika energi yang diberikan terlalu besar, aliran dapat terseparasi lebih jauh dari dinding. Sehingga diperlukan kombinasi antara bilangan Reynolds dan bentuk *leading edge* tertentu agar aliran dapat kembali *attach* pada dinding.

Pengaruh dari *dynamic force* yang diwakili oleh bilangan Reynolds, bentuk dari *leading edge*, serta panjang dari jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang belum banyak diteliti sebelumnya. Sehingga perlu dilakukan penelitian yang mengamati kombinasi ketiganya. Karena dengan memperpanjang jarak antara dua titik potensi separasi depan dan belakang, diduga akan semakin memudahkan aliran untuk *reattachment* setelah aliran terseparasi saat melewati *leading edge* dan menunda separasi pada daerah *downstream*.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian pengaruh ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik *separation bubble* dari aliran melintasi *body* yang berupa koefisien tekanan ( $C_p$ ) hasil dari eksperimen dan simulasi numerik, serta visualisasi aliran berupa kontur tekanan, kecepatan dan pathlines.
2. Mengetahui pengaruh dari panjang bidang tumpu aliran yang terkolerasi dengan *leading edge* tertentu dan bilangan Reynolds tertentu terhadap panjang dan tebal *separation bubble*, serta pengaruhnya terhadap separasi masif di buritan.

### 1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian ini menggunakan *body* dengan bentuk *leading edge rounded* 0.01 m dengan panjang *chord* 0.65 m dan 1 m.
2. Penelitian dilakukan secara dua dimensi melalui pengukuran di *midspan*.
3. Fluida kerja yang digunakan adalah udara, dengan sifat aliran *steady flow*, *viscous* dan *uniform* di inlet *wind tunnel*.
4. Tidak terjadi perpindahan panas.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya percobaan ini diharapkan membawa manfaat yaitu:

1. Memberi pengetahuan mengenai pengaruh panjang bidang tumpu aliran yang terkolerasi dengan *Reynolds number* tertentu pada *leading edge* tertentu, baik secara eksperimen maupun simulasi numerik.
2. Memberi pengetahuan mengenai fenomena aliran secara kualitatif dan kuantitatif akibat *bubble separation*, serta pengaruhnya terhadap penundaan separasi di buritan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini terdiri dari lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

### BAB I. PENDAHULUAN

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

### BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

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

### BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan informasi konfigurasi uji, skema penelitian, permodelan, langkah-langkah pengujian yang disertai dengan *flow chart* baik untuk metode eksperimen maupun simulasi 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 teor-teori yang ada dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

## BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

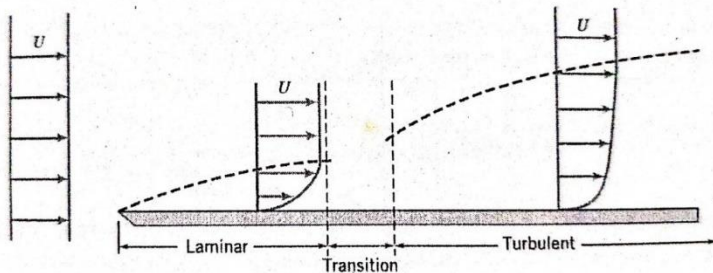
Pada bagian ini diuraikan kesimpulan yang dapat diambil yaitu merupakan jawaban dari hipotesa yang diangkat serta berisikan beberapa saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Dasar Teori

#### 2.1.1 Boundary Layer

*Boundary layer* adalah suatu daerah yang berupa lapisan tipis pada dinding yang dialiri fluida dimana di dalam daerah tersebut aliran fluida akan mengalami pengaruh dari tegangan geser.



**Gambar 2.1** *boundary layer* pada plat datar, Fox [6]

Ketika suatu fluida yang mengalir *uniform* mendapat tegangan geser dari dinding maka akan terbentuk *boundary layer*. Daerah di dalam *boundary layer* disebut dengan daerah *viscous*, sedangkan daerah di luar *boundary layer* disebut dengan daerah *inviscid* dimana kedua daerah tersebut dibatasi oleh *boundary layer edge*. Di dalam *boundary layer*, aliran fluida akan dipengaruhi oleh tegangan geser dan energinya akan digunakan untuk melawan tegangan geser tersebut.

Boundary layer yang terbentuk pertama kali adalah *laminar boundary layer*, sehingga akan terbentuk profil kecepatan seperti gambar 2.1. *Laminar boundary layer* memiliki karakteristik dimana partikel-partikel alirannya bergerak sejajar dengan streamline aliran. Setelah panjang tertentu, *boundary layer* akan semakin berkembang dan berubah menjadi *turbulent boundary layer*. *Turbulent boundary layer* memiliki karakteristik dimana pergerakan partikel alirannya bersifat acak di antara streamlinenya. Pergerakan acak dari partikel aliran tersebut menyebabkan

adanya tumbukkan antar partikel dan memungkinkan terjadinya pertukaran momentum sehingga energi dalam aliran tersebut meningkat. Hal ini yang menyebabkan profil kecepatan aliran turbulen lebih tebal dan lebih kuat untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure*, **Anderson** [7].

### 2.1.2 Shape Factor

*Shape factor* ( $H$ ) merupakan bilangan tak berdimensi yang dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu aliran dikatakan laminar atau turbulen. *Shape factor* didapatkan dengan membandingkan nilai dari *displacement thickness* dengan *momentum thickness*. *Displacement thickness* merupakan ukuran dari defisit massa alir di dalam suatu *boundary layer*. Sedangkan *momentum thickness* merupakan ukuran dari defisit momentum aliran di dalam suatu *boundary layer*. Kedua bilangan tersebut dapat dilihat pada *eksternal flow*, dimana pengurangan dari massa alir dan momentum aliran dapat diamati pada profil kecepatannya, **Fox** [6].

*Displacement thickness* ( $\delta^*$ ) dan *momentum thickness* ( $\theta$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

$$\theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \delta \int_0^1 \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) d\left(\frac{y}{\delta}\right)$$

Dengan melakukan pendekatan integrasi numerik metode integrasi trapesium pada kedua persamaan tersebut, maka akan menjadi:

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

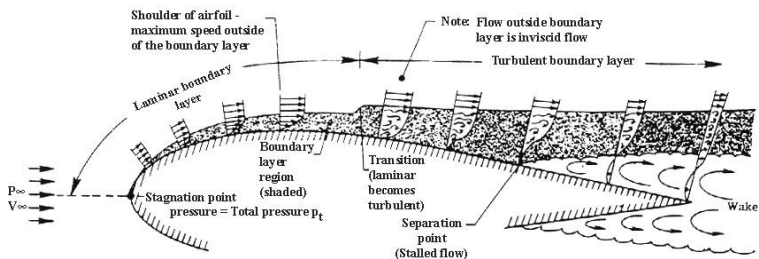
$$\theta = \delta \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{u}{U} \right)_i \left\{ 1 - \left( \frac{u}{U} \right)_i \Delta \left( \frac{y}{\delta} \right)_i \right\} \right]$$

Dengan

- $\delta^*$  : displacement thickness
- $\theta$  : momentum thickness
- $u$  : kecepatan lokal (m/s)
- $U$  : kecepatan maksimal (m/s)
- $\delta$  : tebal boundary layer

### 2.1.3 Flow Separation

Separasi terjadi karena aliran dibelokkan menjauhi permukaan akibit dari adanya *separation vortex*. Vortex tersebut terbentuk karena adanya *back flow* di dalam daerah *wake* yang disebabkan oleh *adverse pressure*. Fenomena ini terjadi pada *stream tube* yang meluas seperti pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2** boundary layer pada airfoil, Anderson [7]

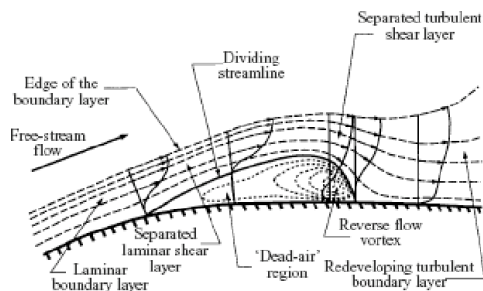
Jika fluida mengalir pada airfoil atau bidang penampang yang tidak datar, di suatu titik aliran tersebut akan mengalami separasi. *Adverse pressure* merupakan penyebab terjadinya separasi, dimana *adverse pressure* adalah tekanan balik akibit dari perluasan luas penampang aliran sehingga menyebabkan tekanan pada sisi *downstream* aliran yang lebih tinggi dari pada tekanan pada sisi *upstream*. Karena fluida mengalir dari daerah yang bertekanan tinggi ke tekanan yang lebih rendah, maka akan terjadi tekanan balik yang arahnya berlawanan dari arah datangnya aliran. Fenomena ini terjadi pada aliran yang streamline alirannya

menjauhi dinding (*divergent*). Separasi terjadi pada saat momentum yang dimiliki aliran sudah tidak lagi mampu melawan tegangan geser permukaan dinding dan tekanan balik. Fenomena tersebut disebut dengan *massive flow separation* dimana aliran tidak memiliki kesempatan untuk kembali melekat lagi pada dinding.

Aliran yang terseparasi tersebut dapat kembali melekat lagi jika aliran tersebut memiliki bidang penumpu aliran yang cukup panjang dan diberi energi yang cukup dari aliran bebas (*free stream*) yang disinggungnya, fenomena ini disebut dengan *reattachment*. Energi yang dibawa oleh *free stream* bergantung pada bilangan Reynolds-nya. Sehingga jika aliran bebas tersebut memiliki bilangan Reynolds yang kurang, maka aliran yang terseparasi tidak akan mengalami *reattachment*. Dan sebaliknya jika bilangan Reynolds aliran tersebut terlalu besar, aliran tersebut justru akan dibelokkan lebih jauh lagi sehingga tidak terjadi *reattachment*, Fox [6].

#### 2.1.4 Bubble Separation

Suatu aliran yang terseparasi memiliki kemungkinan untuk kembali melekat pada dinding lagi jika memiliki tambahan momentum dan bidang penumpu aliran yang cukup panjang. Fenomena dimana aliran terseparasi dan melekat kembali pada dinding *reattachment* akan menyebabkan terbentuknya *separation bubble*.



**Gambar 2.3** *separation bubble*, Pauley et al [8]



*Bubble separation* merupakan fenomena *reattachment* dimana suatu aliran yang terseparasi akan melekat kembali di permukaan. Aliran yang terseparasi akan berinteraksi dengan *free stream* di atasnya dan interaksi tersebut memungkinkan aliran untuk mendapat tambahan energi dari *free stream* untuk meningkatkan momentum alirannya. Daerah di dalam *separation bubble*, merupakan daerah tertutup yang berisi *recirculating flow* yang pusatnya berada di bagian belakang *bubble*. Hal ini menyebabkan adanya osilasi tekanan yang kuat di belakang *separation bubble* dan tekanan kembali meningkat karena kecepatan partikelnya yang lambat di dalam *separation bubble*. Tambahan energi dari *free stream* dan kenaikan tekanan akibat osilasi vortex di dalam selubung tersebut memungkinkan memulihkan momentumnya untuk melawan tegangan geser dan tekanan balik. Dan pengaruh dari panjang bidang penumpu aliran juga berperan penting dalam terjadinya *reattachment*, karena jika bidang penumpu aliran terlalu pendek maka aliran tersebut tidak akan memiliki kesempatan untuk melekat kembali. Hal ini diakibatkan karena adanya *adverse pressure* yang terlalu dekat, **Fox [6]**.

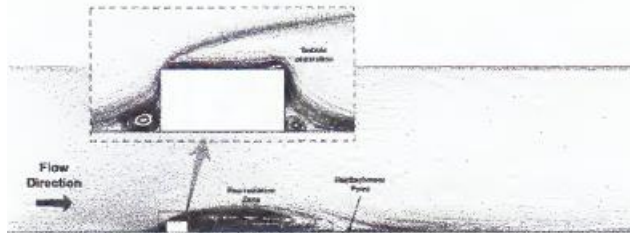
Aliran yang mengalami *reattachment* dapat dikategorikan sebagai aliran turbulen. Dengan terjadinya *reattachment* pada aliran tersebut, menunjukkan aliran tersebut telah memulihkan momentumnya untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure*. Dimana fenomena tersebut sangat dipengaruhi oleh besarnya bilangan Reynolds yang dibawa aliran dan adanya bidang penumpu aliran yang cukup panjang untuk menumpu aliran tersebut setelah terseparasi, **Hunt [9]**.

## 2.2 Penelitian Terdahulu

Seperti yang dibahas sebelumnya, aliran turbulen memiliki momentum aliran yang lebih kuat untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk mempercepat transisi boundary layer laminar menjadi turbulen. Salah satu metode untuk mempercepat transisi boundary

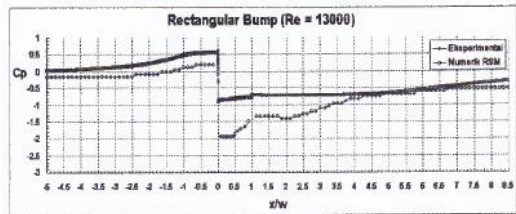
layer adalah dengan memanfaatkan *bubble separation* untuk membuat aliran bertransisi secara pintas karena aliran yang mengalami *reattachment* dapat dikategorikan sebagai aliran turbulen.

**Sutardi & Widodo [3]** mengamati *bubble separation* dengan melakukan eksperimen dan simulasi numerik pada plat datar yang diberikan penghalang berupa persegi melintang dan dialiri aliran dengan variasi bilangan Reynolds,  $Re = 1.3 \times 10^4$  dan pada  $Re = 2.1 \times 10^4$ . Persegi tersebut memiliki lebar 42 mm, tinggi 21 mm dan panjang 310 mm.

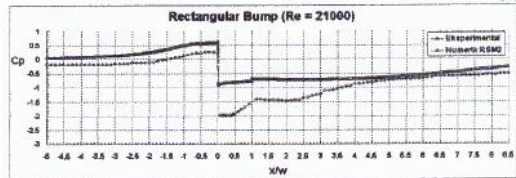


**Gambar 2.4** visualisasi aliran, **Sutardi & Widodo [3]**

Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut adalah data berupa grafik distribusi tekanan (grafik  $C_p$ ) dan profil kecepatan aliran. Terlihat dari gambar 2.5 bahwa aliran tersebut mengalami penurunan tekanan yang besar pada saat aliran menabrak bodi pengganggu (pada  $x/w=0$ ).



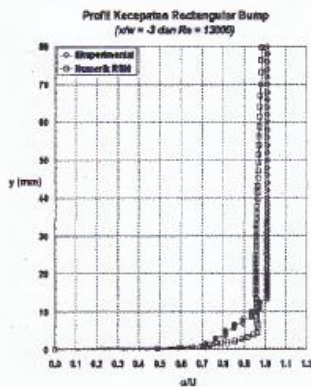
(a)



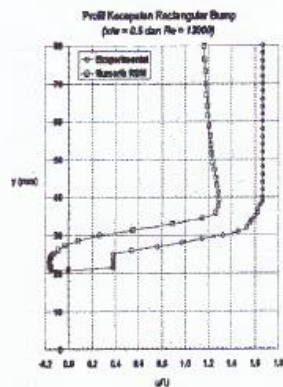
(b)

**Gambar 2.5** distribusi tekanan pada aliran dengan bilangan Reynolds  
(a)  $Re = 1.3 \times 10^4$ , (b)  $Re = 2.1 \times 10^4$ , **Sutardi & Widodo [3]**

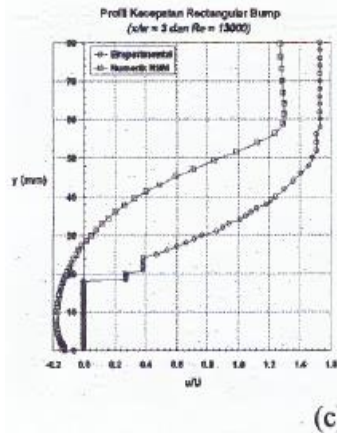
Dari grafik tersebut terlihat bahwa aliran dengan bilangan Reynolds yang lebih besar membutuhkan panjang lintasan yang lebih jauh untuk memulihkan tekanannya.



(a)



(b)



**Gambar 2.6** profil kecepatan aliran pada (a) $x/w=-3$ , (b) $x/w=0.5$ , (c) $x/w=3$  dengan  $Re = 1.3 \times 10^4$ , **Sutardi & Widodo [3]**

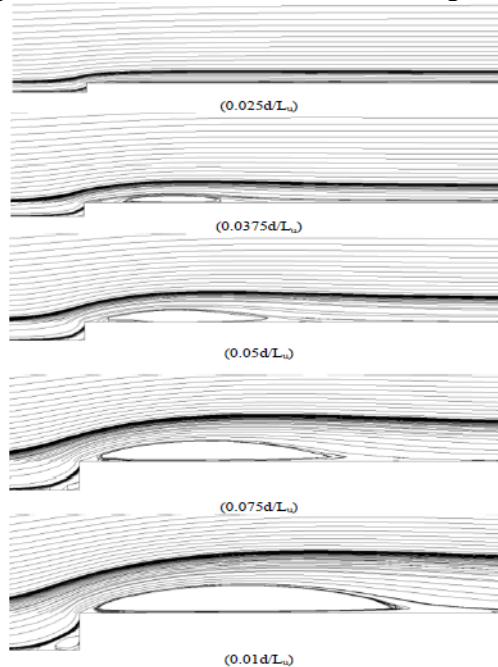
Pada gambar 2.6a dapat diamati perubahan profil kecepatan sebelum aliran menabrak bodi pengganggu. Adanya separasi masif yang terjadi pada sisi atas bodi pengganggu dan ditunjukkan dengan gambar 2.6b. Dan pada gambar 2.6c terlihat bahwa *reattachment* aliran masih belum terjadi pada  $x/w=3$ .

Kesimpulan dari penelitian ini adalah semakin mundurnya titik separasi dan semakin dekatnya titik *reattachment* seiring dengan bertambah besarnya nilai Reynolds. Visualisasi aliran juga menunjukkan kesesuaian dengan visualisasi numerik, yaitu terlihatnya fenomena separasi permanen akibat dari momentum aliran yang tidak lagi mampu melawan *adverse pressure* dan tegangan geser dari bodi pengganggu serta dilanjutkan dengan adanya fenomena *reattachment*.

**Sutrisno et al [4]** melakukan simulasi numerik mengenai pengaruh dari *disturbance* berupa *bluff rectangular* terhadap *free flow*. Penelitian ini dilakukan untuk mengamati fenomena separasi *bubble* terhadap ketebalan dari penghalang. Variasi yang diamati dalam penelitian ini adalah ketebalan dari *bluff rectangular*, yaitu ketebalan  $0.025d/L_U$ ,  $0.0375d/L_U$ ,  $0.05d/L_U$ ,  $0.075d/L_U$  dan  $0.075d/L_U$  pada  $Re = 10^3$ . Hasil yang didapatkan berupa kontur

kecepatan aliran, kontur intensitas turbulensi aliran, profil kecepatan aliran dan profil intensitas turbulensi aliran.

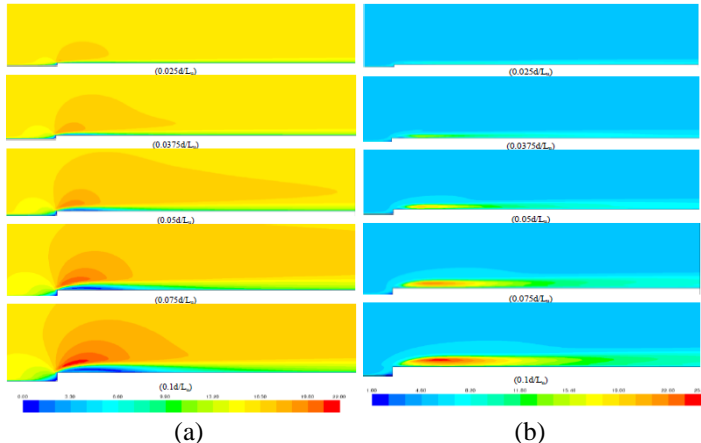
Dari gambar 2.7 menunjukkan bagaimana pengaruh dari ketebalan bodi terhadap separasi *bubble* yang terbentuk. Terlihat bahwa pada bilangan Reynolds yang sama, semakin tebal bodi maka semakin besar dan panjang juga separasi *bubble* yang terbentuk. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi bidangnya, aliran akan terhempas semakin tinggi juga dan membutuhkan energi yang lebih besar untuk melekat kembali lagi dengan bodi.



**Gambar 2.7** visualisasi aliran, **Sutrisno et al [4]**

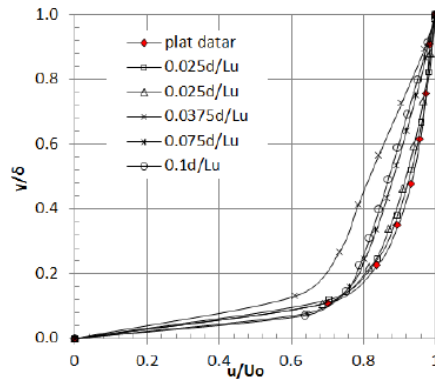
Kontur kecepatan aliran ditunjukkan pada gambar 2.8a dimana semakin tebal bodi maka percepatan yang dihasilkan juga akan semakin besar. Sedangkan kontur intensitas turbulensi aliran ditunjukkan pada gambar 2.8b dimana semakin tebal bodi maka semakin besar juga daerah peningkatan turbulensi yang dihasilkan.

Hal ini disebabkan karena semakin besarnya gangguan pada aliran. Daerah dengan intensitas turbulensi yang tinggi ini terjadi di dalam gelembung separasi dan akan menurun setelah terjadi *reattachment*.



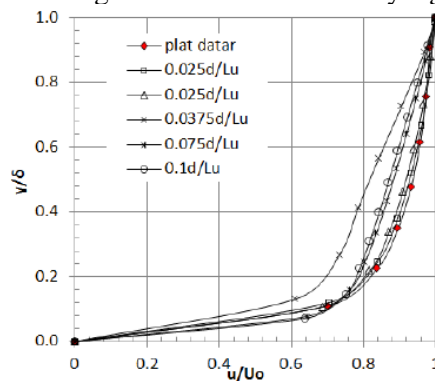
**Gambar 2.8** (a)kontur kecepatan aliran dan (b)kontur intensitas turbulensi aliran, **Sutrisno et al [4]**

Pada gambar 2.9 dapat diamati perbandingan profil kecepatan antara aliran yang mengalir pada *bluff rectangular* tertentu (ketebalan  $0.025d/L_U$ ,  $0.0375d/L_U$ ,  $0.05d/L_U$ ,  $0.075d/L_U$  dan  $0.075d/L_U$ ) pada  $x=4L_U$ . Pada ketebalan  $0.025d/L_U$ ,  $0.0375d/L_U$ , profil kecepatan yang terbentuk sangat berhimpit sehingga perubahan pada struktur aliran dapat dianggap cukup kecil dan ketiga profil kecepatan tersebut dapat dikatakan memiliki momentum aliran yang paling besar. Profil kecepatan pada ketebalan  $0.05d/L_U$  merupakan yang paling kecil, sehingga momentum yang dimiliki juga lebih kecil.



**Gambar 2.9** perbandingan profil kecepatan aliran, Sutrisno et al [4]

Intensitas turbulensi merupakan parameter yang menunjukkan adanya fluktuasi kecepatan di dalam aliran sehingga semua aliran yang melewati turbulator akan memiliki intensitas turbulensi yang tinggi. Pada gambar 2.10 terlihat bahwa pada ketebalan  $0.025d/L_U$  memiliki intensitas turbulensi yang paling rendah setelah plat datar. Aliran pada ketebalan  $0.05d/L_U$  merupakan aliran dengan intensitas turbulensi yang paling tinggi.

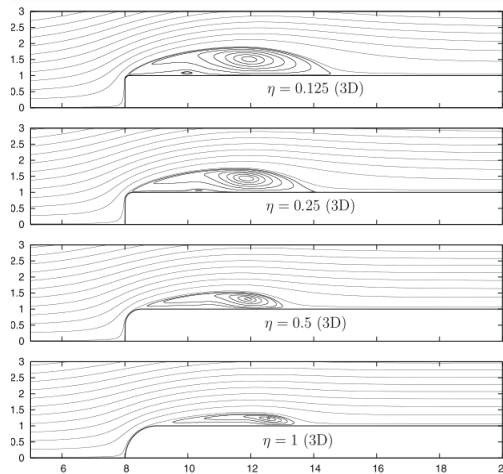


**Gambar 2.10** perbandingan intensitas turbulensi aliran, Sutrisno et al [4]

Hasil yang dapat disimpulkan adalah semakin kecil *shape factor*-nya maka hasilnya akan semakin bagus, sama halnya dengan hasil dari penelitian ini dimana nilai optimumnya

didapatkan pada ketebalan penghalang sebesar  $0.075d/L_U$  sebagai turbulator. Namun penelitian tersebut tidak mengamati pengaruh dari *bubble separation* terhadap separasi aliran karena penelitian tersebut dilakukan pada plat datar.

**Lamballais et al [5]** melakukan penelitian tentang *bubble separation* menggunakan metode numerik pada *thick half-plate* secara 2 dimensi dan 3 dimensi dengan menggunakan *direct numerical simulation (DNS)*. Benda uji tersebut memiliki ukuran  $L_x \times L_y \times L_z = 20.25H \times 16H \times 6H$ . Kelengkungan pada *leading edge* ( $\eta$ ) divariasikan menjadi 0.125, 0.25, 0.5, dan 1 dengan bilangan Reynolds sebesar 2000.



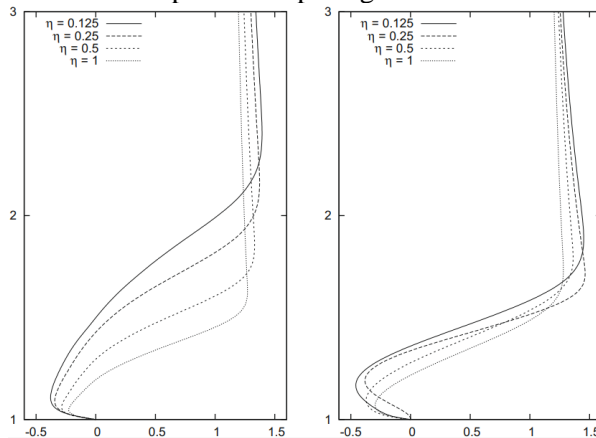
**Gambar 2.11** *separation bubble* pada simulasi 3D, **Lamballais et al [5]**

Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin besar lengkungan pada *leading edge* maka *separation bubble* yang terbentuk akan semakin pendek dan ketebalannya semakin menurun pada penelitian 3D dimensi. Perbandingan *bubble separation* yang terbentuk dapat dilihat pada gambar 2.10. Pada kelengkungan  $\eta=1$  juga terlihat pembentukan *separation bubble* yang tertunda.

Penelitian ini juga mengamati profil kecepatan pada daerah *separation bubble*. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa



semakin kecil kelengkungan pada *leading edge*, maka *backflow* yang terjadi akan semakin meningkat. Pada  $\eta=1$  menuju ke  $\eta=0.125$  *backflow* meningkat sebesar +65 %. Perbandingan profil kecepatan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.11.



**Gambar 2.12** profil kecepatan pada simulasi 3D, Lamballais et al [5]

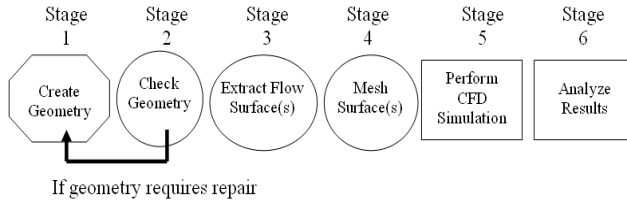
## 2.3 Numerical Modelling

### 2.3.1. Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Computational Fluid Dynamics (CFD)* adalah salah satu metode dalam rumpun ilmu mekanika fluida yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, momentum, perpindahan energi, dan fenomena aliran lainnya. CFD merupakan perangkat lunak menggunakan *finite volume method* yang membagi fluida menjadi volume kecil-kecil dan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes melalui *algoritma* tertentu. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter seperti kecepatan, tekanan, temperatur, dan *mass flow rate*.

Analisa menggunakan CFD juga memerlukan pemahaman dan pengetahuan dasar di bidang mekanika fluida untuk interpretasikan hasil-hasilnya. Proses simulasi dengan CFD terdiri dari tiga tahapan pengerjaan, yaitu *pre-processing* (menyusun geometri, *meshing* dan menentukan *boundary conditions*), *solver*

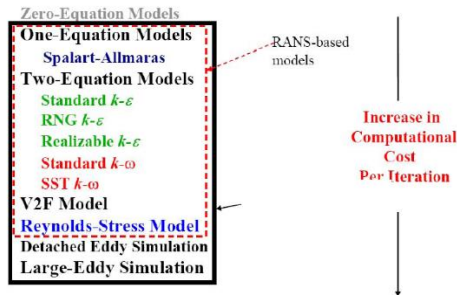
(diskretisasi persamaan, memasukkan properti fluida dan menentukan nilai *boundary conditions*) dan *post-processing* (menampilkan hasil simulasi, seperti grafik, kontur, dan vektor). Prosedur tersebut ditunjukkan pada diagram berikut.



**Gambar 2.13** blok diagram dari CFD, Versteeg dan Malalasekera, [10]

### 2.3.2. Model Turbulensi

Turbulensi terjadi jika dalam suatu aliran terdapat pusaran (*Eddy*), baik yang berukuran besar maupun kecil. Tiap ukuran pusaran tersebut memiliki karakteristiknya sendiri, sesuai dengan energi pusaran (kecepatan rotasi / *turbulent velocity scale*) yang dimiliki.



**Gambar 2.14** pendekatan *turbulence modelling*, Versteeg dan Malalasekera, [10]

Model turbulensi diklasifikasikan berdasarkan cara pemodelan *Large Eddies* dan *Small Eddies* dalam aliran tersebut. Secara umum pemodelan turbulensi dapat dibagi atas 3 macam,

yaitu *Direct Numeric Simulation*, *Large Eddy Simulation* dan *Reynolds Averaged Navier-Stokes*.

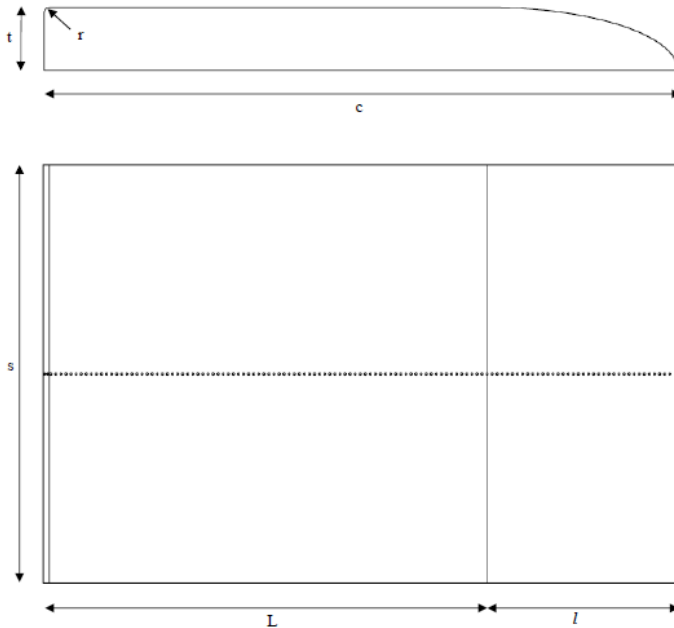
- ***Spalart-Allmaras*** : merupakan model turbulensi dengan satu persamaan untuk menyelesaikan persamaan *transport* aliran dengan viskositas turbulen. Model ini hanya efektif pada bilangan *Reynolds* kecil dan hasil simulasinya relatif kasar.
- ***Standard k-ε*** : pemodelan ini menggunakan dua persamaan *transport* untuk menyelesaikan modelnya. Model ini cocok untuk aliran yang mengalami *heating*, *buoyancy* dan *compressibility*, namun tidak cocok untuk fenomena aliran yang kompleks seperti separasi.
- ***RNG k-ε*** : variasi pemodelan dari model *Standard k-ε*, yang mana dapat menyelesaikan model yang mempunyai *highly strained flows* dan cocok untuk aliran yang memiliki bilangan *Reynolds* rendah yang mempunyai efek *swirling*.
- ***Realizable k-ε*** : variasi pemodelan dari model *Standard k-ε*, yang mana dapat digunakan untuk menentang penggunaan *mathematical constrains*.
- ***Standard k-ω*** : pemodelan ini menggunakan dua persamaan *transport model* untuk menyelesaikan *k-ω*. Model ini cocok untuk aliran dengan bilangan *Reynolds* kecil dan dapat menampilkan transisi aliran dari laminar menjadi turbulen.
- ***Shear-Stress Transport (SST) k-ω*** : variasi dari model *Standard k-ω*, yang mana digunakan untuk meningkatkan akurasi model *k-ω* di dekat dinding untuk aliran eksternal dengan mengombinasikannya dengan model *k-ε*. Model *SST k-ω* cocok untuk mensimulasikan aliran yang mengalami *adverse pressure gradient*.
- ***Reynolds Stress Model (RSM)*** : pemodelan ini menggunakan lima persamaan *transport* untuk menyelesaikan tegangan *Reynolds* menggunakan persamaan laju disipasi. Model ini mendekati persamaan *Reynolds Averaged Navier Stokes* sehingga cocok untuk mensimulasikan perubahan tiba-tiba pada aliran.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Konfigurasi Uji

Sesuai dengan tujuan penelitian, maka dilakukan pengujian melalui eksperimen dan simulasi 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 *bluff body* dengan *leading edge* berupa *rounded* dengan jari-jari tertentu dan *trailing edge* yang berupa oval dengan parameter sebagai berikut.



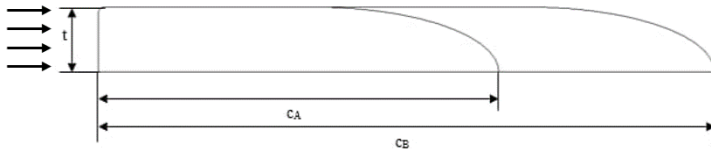
**Gambar 3.1** parameter pengukuran

Dengan;

- $r$  : jari- jari *leading edge*
- $L$  : panjang bidang tumpu aliran
- $l$  : panjang *trailing edge*

- c : panjang *chord*  
 s : panjang *span*/lebar *body*  
 t : tebal *body*

Model uji tersebut memiliki ketebalan 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  $Re_t = 6.76 \times 10^4$  dan  $Re_t = 10.15 \times 10^4$ . Sehingga penelitian ini memiliki konfigurasi uji sebagai berikut.



**Gambar 3.2** konfigurasi uji

Konfigurasi	c/t	Re
<b>A</b>	6.5	$6.76 \times 10^4$
<b>B</b>	6.5	$10.15 \times 10^4$
<b>C</b>	10	$6.76 \times 10^4$
<b>D</b>	10	$10.15 \times 10^4$

**Tabel 3.1** konfigurasi uji

### 3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui variabel-variabel apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati *bluff body* dengan bentuk *leading edge*, panjang bidang tumpu aliran dan bilangan Reynolds tertentu. Metode analisa yang digunakan adalah *Buckingham theorem*. Dari analisa dimensi yang

dilakukan dengan metode tersebut, untuk *pressure coefficient* didapatkan 5 grup tak berdimensi:

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

$$X_2 = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$

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

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

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

Dengan grup tak berdimensi tersebut adalah sebagai berikut:

$X_1 =$  *coefficient of pressure*

$X_2 =$  bilangan Reynolds

$X_3 =$  rasio *rounded leading edge* terhadap tebal *body*

$X_4 =$  rasio panjang bidang tumpu aliran terhadap tebal *body*

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

Hubungan antara grup tak berdimensi tersebut adalah sebagai berikut:

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

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

Pada penelitian ini,  $\frac{r}{t}$  dan  $\frac{l}{t}$  sebagai variabel tetap, sedangkan  $\frac{\mu}{\rho V t}$  dan  $\frac{L}{t}$  divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *pressure coefficient* pada *bluff body* yang diujikan. Sehingga:

$$\frac{\Delta p}{\rho V^2} = f_2\left(\frac{\rho V D_h}{\mu}, \frac{L}{t}\right)$$

Dalam hal ini, panjang karakteristik yang digunakan merupakan ketebalan dari *bluff body* untuk menentukan bilangan Reynolds sesuai dengan kecepatan aliran di dalam *wind tunnel*, maka:

$$\frac{\Delta p}{\rho V^2} = f_2\left(\frac{\rho V t}{\mu}, \frac{L}{t}\right)$$

Dengan kata lain:

$$C_p = f_2\left(Re_t, \frac{L}{t}\right)$$

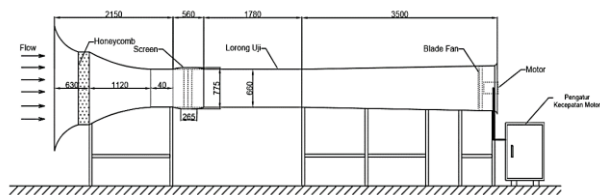
### 3.3 Metode Eksperimen

#### 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 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.



**Gambar 3.3** Skema *wind tunnel* yang digunakan

##### 2. *Wall Pressure Tap*

Sebanyak 127 *Wall pressure tap* digunakan untuk mengukur tekanan statis aliran fluida yang dipasang pada permukaan benda uji seperti pada gambar 3.1. 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.

##### 3. *Pitot Static Tube*

Alat ini berfungsi untuk mengukur besar tekanan statis dan tekanan stagnasi aliran fluida di tengah saluran uji yang kemudian dengan persamaan bernoulli dapat dihitung harga tekanan dinamisnya untuk kemudian mengukur harga kecepatan *free stream*.



#### 4. *Pressure Transducer*

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

#### 5. Data Akuisisi

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

#### 6. Manometer

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

#### 7. *Thermometer*

*Thermometer* digunakan untuk mengukur temperatur fluida kerja untuk menentukan propertinya.

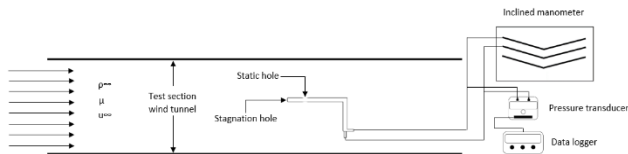
### 3.3.2. Pengambilan Data Eksperimen

#### 3.3.2.1. Proses Validasi Pengukuran *Pressure Transducer* dan Manometer

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

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

- bercabang inilah yang menghubungkan *pitot static tube* ke manometer dan *pressure transducer*.
- Mengukur temperatur kerja ruangan dan mencatatnya dalam tabel perhitungan untuk menentukan *properties* udara.
  - Membaca nilai awal ketinggian *red oil* manometer dan nilai awal *pressure transducer*.
  - Menghidupkan *fan wind tunnel* pada frekuensi 4 Hz dengan waktu tunggu 120 detik.
  - Membaca  $\Delta h$  yang terukur pada manometer dan mencatatnya dalam tabel perhitungan.
  - Membaca *output pressure transducer* yang sudah diambil nilai rata-rata dari 22 kali pengambilan data pada satu titiknya melalui data akuisisi. Data yang terbaca berupa nilai tegangan dalam satuan *volt (V)* yang kemudian dicatat dalam tabel perhitungan.
  - Mengubah putaran *fan wind tunnel* dengan kenaikan 4 Hz tanpa mematikan *fan wind tunnel*.
  - Mengulangi langkah pada poin f sampai i hingga frekuensi 48 Hz.
  - Data  $\Delta h$  dari manometer diproses dalam perhitungan sampai menghasilkan data tekanan dan kecepatan kemudian diplot dengan data tegangan listrik dari data akuisisi kedalam bentuk grafik untuk mengetahui persamaannya.

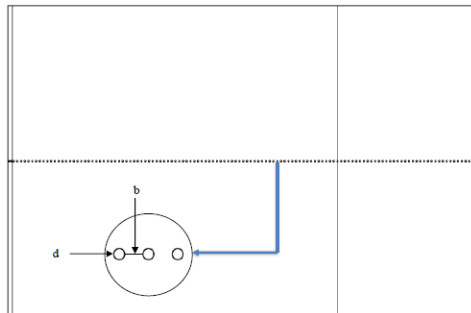


**Gambar 3.4** Skema validasi manometer *value* terhadap nilai keluaran *pressure transducer (V)* data validasi

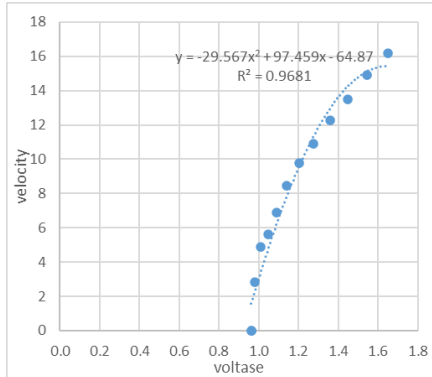
### 3.3.2.2. Pengukuran Tekanan Statis

Prosedur yang digunakan pada eksperimen ini adalah sebagai berikut:

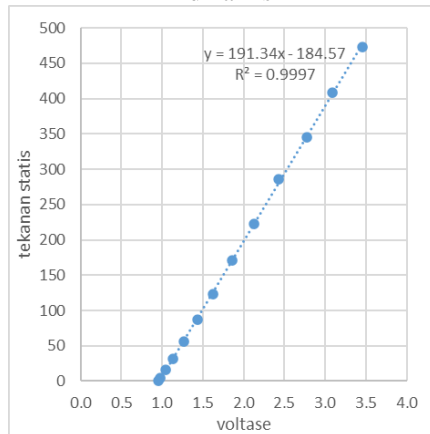
- a. Memasang benda uji ( $c=650$  mm) dan memastikan *wall pressure tap* terpasang pada lubang sepanjang *midspan* benda uji dengan jumlah dan jarak yang telah ditentukan.
- b. Memastikan selang kapiler telah terpasang dan telah diberi penamaan dengan baik pada masing-masing *wall pressure tap*.
- c. 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.



**Gambar 3.5** *wall pressure tap* pada benda uji



**Gambar 3.6** grafik kalibrasi  $\Delta h$  manometer (mm) terhadap tegangan *pressure transducer* (v) pada pengukuran tekanan dinamis



**Gambar 3.7** grafik kalibrasi  $\Delta h$  manometer (mm) terhadap tegangan *pressure transducer* (v) pada pengukuran tekanan statis

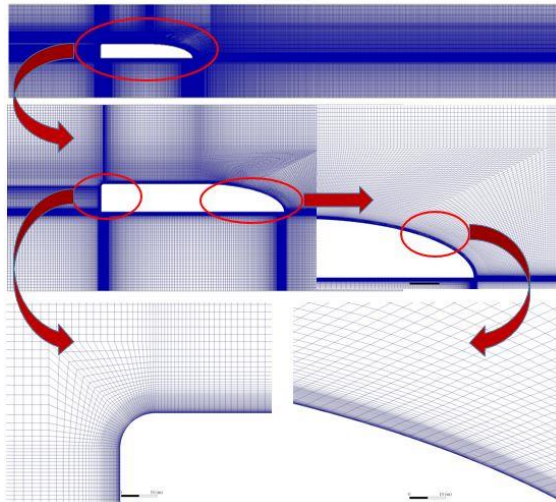
### 3.4 Metode Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan *software ANSYS (Fluent)* dan dalam penelitian ini digunakan model uji 2 dimensi. Pemodelan yang digunakan adalah *viscous* turbulen  $k-k\epsilon$

$\omega$  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 3.6.



**Gambar 3.8** Model *meshing body* ( $L = 650$  mm)

### 3.4.2 Grid Independence

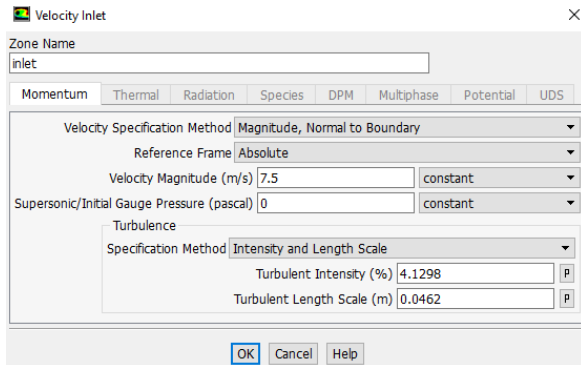
*Grid independence* merupakan indikator yang menunjukkan bahwa jumlah *grid points* tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap hasil dari metode numerik. Pada benda uji dengan  $c/t=6.5$  dibuat *mesh* dengan jumlah elemen (*cells*) 167784 dan diambil data  $C_p$  di salah satu titiknya. Selanjutnya *mesh* diperbanyak menjadi dua kali lipatnya dan diambil data  $C_p$  di titik yang sama untuk

dibandingkan. Jika hasil dari perbandingan tersebut tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan di antara keduanya (error relatif kecil, yaitu  $\leq 2\%$ ), maka penambahan jumlah *grid points* hanya ditambah beberapa saja.

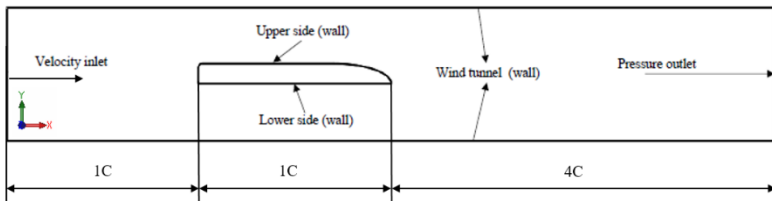
Selanjutnya jumlah *meshing* terpilih ditambahkan jumlah elemennya sebanyak  $\pm 10.000$  *mesh* untuk dibandingkan data  $C_p$  di titik yang sama. Hasil dari perbandingan tersebut tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan di antara keduanya, sehingga syarat *grid independence* sudah terpenuhi. Selanjutnya dilakukan prosedur yang sama untuk benda uji dengan  $c/t=10$ .

### 3.4.3 Boundary Condition

Merupakan penentuan parameter dan batasan pada aliran, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* serta kondisi pada *wall*. Kondisi batas *inlet* diberi sesuai dengan variasi kecepatannya, yaitu 12.5 m/s dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* berupa *pressure outlet*. Penentuan zona *boundary condition* diperlihatkan pada gambar berikut.



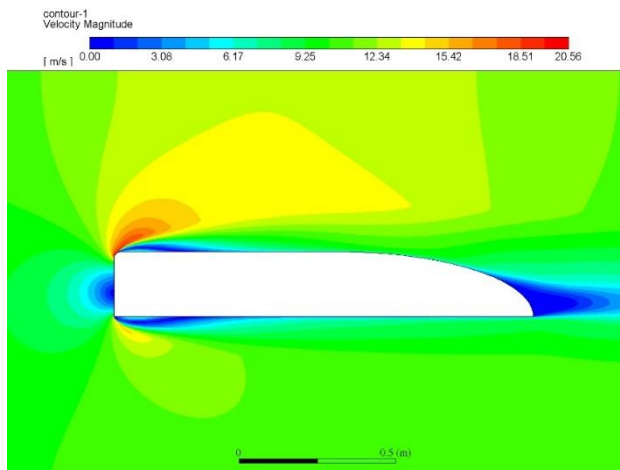
**Gambar 3.9** penentuan parameter dan batasan aliran



**Gambar 3.10** zona *boundary condition*

### 3.4.4 Post Processing

Merupakan tampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh, seperti tekanan statis yang selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung *pressure coefficient*, *velocity contour*, *pressure contour*, *velocity profile* dan *turbulent kinetic energy*.



**Gambar 3.11** Hasil *postprocessing*

Pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* dilakukan pada titik O yang selanjutnya akan digunakan untuk menghitung *shape factor* ( $H$ ) dengan pendekatan integrasi numerik metode integrasi trapesium.



**Gambar 3.12** skema posisi titik O

### 3.5 Jadwal Pelaksanaan

Jadwal pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.4 sebagai berikut.

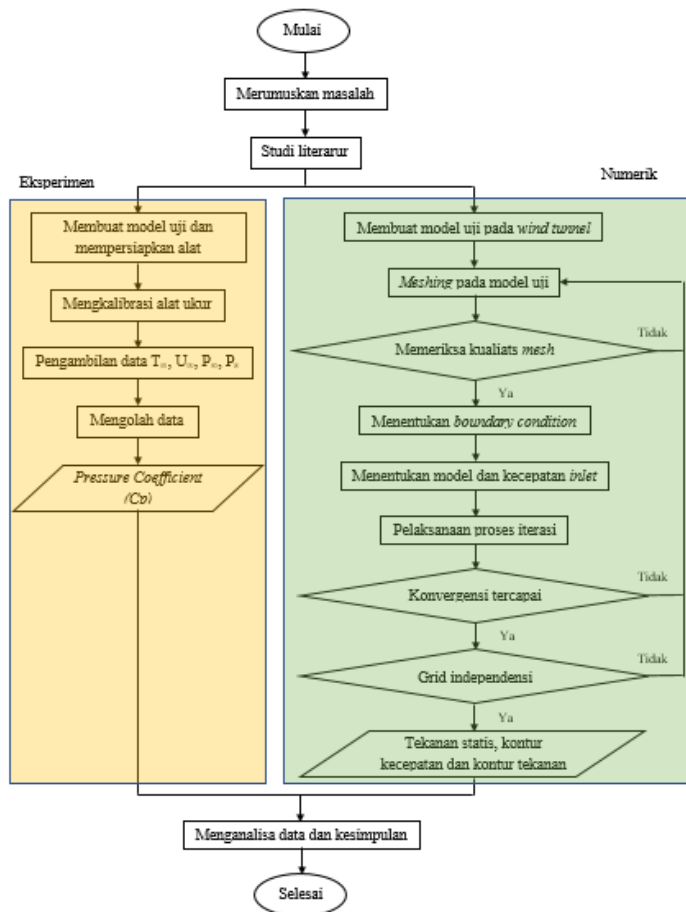
No	Kegiatan	Bulan																											
		Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli							
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1	Studi pustaka	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
2	Pelaksanaan simulasi numerik					■	■	■	■	■	■	■	■																
3	Persiapan 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 3.2** Jadwal pelaksanaan penelitian



### 3.6 Flowchart Penelitian

Berikut ini merupakan alur dari penelitian yang dilakukan.

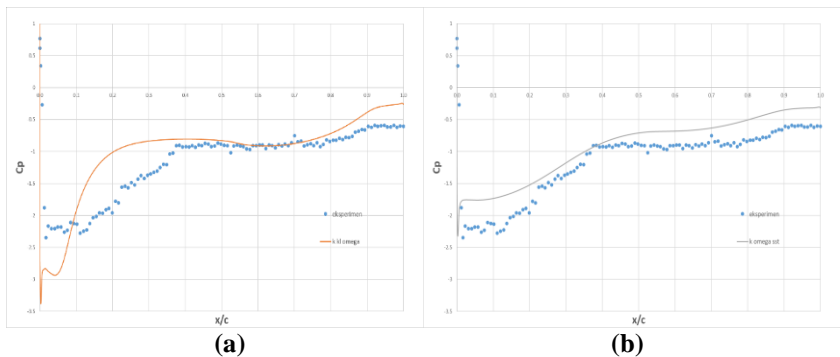


*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Validasi

Model numerik yang digunakan divalidasi dengan data hasil dari eksperimen penelitian. Hal ini diperlukan untuk menguji kapabilitas dari model numerik tertentu yang digunakan untuk menyimulasikan benda uji tersebut. Validasi yang dilakukan adalah membandingkan koefisien tekanan hasil dari simulasi numerik tersebut dengan model turbulen terhadap hasil eksperimen pada benda uji dengan  $c/t = 6.5$  dan  $Re_t = 5.08 \times 10^4$  seperti yang ditunjukkan pada grafik sebagai berikut.



**Gambar 4.1** grafik koefisien tekanan ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) validasi model numerik  $k-kl-\omega$  dengan data hasil eksperimen **(a)** dan validasi model numerik  $k-\omega$  SST dengan data hasil eksperimen **(b)**

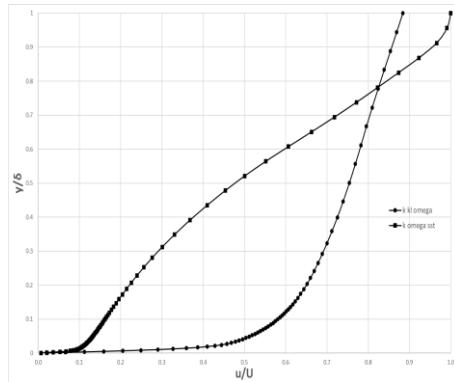
Model turbulen yang dipilih untuk simulasi numerik penelitian ini adalah  $k-kl-\omega$  dan  $k-\omega$  SST. Model turbulen  $k-kl-\omega$  dipilih karena dapat menyimulasikan transisi boundary layer aliran dari laminar ke turbulen, sedangkan model turbulen  $k-\omega$  SST dapat menyimulasikan dengan akurat fenomena aliran pada daerah di dekat dinding. Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan antara data koefisien tekanan hasil eksperimen dengan data hasil simulasi numerik dengan kedua metode tersebut. Terlihat bahwa data hasil eksperimen memiliki level yang lebih dekat dengan data dari hasil

metode turbulen  $k-\omega$  SST. Namun pada daerah *leading edge*, metode turbulen  $k-kl-\omega$  menunjukkan fenomena yang sama dengan data hasil eksperimen. Fenomena yang dimaksud adalah adanya proses separasi permanen yang gagal terjadi di daerah depan, ditunjukkan dengan adanya kenaikan grafik yang tajam yang dilanjutkan dengan adanya takikan kecil setelah melewati daerah *rounded*. Fenomena tersebut merupakan awal terbentuknya *separation bubble*, yang kemudian dilanjutkan dengan melandainya kenaikan nilai koefisien tekanan hingga terjadinya proses *reattachment*. Setelah melewati titik *reattachment*, kedua grafik tersebut memiliki kecenderungan yang sama seperti saat melewati plat datar hingga mengalami separasi permanen di buritan. Metode turbulen  $k-kl-\omega$  juga memiliki kemiripan yang cukup baik dengan hasil eksperimen setelah melewati titik *reattachment*.

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  $k-\omega$  SST yang menandakan adanya *back flow* pada daerah tersebut. Dimana seharusnya hanya terjadi jika pengambilan data tersebut dilakukan pada daerah *separation bubble*, sedangkan titik O berada di belakang titik *reattachment*.

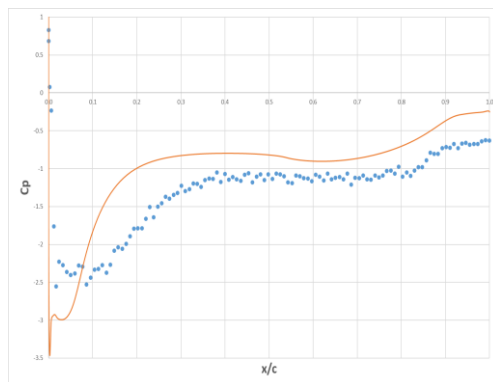


**Gambar 4.2** skema pengambilan data profil kecepatan

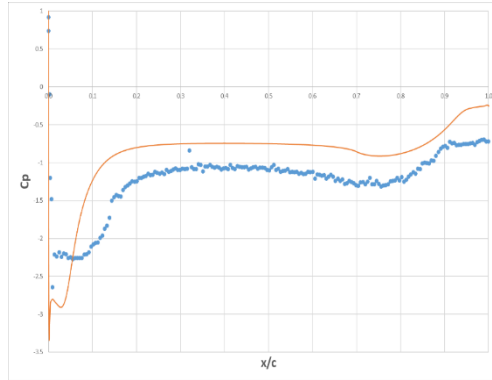


**Gambar 4.3** perbandingan profil kecepatan ( $c/t=6.5$  dan  $Re_c=6.76 \times 10^4$ ) pada titik O' dengan model numerik  $k-kl-\omega$  terhadap model numerik  $k-\omega SST$

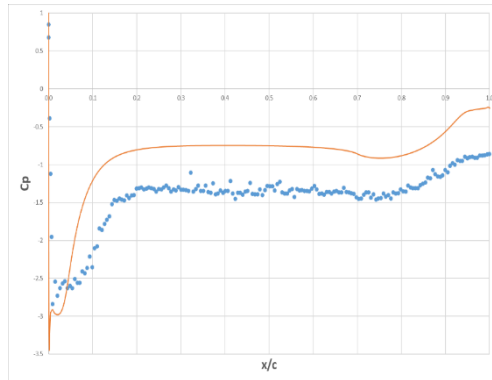
Berikut ini merupakan perbandingan antara data hasil eksperimen dengan data hasil simulasi numerik pada konfigurasi lainnya.



**Gambar 4.4** grafik koefisien tekanan ( $c/t=6.5$  dan  $Re_c=10.15 \times 10^4$ ) validasi model numerik  $k-kl-\omega$  dengan data hasil eksperimen



**Gambar 4.5** grafik koefisien tekanan ( $c/t=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) validasi model numerik  $k-k_l-\omega$  dengan data hasil eksperimen



**Gambar 4.6** grafik koefisien tekanan ( $c/t=10$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) validasi model numerik  $k-k_l-\omega$  dengan data hasil eksperimen

Walaupun memiliki perbedaan *level* yang cukup signifikan, model turbulen  $k-k_l-\omega$  dipilih menjadi model turbulen dalam penelitian ini. Ketidaksesuaian nilai koefisien tekanan di daerah *rounded* diakibatkan oleh sulitnya melakukan pengukuran eksperimen pada daerah tersebut dan tidak dilakukannya pengukuran pada *outlet wind tunnel* sebagai input pada simulasi numerik. Beberapa faktor yang mempengaruhi adalah kurangnya jumlah *wall pressure tap* dan *wall pressure tap* yang tidak tegak lurus terhadap garis singgung aliran pada daerah *rounded*.

## 4.2. Analisa Grid Independence

Analisa *grid independence* ini dilakukan dengan memvariasikan jumlah *meshing* benda uji dengan  $c/t=6.5$  dan  $c/t=10$  pada  $Re_c=6.76 \times 10^4$ . *Meshing* A merupakan yang paling renggang dan akan semakin bertambah rapat hingga *Meshing* E. *Meshing* A merupakan *meshing* pada  $c/t=6.5$  dengan jumlah *cell* 167784 dan 213304 pada  $c/t=10$ . Hingga *Meshing* E merupakan *meshing* pada  $c/t=6.5$  dengan jumlah *cell* 334452 dan 424248 pada  $c/t=10$ . Dari hasil simulasi, diperoleh nilai  $C_p$  seperti pada tabel 4.1 untuk  $c/t=6.5$  dan pada tabel 4.2 untuk  $c/t=10$ .

<i>Meshing</i>	Jumlah <i>cell</i>	$C_p$ 50%L	Error (%)	$Y^+$
A	167784	-0.90281	-	3.01
B	176584	-0.90290	0.011	3.01
C	186932	-0.90331	0.061	3.01
D	196986	-0.90522	0.29	3.01
E	334452	-0.90672	1.33	3.009

**Tabel 4.1** analisa *grid independence*  $C_p$  pada  $x=50\%C$  untuk  $c/t=6.5$

<i>Meshing</i>	Jumlah <i>cell</i>	$C_p$ 50%L	Error (%)	$Y^+$
A	213304	-1.10274	-	3.001
B	221664	-1.10292	0.024	3.001
C	231264	-1.10306	0.043	2.999
D	241384	-1.10317	0.057	2.999
E	424248	-1.11234	1.28	2.998

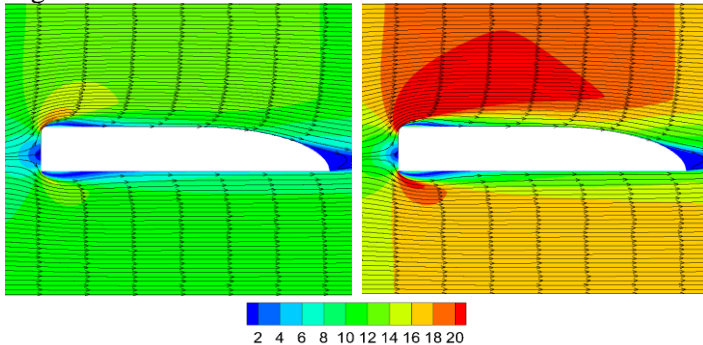
**Tabel 4.2** analisa *grid independence*  $C_p$  pada  $x=50\%C$  untuk  $c/t=10$

Dari kedua tabel tersebut dapat dilihat bahwa *meshing* A, B, C, dan D memiliki perubahan jumlah *cell* sebanyak  $\pm 10.000$  *cell*, sementara pada *meshing* E memiliki jumlah *cell* dua kali lipat dari *meshing* A. Berdasarkan data tersebut, nilai  $C_p$  pada semua jenis *meshing* tersebut memiliki error  $\leq 2\%$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa jumlah *cell* sudah tidak mempengaruhi nilai  $C_p$  secara signifikan sehingga tercapai *grid independence*.

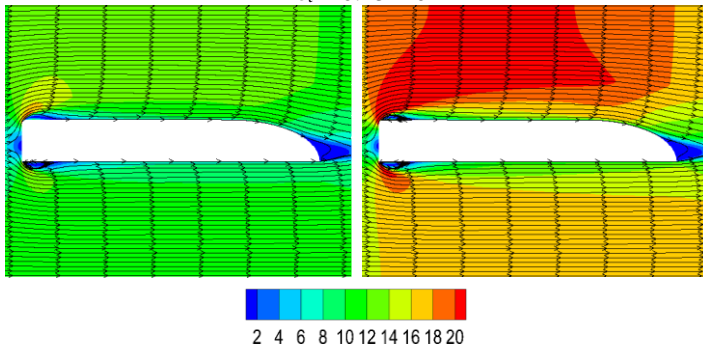
Selanjutnya digunakan *meshing* A untuk melakukan simulasi numerik dengan *software ANSYS (Fluent)*.

### 4.3. Gambaran Umum

Pengaruh dari panjang bidang tumpu aliran dan besarnya nilai Reynolds terhadap aliran yang melintasi benda uji penelitian ini dapat dijelaskan secara kualitatif dengan visualisasi aliran seperti pada gambar berikut.



**Gambar 4.7** visualisasi aliran ( $c/t=6.5$ ) pada  $Re_t=6.76 \times 10^4$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$



**Gambar 4.8** visualisasi aliran ( $c/t=10$ ) pada  $Re_t=6.76 \times 10^4$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$

Dari gambar tersebut dapat dilihat bagaimana perubahan besar kecepatan aliran yang melintasi benda dari perubahan warnanya dan fenomena-fenomena yang terjadi dari *streamline*-nya. Aliran



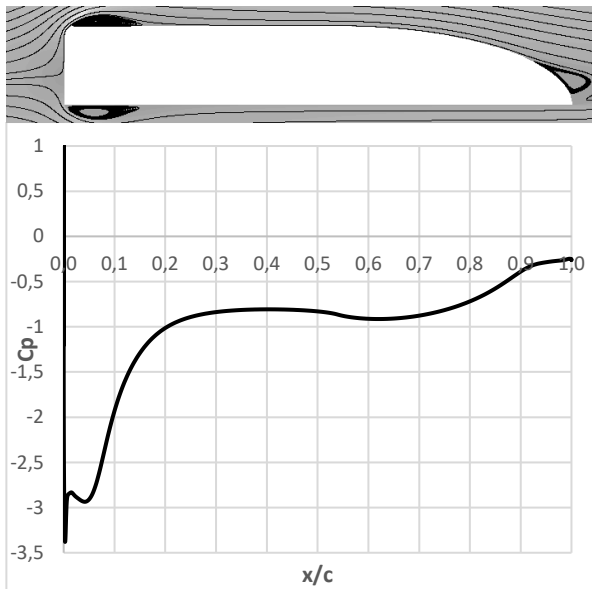
yang bergerak menuju benda uji akan mengalami tumbukkan pada titik stagnasi sehingga kecepatannya menjadi nol. Sedangkan aliran di atas titik stagnasi itu akan terhempas ke atas dan dituntun oleh *rounded* benda uji menuju ke bidang tumpu aliran (bidang datar). Pada saat aliran tersebut melewati daerah *rounded* ini, terjadi penyempitan *streamline* yang menyebabkan adanya akselerasi aliran. Karena adanya kesempatan berupa bidang tumpu aliran dan tambahan energi dari *primary flow*, aliran tersebut mengalami proses *reattachment* sehingga terbentuk *separation bubble*. Dimana di dalam *separation bubble* tersebut diisi dengan *recirculating flow* (*vortex*) yang ditandai dengan daerah berkecepatan rendah pada bagian depan benda uji setelah melewati *rounded*. Setelah itu, aliran tersebut memiliki kesempatan untuk relaksasi sepanjang bidang tumpu aliran hingga akhirnya mengalami separasi masif di daerah buritan.

Baik gambar 4.7 maupun gambar 4.8, keduanya menunjukkan bahwa hasil pengujian dengan bilangan Reynolds yang lebih besar ( $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) akan menghasilkan daerah *separation bubble* yang lebih kecil ( $Re_t=6.76 \times 10^4$ ). Atau dengan kata lain, pengujian dengan bilangan Reynolds yang lebih besar ( $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) akan mengalami *reattachment* lebih dulu dibandingkan dengan pengujian dengan bilangan Reynolds yang lebih kecil ( $Re_t=6.76 \times 10^4$ ). Hal ini menyebabkan daerah *wake* akibat separasi masif di daerah buritan menjadi lebih kecil pada pengujian dengan bilangan Reynolds yang lebih besar. Jika gambar 4.7 dan gambar 4.8 dibandingkan, akan terlihat bahwa pengujian dengan bidang tumpu aliran yang lebih panjang ( $c/t=10$ ) memiliki daerah *separation bubble* dan *wake* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pengujian dengan bidang tumpu aliran yang lebih pendek ( $c/t=6.5$ ). Fenomena ini dapat diteliti lebih lanjut dengan menganalisa karakteristik alirannya.

#### 4.4. Analisa Karakteristik Aliran

##### 4.4.1. Konfigurasi Uji A ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ )

Koefisien tekanan merupakan bilangan tanpa dimensi yang menggambarkan tekanan statis pada permukaan benda uji dengan *free stream*. Dimana pada penelitian ini, pengukuran hanya dilakukan pada sisi *upperside* di *midspan* benda uji sesuai dengan konfigurasi yang sudah ditentukan sebelumnya. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi A ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ).

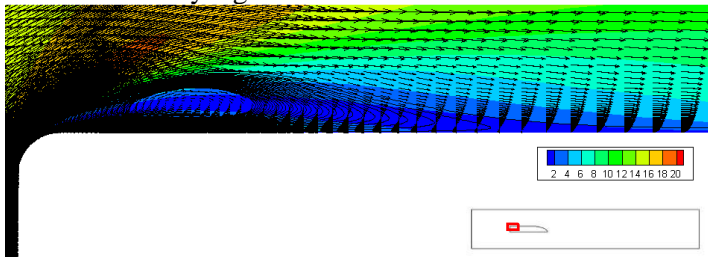


**Gambar 4.9** visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi A ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ )

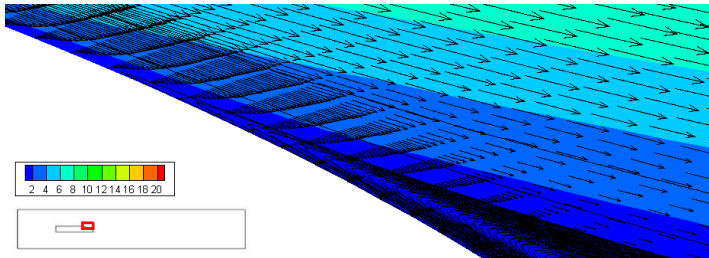
Grafik tersebut menunjukkan fenomena yang terjadi pada aliran secara kuantitatif, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnansi karena aliran mengalami percepatan akibat *streamline* yang menyempit di daerah *rounded*. Kemudian koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang menyebabkan aliran mengalir dari

tekanan rendah ke tekanan tinggi. Setelah melewati daerah *rounded*, aliran akan terhempas seperti mengalami separasi masif. Namun karena kesempatan adanya bagi aliran tersebut mengalami *reattachment*, terbentuklah *separation bubble* yang ditandai dengan adanya takikkan. *Separation bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar. Grafik tersebut menjadi relatif datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran, seakan-akan aliran tersebut mengalir pada plat datar. Hingga koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* yang diakhiri dengan kembali datar saat mengalami separasi masif di daerah buritan.

Dari grafik tersebut dan visualisasi aliran di atasnya, dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekanan terendah mencapai  $-3.375$ . Sedangkan *separation bubble* terbentuk dari  $x/c=0.021$  dengan nilai koefisien tekanan  $-2.866$  hingga terjadinya *reattachment* pada  $x/c=0.163$  dengan nilai koefisien tekanan  $-1.199$ . Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran mengalami separasi masif pada  $x/c=0.933$  dengan nilai koefisien tekanan  $-0.303$ . Dengan data-data tersebut, maka dapat diukur panjang relatif *separation bubble* yang terbentuk adalah  $0.142$ .



(a)



(b)

**Gambar 4.10** visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi A

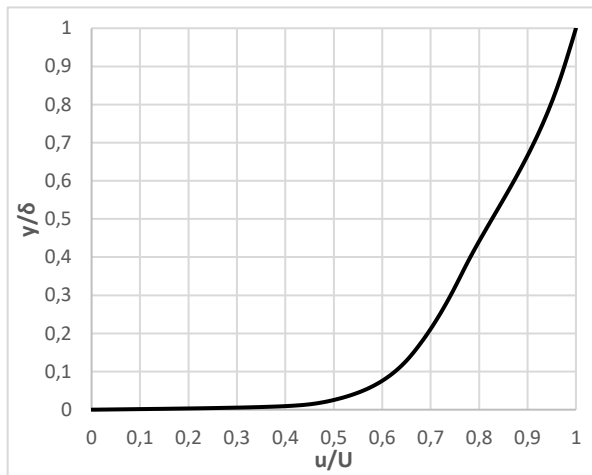
Gambar tersebut menunjukkan *separation bubble* yang terbentuk pada *leading edge* dan separasi masif yang terjadi di buritan. Terlihat bahwa vektor kecepatannya menunjukkan adanya *back flow* yang diikuti dengan turunnya kecepatan di daerah tersebut. Setelah aliran mendapatkan tambahan energi dari *primary flow*, terlihat bahwa aliran tersebut mulai pulih hingga kembali mengalami *reattachment*. Sedangkan pada daerah buritan, terlihat bahwa aliran perlahan-lahan mengalami *back flow* hingga akhirnya mengalami separasi masif. Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:

Konfigurasi	A
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.163
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.142
Titik separasi masif (x/c)	0.933
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	92.3
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	16.552
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	37.9

Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	256.45
--	--------

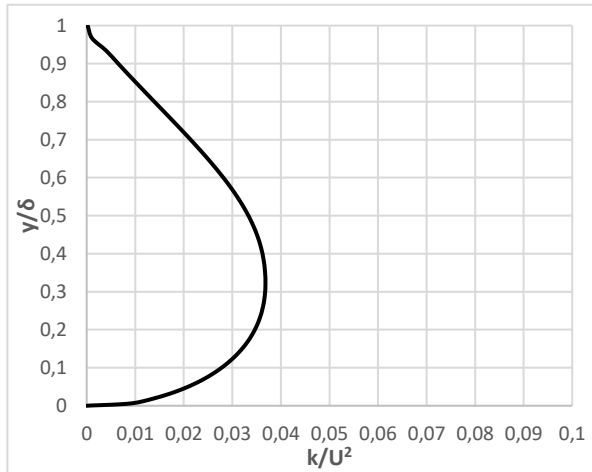
**Tabel 4.3** analisa karakteristik aliran konfigurasi A

Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik alian juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.11** profil kecepatan konfigurasi A pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji, yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. Dimana jika dilihat dari gambar 4.9, titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.



**Gambar 4.12** *turbulent kinetic energy* konfigurasi A pada titik O

Gambar 4.12 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.

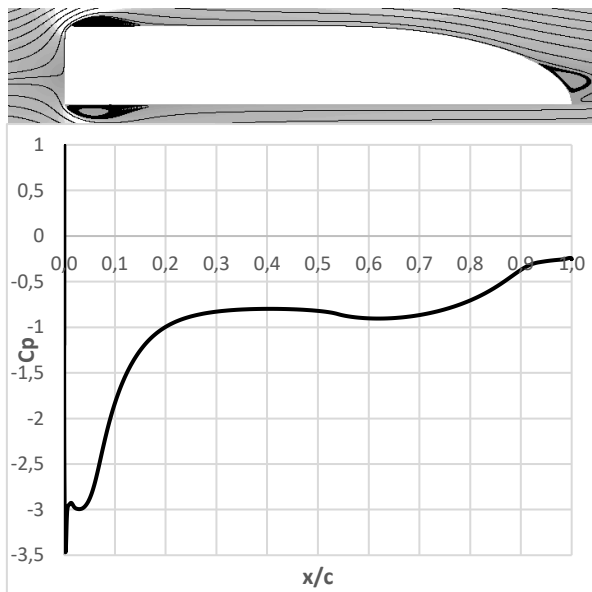
Dengan menggunakan metode integrasi numerik dari persamaan *momentum thickness* dan *displacement thickness* yang dilanjutkan dengan membandingkan kedua persamaan tersebut, akan menghasilkan *shape factor* (H) yang dapat digunakan untuk menentukan apakah aliran tersebut laminar atau turbulen. Didapatkan *shape factor* (H) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

Konfigurasi	A
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0124
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.0087
<i>Shape factor</i> (H)	1.4288

**Tabel 4.4** analisa *shape factor* aliran konfigurasi A

#### 4.4.2. Konfigurasi Uji B ( $c/t=6.5$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ )

Koefisien tekanan merupakan bilangan tanpa dimensi yang menggambarkan tekanan statis pada permukaan benda uji dengan *free stream*. Dimana pada penelitian ini, pengukuran hanya dilakukan pada sisi *upperside* di *midspan* benda uji sesuai dengan konfigurasi yang sudah ditentukan sebelumnya. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi B ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).

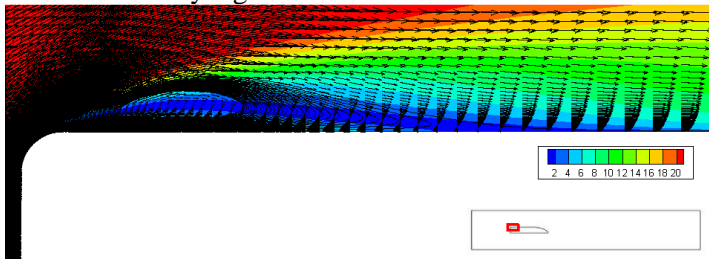


**Gambar 4.13** visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi B ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ )

Grafik 4.13 menunjukkan fenomena yang terjadi pada aliran secara kuantitatif, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnasi karena aliran mengalami percepatan akibat *streamline* yang menyempit di daerah *rounded*. Kemudian koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang menyebabkan aliran mengalir dari

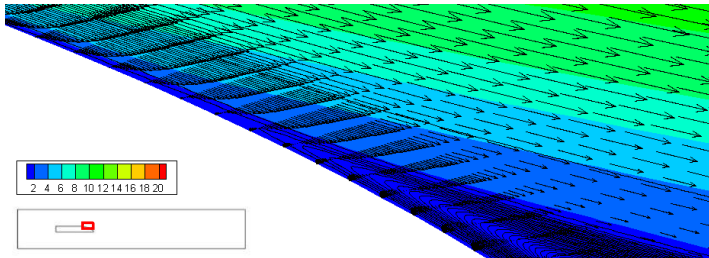
tekanan rendah ke tekanan tinggi. Setelah melewati daerah *rounded*, aliran akan terhempas seperti mengalami separasi masif. Namun karena adanya kesempatan bagi aliran tersebut mengalami *reattachment*, terbentuklah *separation bubble* yang ditandai dengan adanya takikkan. *Separation bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar. Grafik tersebut menjadi relatif datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran, seakan-akan aliran tersebut mengalir pada plat datar. Hingga koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* yang diakhiri dengan kembali datar saat mengalami separasi masif.

Dari grafik tersebut dan visualisasi aliran di atasnya, dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekanan terendah mencapai  $-3.462$ . Sedangkan *separation bubble* terbentuk dari  $x/c=0.021$  dengan nilai koefisien tekanan  $-2.980$  hingga terjadinya *reattachment* pada  $x/c=0.148$  dengan nilai koefisien tekanan  $-1.269$ . Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran mengalami separasi masif pada  $x/c=0.940$  dengan nilai koefisien tekanan  $-0.283$ . Dengan data-data tersebut, maka dapat diukur panjang relatif *separation bubble* yang terbentuk adalah  $0.127$ .



(a)





(b)

**Gambar 4.14** visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi B

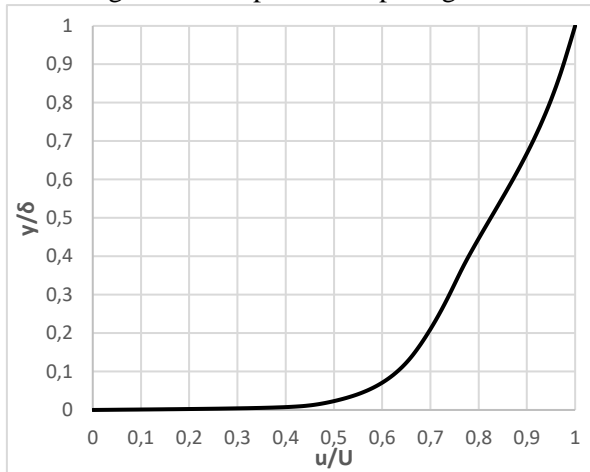
Gambar tersebut menunjukkan *separation bubble* yang terbentuk pada *leading edge* dan separasi masif yang terjadi di buritan. Terlihat bahwa vektor kecepatannya menunjukkan adanya *back flow* yang diikuti dengan turunnya kecepatan di daerah tersebut. Setelah aliran mendapatkan tambahan energi dari *primary flow*, terlihat bahwa aliran tersebut mulai pulih hingga kembali mengalami *reattachment*. Sedangkan pada daerah buritan, terlihat bahwa aliran perlahan-lahan mengalami *back flow* hingga akhirnya mengalami separasi masif. Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:

Konfigurasi	B
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.148
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.127
Titik separasi masif (x/c)	0.940
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	82.55
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	14.483
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	29.5

Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	261
--	-----

**Tabel 4.5** analisa karakteristik aliran konfigurasi B

Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik aliran juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar berikut.

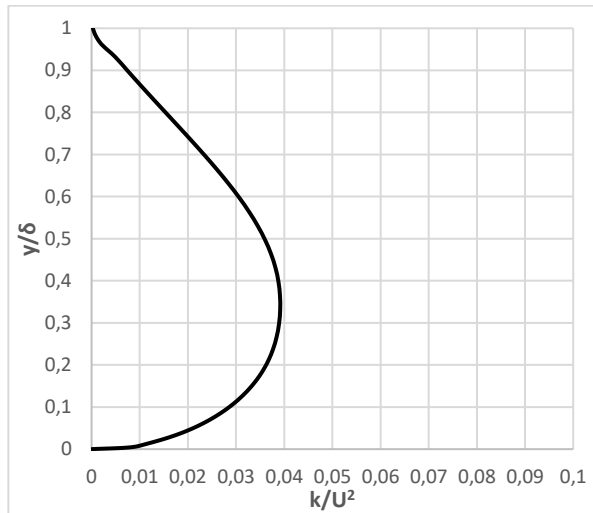


**Gambar 4.15** profil kecepatan konfigurasi B pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji, yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. Dimana jika dilihat dari gambar 4.13, titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.

Gambar 4.16 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan

*adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.



**Gambar 4.16** *turbulent kinetic energy* konfigurasi B pada titik O

Dengan menggunakan metode 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 laminar atau turbulen. Didapatkan *shape factor* (H) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

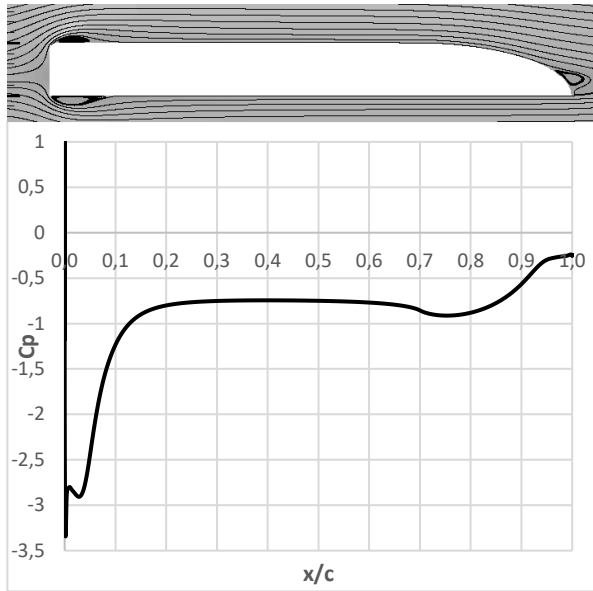
Konfigurasi	B
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0119
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.0084
<i>Shape factor</i> (H)	1.4192

**Tabel 4.6** analisa *shape factor* aliran konfigurasi B

#### 4.4.3. Konfigurasi Uji C ( $c/t=10$ dan $Re_t=6.76 \times 10^4$ )

Koefisien tekanan merupakan bilangan tanpa dimensi yang menggambarkan tekanan statis pada permukaan benda uji dengan

*free stream*. Dimana pada penelitian ini, pengukuran hanya dilakukan pada sisi *upper side* di *midspan* benda uji sesuai dengan konfigurasi yang sudah ditentukan sebelumnya. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi C ( $c/t=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ).

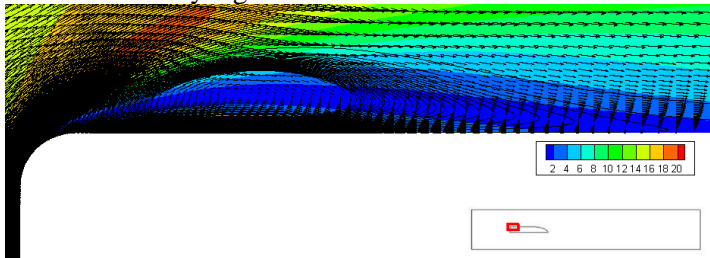


**Gambar 4.17** visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi C ( $c/t=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ )

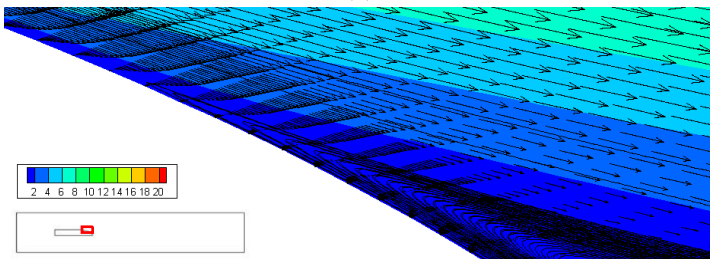
Grafik 4.17 menunjukkan fenomena yang terjadi pada aliran secara kuantitatif, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnasi karena aliran mengalami percepatan akibat *streamline* yang menyempit di daerah *rounded*. Kemudian koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang menyebabkan aliran mengalir dari tekanan rendah ke tekanan tinggi. Setelah melewati daerah *rounded*, aliran akan terhempas seperti mengalami separasi masif. Namun karena adanya kesempatan bagi aliran tersebut mengalami *reattachment*, terbentuklah *separation bubble* yang ditandai

dengan adanya takikkan. *Separation bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar. Grafik tersebut menjadi relatif datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran, seakan-akan aliran tersebut mengalir pada plat datar. Hingga koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* yang diakhiri dengan kembali datar saat mengalami separasi masif.

Dari grafik tersebut dan visualisasi aliran di atasnya, dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekanan terendah mencapai  $-3.289$ . Sedangkan *separation bubble* terbentuk dari  $x/c=0.012$  dengan nilai koefisien tekanan  $-2.813$  hingga terjadinya *reattachment* pada  $x/c=0.075$  dengan nilai koefisien tekanan  $-1.641$ . Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran mengalami separasi masif pada  $x/c=0.971$  dengan nilai koefisien tekanan  $-0.283$ . Dengan data-data tersebut, maka dapat diukur panjang relatif *separation bubble* yang terbentuk adalah  $0.063$ .



(a)



(b)

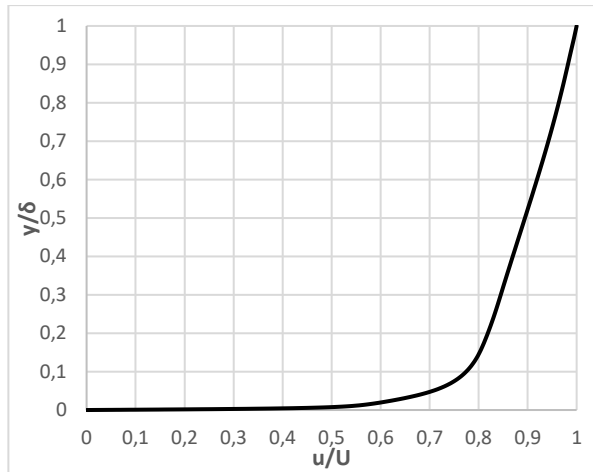
**Gambar 4.18** visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi C

Gambar tersebut menunjukkan *separation bubble* yang terbentuk pada *leading edge* dan separasi masif yang terjadi di buritan. Terlihat bahwa vektor kecepatannya menunjukkan adanya *back flow* yang diikuti dengan turunnya kecepatan di daerah tersebut. Setelah aliran mendapatkan tambahan energi dari *primary flow*, terlihat bahwa aliran tersebut mulai pulih hingga kembali mengalami *reattachment*. Sedangkan pada daerah buritan, terlihat bahwa aliran perlahan-lahan mengalami *back flow* hingga akhirnya mengalami separasi masif. Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:

Konfigurasi	C
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.075
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.063
Titik separasi masif (x/c)	0.971
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	63
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	11.034
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	33.9
Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	281.15

**Tabel 4.7** analisa karakteristik aliran konfigurasi C

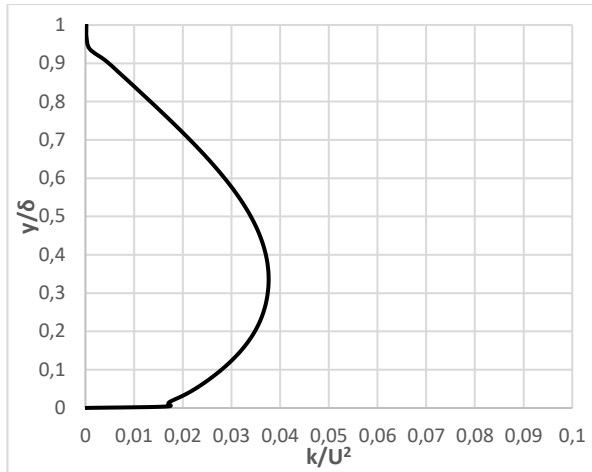
Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik alian juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.19** profil kecepatan konfigurasi C pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji, yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. Dimana jika dilihat dari gambar 4.17, titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.

Gambar 4.20 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.



**Gambar 4.20** *turbulent kinetic energy* konfigurasi C pada titik O

Dengan menggunakan metode 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 laminar atau turbulen. Didapatkan *shape factor* ( $H$ ) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

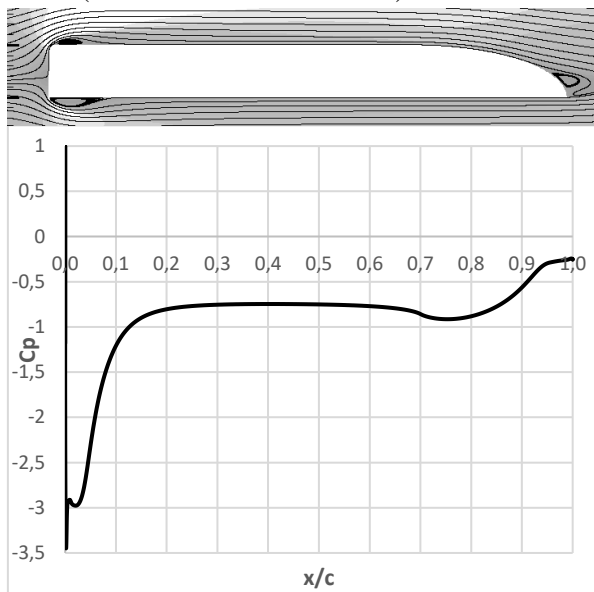
<b>Konfigurasi</b>	<b>C</b>
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0113
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.0089
<i>Shape factor</i> ( $H$ )	1.2596

**Tabel 4.8** analisa *shape factor* aliran konfigurasi C



#### 4.4.4. Konfigurasi Uji D ( $c/t=10$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$ )

Koefisien tekanan merupakan bilangan tanpa dimensi yang menggambarkan tekanan statis pada permukaan benda uji dengan *free stream*. Dimana pada penelitian ini, pengukuran hanya dilakukan pada sisi *upper side* di *midspan* benda uji sesuai dengan konfigurasi yang sudah ditentukan sebelumnya. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi D ( $c/t=10$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ).

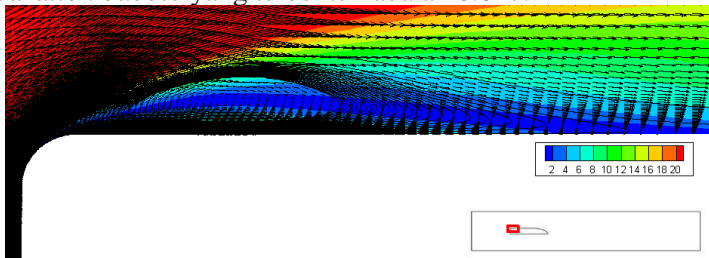


**Gambar 4.21** visualisasi aliran dan koefisien tekanan konfigurasi D ( $c/t=10$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ )

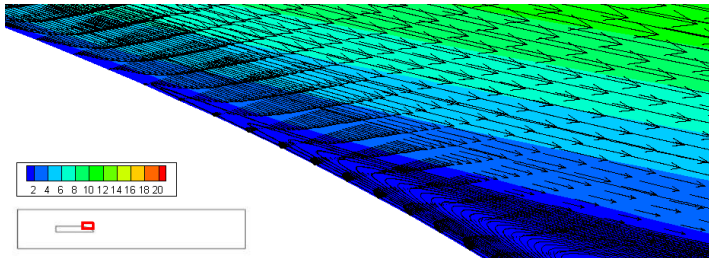
Grafik 4.21 menunjukkan fenomena yang terjadi pada aliran secara kuantitatif, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnasi karena aliran mengalami percepatan akibat *streamline* yang menyempit di daerah *rounded*. Kemudian koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang menyebabkan aliran mengalir dari tekanan rendah ke tekanan tinggi. Setelah melewati daerah

*rounded*, aliran akan terhempas seperti mengalami separasi masif. Namun karena adanya kesempatan bagi aliran tersebut mengalami *reattachment*, terbentuklah *separation bubble* yang ditandai dengan adanya takikkan. *Separation bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar. Grafik tersebut menjadi relatif datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran, seakan-akan aliran tersebut mengalir pada plat datar. Hingga koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* yang diakhiri dengan kembali datar saat mengalami separasi masif.

Dari grafik tersebut dan visualisasi aliran di atasnya, dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekanan terendah mencapai  $-3.392$ . Sedangkan *separation bubble* terbentuk dari  $x/c=0.012$  dengan nilai koefisien tekanan  $-2.943$  hingga terjadinya *reattachment* pada  $x/c=0.059$  dengan nilai koefisien tekanan  $-1.991$ . Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran mengalami separasi masif pada  $x/c=0.979$  dengan nilai koefisien tekanan  $-0.265$ . Dengan data-data tersebut, maka dapat diukur panjang relatif *separation bubble* yang terbentuk adalah  $0.047$ .



(a)



(b)

**Gambar 4.22** visualisasi aliran a) depan dan b) belakang pada konfigurasi D

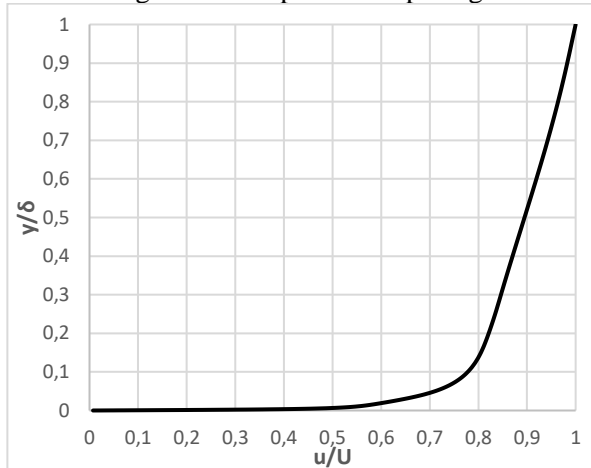
Gambar tersebut menunjukkan *separation bubble* yang terbentuk pada *leading edge* dan separasi masif yang terjadi di buritan. Terlihat bahwa vektor kecepatannya menunjukkan adanya *back flow* yang diikuti dengan turunnya kecepatan di daerah tersebut. Setelah aliran mendapatkan tambahan energi dari *primary flow*, terlihat bahwa aliran tersebut mulai pulih hingga kembali mengalami *reattachment*. Sedangkan pada daerah buritan, terlihat bahwa aliran perlahan-lahan mengalami *back flow* hingga akhirnya mengalami separasi masif. Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:

Konfigurasi	D
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.059
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.047
Titik separasi masif (x/c)	0.979
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	47
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	8.966
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	26.7

Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	286.35
--	--------

**Tabel 4.9** analisa karakteristik aliran konfigurasi D

Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik aliran juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar 4.23.

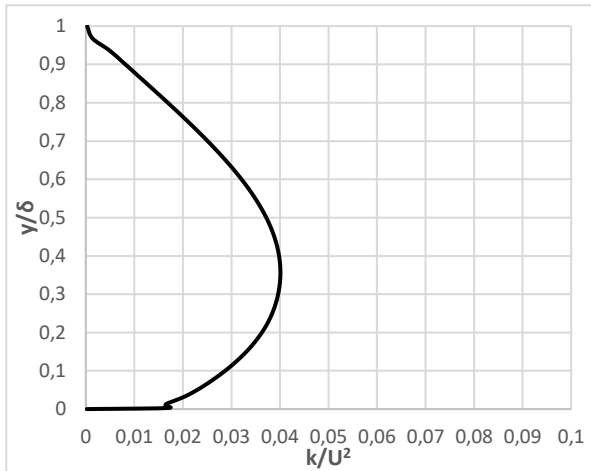


**Gambar 4.23** profil kecepatan konfigurasi D pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji, yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. Dimana jika dilihat dari gambar 4.21, titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.

Gambar 4.24 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan

*adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.



**Gambar 4.24** *turbulent kinetic energy* konfigurasi D pada titik O

Dengan menggunakan metode 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 laminar atau turbulen. Didapatkan *shape factor* ( $H$ ) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

Konfigurasi	D
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0104
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.0084
<i>Shape factor</i> ( $H$ )	1.252

**Tabel 4.10** analisa *shape factor* aliran konfigurasi D

Untuk mempermudah penarikan kesimpulan atas data-data yang telah didapatkan dari keempat konfigurasi tersebut, maka data-data percobaan tersebut dikumpulkan dalam tabel berikut.

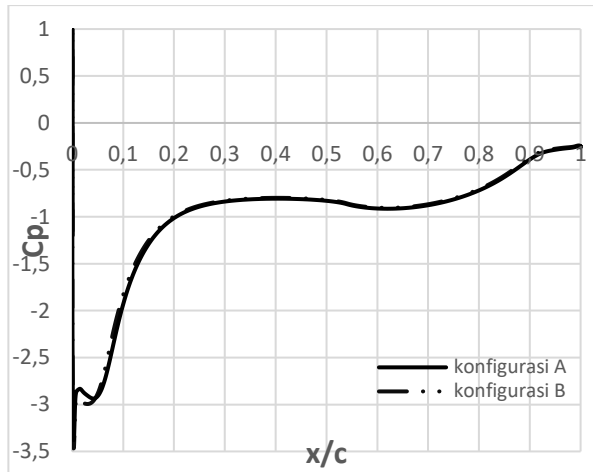
<b>Konfigurasi</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.163	0.148	0.075	0.059
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.142	0.127	0.063	0.047
Titik separasi masif (x/c)	0.933	0.940	0.971	0.979
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	92.3	82.55	63	47
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	16.552	14.483	11.034	8.966
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	37.9	29.5	33.9	26.7
Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	256.45	261	281.15	286.35
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0124	0.0119	0.0113	0.0104
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.00869	0.00844	0.00896	0.00835
<i>Shape factor</i> (H)	1.429	1.419	1.259	1.252

**Tabel 4.11** analisa karakteristik aliran

#### 4.5. Analisa antar Konfigurasi Uji

##### 4.5.1. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=6.5$ dengan $Re_t=6.76 \times 10^4$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$

Untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran yang melintasi benda uji tersebut, maka data dari masing-masing konfigurasi perlu dibandingkan. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi A terhadap konfigurasi B.



**Gambar 4.25** koefisien tekanan konfigurasi A ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi B ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ )

Walaupun tidak signifikan, grafik 4.21 menunjukkan perbedaan antara konfigurasi A dan B secara kuantitatif. Kedua konfigurasi tersebut memiliki variasi  $c/t$  yang sama dan dibedakan oleh bilangan Reynolds-nya. Kedua grafik tersebut menunjukkan fenomena yang sama, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnasi karena aliran mengalami percepatan di daerah *rounded*. Dilanjutkan dengan grafik tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang sebelumnya menyempit. Setelah melewati daerah *rounded*, kedua grafik tersebut menunjukkan adanya proses terjadinya *bubble separation* hingga aliran mengalami *reattachment*. *Separation bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran. Dimana dalam hal ini, konfigurasi A memiliki *separation bubble* yang relatif lebih panjang daripada konfigurasi B. Selanjutnya koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* dan kembali datar saat mengalami separasi masif. Terlihat juga bahwa

konfigurasi A mengalami separasi masif sedikit lebih awal dibandingkan dengan konfigurasi B.

Dari grafik tersebut dan data-data yang telah dibahas sebelumnya, konfigurasi A memiliki nilai koefisien tekanan minimal yang lebih tinggi, yaitu -3.375, dibandingkan dengan konfigurasi B, yaitu -3.462. *Separation bubble* yang terbentuk pada konfigurasi A terjadi pada  $x/c=0.021$  hingga mengalami *reattachment* pada  $x/c=0.163$ . Sedangkan pada konfigurasi B, *separation bubble* terbentuk pada  $x/c$  yang sama namun mengalami *reattachment* lebih awal ( $x/c=0.148$ ). Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran dengan konfigurasi A mengalami separasi masif lebih awal pada  $x/c=0.933$  dengan nilai koefisien tekanan -0.303, dimana konfigurasi B mengalami separasi masif pada  $x/c=0.940$  dengan nilai koefisien tekanan -0.283.

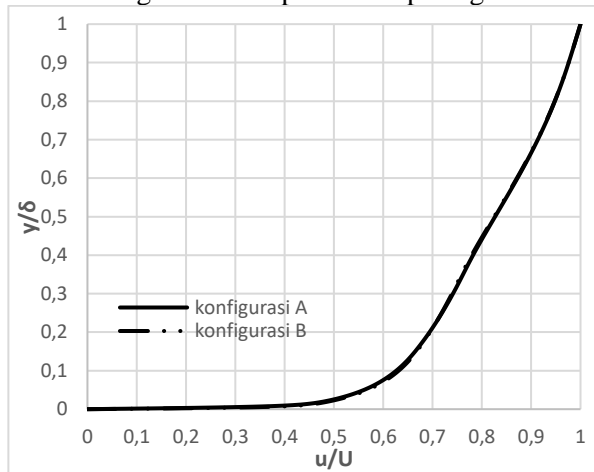
Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:

<b>Konfigurasi</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
Titik <i>reattachment</i> ( $x/c$ )	0.163	0.148
Panjang relatif <i>separation bubble</i> ( $x/c$ )	0.142	0.127
Titik separasi masif ( $x/c$ )	0.933	0.940
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	92.3	82.55
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	16.552	14.483
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	37.9	29.5
Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	256.45	261

**Tabel 4.12** analisa karakteristik aliran konfigurasi A dan B



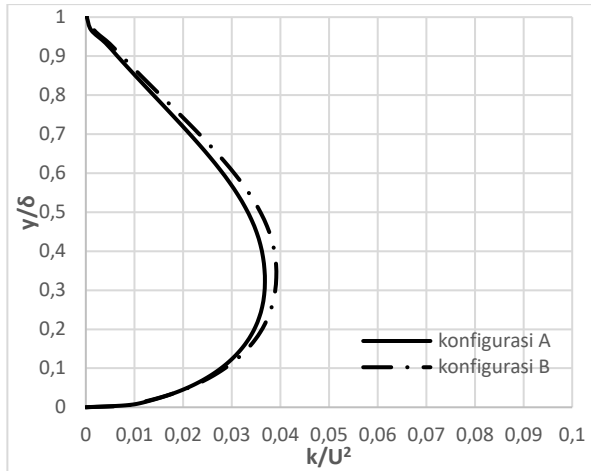
Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik alian juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar 4.26.



**Gambar 4.26** profil kecepatan konfigurasi A dan B pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O, dimana titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.

Gambar 4.27 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.



**Gambar 4.27** *turbulent kinetic energy* konfigurasi A dan B pada titik O

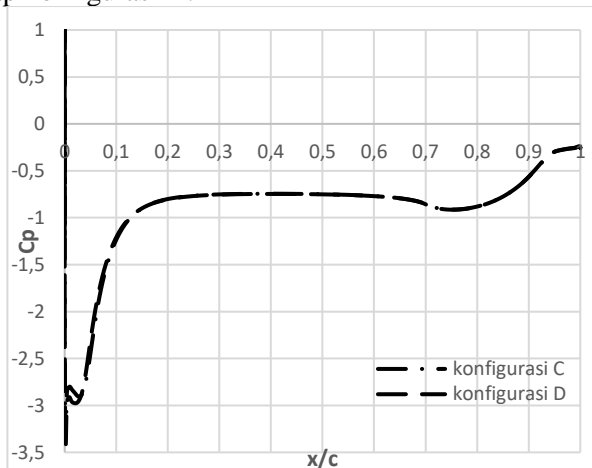
Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa konfigurasi A yang memiliki bilangan Reynolds yang lebih kecil daripada konfigurasi B, memiliki nilai profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* yang lebih kecil juga. Sehingga konfigurasi B memiliki kemampuan yang lebih kuat untuk menunda separasi masif di buritan. Dengan menggunakan metode integrasi numerik didapatkan *shape factor* ( $H$ ) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa kedua konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

<b>Konfigurasi</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0124	0.0119
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.00869	0.00844
<i>Shape factor</i> ( $H$ )	1.429	1.419

**Tabel 4.13** analisa *shape factor* aliran konfigurasi A dan B

#### 4.5.2. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=10$ dengan $Re_t=6.76 \times 10^4$ dan $Re_t=10.15 \times 10^4$

Untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran yang melintasi benda uji tersebut, maka data dari masing-masing konfigurasi perlu dibandingkan. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi C terhadap konfigurasi D.



**Gambar 4.28** koefisien tekanan konfigurasi C ( $c/t=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi D ( $c/t=10$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ )

Walaupun tidak signifikan, grafik 4.28 menunjukkan perbedaan antara konfigurasi C dan D secara kuantitatif. Kedua konfigurasi tersebut memiliki variasi  $c/t$  yang sama dan dibedakan oleh bilangan Reynolds-nya. Kedua grafik tersebut menunjukkan fenomena yang sama, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnasi karena aliran mengalami percepatan di daerah *rounded*. Dilanjutkan dengan grafik tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang sebelumnya menyempit. Setelah melewati daerah *rounded*, kedua grafik tersebut menunjukkan adanya proses terjadinya *bubble separation* hingga aliran mengalami *reattachment*. *Separation*

*bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran. Dimana dalam hal ini, konfigurasi C memiliki *separation bubble* yang relatif lebih panjang daripada konfigurasi D. Selanjutnya koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* dan kembali datar saat mengalami separasi masif. Terlihat juga bahwa konfigurasi C mengalami separasi masif sedikit lebih awal dibandingkan dengan konfigurasi D.

Dari grafik tersebut dan data-data yang telah dibahas sebelumnya, konfigurasi C memiliki nilai koefisien tekanan minimal yang lebih tinggi, yaitu -3.289, dibandingkan dengan konfigurasi D, yaitu -3.392. *Separation bubble* yang terbentuk pada konfigurasi C terjadi pada  $x/c=0.012$  hingga mengalami *reattachment* pada  $x/c=0.075$ . Sedangkan pada konfigurasi D, *separation bubble* terbentuk pada  $x/c$  yang sama namun mengalami *reattachment* lebih awal ( $x/c=0.059$ ). Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran dengan konfigurasi C mengalami separasi masif lebih awal pada  $x/c=0.971$  dengan nilai koefisien tekanan -0.283, dimana konfigurasi D mengalami separasi masif pada  $x/c=0.979$  dengan nilai koefisien tekanan -0.265.

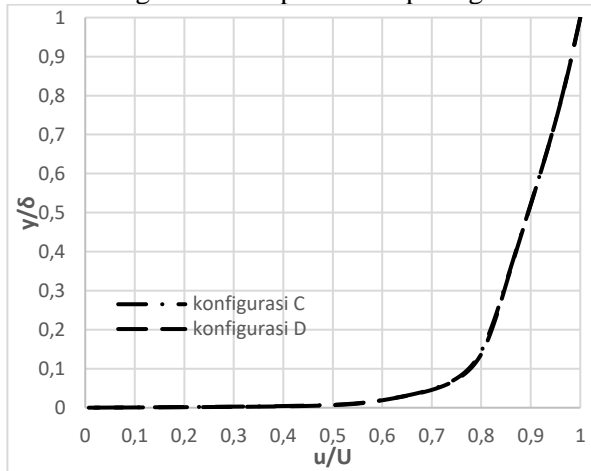
Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:

Konfigurasi	C	D
Titik <i>reattachment</i> ( $x/c$ )	0.075	0.059
Panjang relatif <i>separation bubble</i> ( $x/c$ )	0.063	0.047
Titik separasi masif ( $x/c$ )	0.971	0.979
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	63	47

Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	11.034	8.966
Sudut <i>separation bubble</i> ( $^{\circ}$ )	33.9	26.7
Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	281.15	286.35

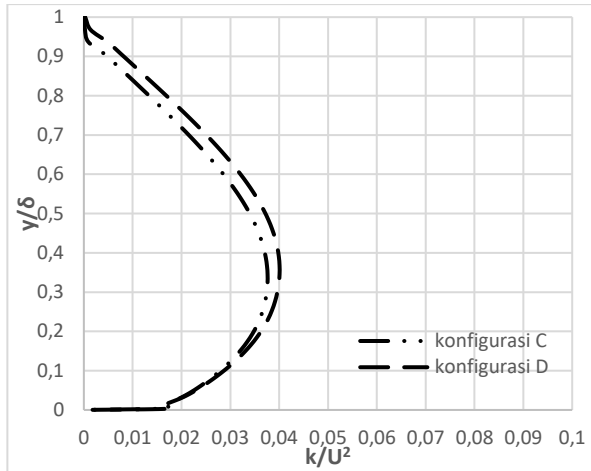
**Tabel 4.14** analisa karakteristik aliran konfigurasi C dan D

Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik alian juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar 4.29.



**Gambar 4.29** profil kecepatan konfigurasi C dan D pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O, dimana titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.



**Gambar 4.30** *turbulent kinetic energy* konfigurasi C dan D pada titik O

Gambar 4.30 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.

Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa konfigurasi C yang memiliki bilangan Reynolds yang lebih kecil daripada konfigurasi D, memiliki nilai profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* yang lebih kecil juga. Sehingga konfigurasi D memiliki kemampuan yang lebih kuat untuk menunda separasi masif di buritan. Dengan menggunakan metode integrasi numerik didapatkan *shape factor* ( $H$ ) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa kedua konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

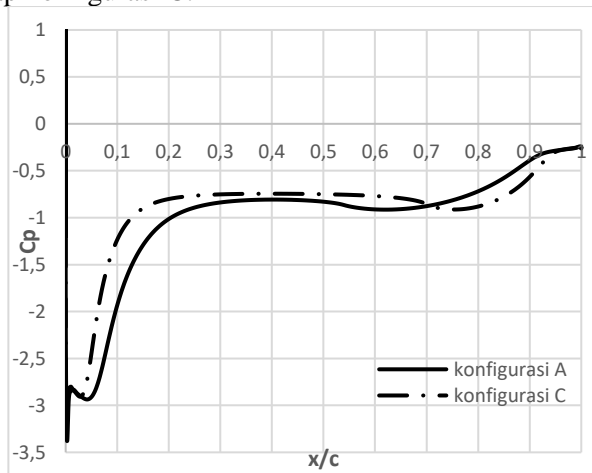
Konfigurasi	C	D
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0113	0.0104

<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.00896	0.00835
<i>Shape factor</i> (H)	1.259	1.252

Tabel 4.15 analisa *shape factor* aliran konfigurasi C dan D

#### 4.5.3. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=6.5$ dengan $c/t=10$ pada $Re_t=6.76 \times 10^4$

Untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran yang melintasi benda uji tersebut, maka data dari masing-masing konfigurasi perlu dibandingkan. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi A terhadap konfigurasi C.



Gambar 4.31 koefisien tekanan konfigurasi A ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi C ( $c/t=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ )

Grafik 4.31 menunjukkan perbedaan antara konfigurasi A dan C secara kuantitatif. Kedua konfigurasi tersebut memiliki variasi bilangan Reynolds yang sama dan dibedakan oleh  $c/t$ -nya. Kedua grafik tersebut menunjukkan fenomena yang sama, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnansi karena aliran mengalami percepatan di daerah

*rounded*. Dilanjutkan dengan grafik tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang sebelumnya menyempit. Setelah melewati daerah *rounded*, kedua grafik tersebut menunjukkan adanya proses terjadinya *bubble separation* hingga aliran mengalami *reattachment*. *Separation bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran. Dimana dalam hal ini, konfigurasi A memiliki *separation bubble* yang relatif lebih panjang daripada konfigurasi C. Selanjutnya koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* dan kembali datar saat mengalami separasi masif. Terlihat juga bahwa konfigurasi A mengalami separasi masif sedikit lebih awal dibandingkan dengan konfigurasi C.

Dari grafik tersebut dan data-data yang telah dibahas sebelumnya, konfigurasi A memiliki nilai koefisien tekanan minimal yang lebih rendah, yaitu -3.375, dibandingkan dengan konfigurasi C, yaitu -3.289. *Separation bubble* yang terbentuk pada konfigurasi A terjadi pada  $x/c=0.021$  hingga mengalami *reattachment* pada  $x/c=0.163$ . Sedangkan pada konfigurasi C, *separation bubble* terbentuk pada  $x/c=0.012$  dan mengalami *reattachment* lebih awal ( $x/c=0.075$ ). Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran dengan konfigurasi A mengalami separasi masif lebih awal pada  $x/c=0.933$  dengan nilai koefisien tekanan -0.303, dimana konfigurasi C mengalami separasi masif pada  $x/c=0.971$  dengan nilai koefisien tekanan -0.283.

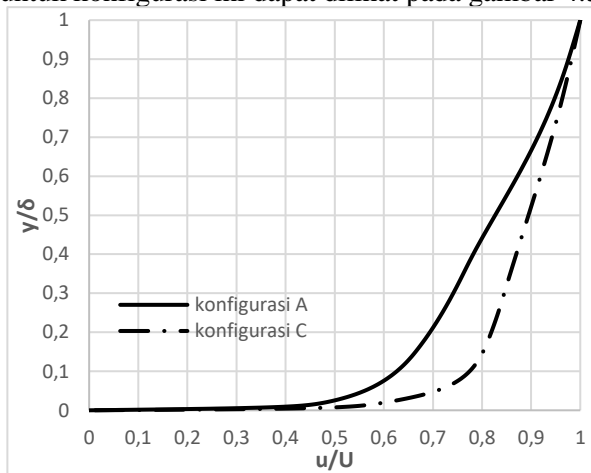
Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:



<b>Konfigurasi</b>	<b>A</b>	<b>C</b>
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.163	0.075
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.142	0.063
Titik separasi masif (x/c)	0.933	0.971
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	92.3	63
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	16.552	11.034
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	37.9	33.9
Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	256.45	281.15

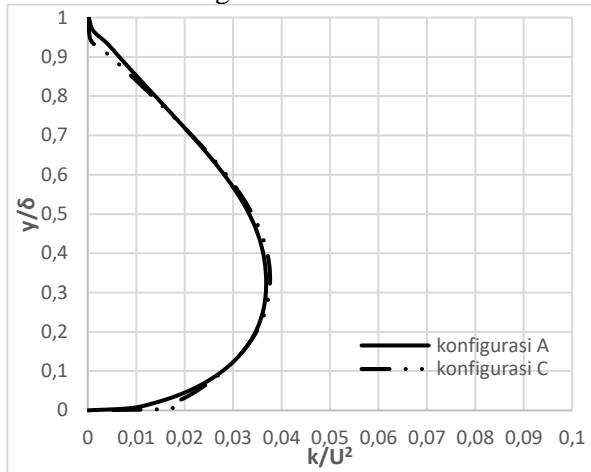
**Tabel 4.16** analisa karakteristik aliran konfigurasi A dan C

Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik aliran juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar 4.32.



**Gambar 4.32** profil kecepatan konfigurasi A dan C pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O, dimana titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.



**Gambar 4.33** *turbulent kinetic energy* konfigurasi A dan C pada titik O

Gambar 4.33 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.

Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa konfigurasi C yang memiliki variasi  $x/c$  yang lebih panjang daripada konfigurasi A, memiliki nilai profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* dengan nilai yang lebih besar juga. Sehingga konfigurasi C memiliki kemampuan yang lebih kuat untuk menunda separasi masif di buritan. Dengan menggunakan metode integrasi numerik didapatkan *shape factor* ( $H$ ) aliran pada titik O dengan ketebalan

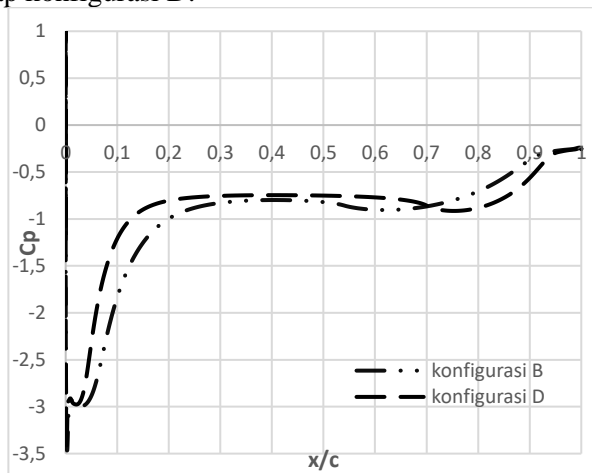
*boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa kedua konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

Konfigurasi	A	C
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0124	0.0113
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.00869	0.00896
<i>Shape factor</i> (H)	1.429	1.259

**Tabel 4.17** analisa *shape factor* aliran konfigurasi A dan C

#### 4.5.4. Perbandingan antara Konfigurasi Uji $c/t=6.5$ dengan $c/t=10$ pada $Re_t=10.15 \times 10^4$

Untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran yang melintasi benda uji tersebut, maka data dari masing-masing konfigurasi perlu dibandingkan. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan pada benda uji dengan konfigurasi B terhadap konfigurasi D.



**Gambar 4.34** koefisien tekanan konfigurasi B ( $c/t=6.5$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) dan konfigurasi D ( $c/t=10$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ )

Grafik 4.34 menunjukkan perbedaan antara konfigurasi A dan C secara kuantitatif. Kedua konfigurasi tersebut memiliki variasi bilangan Reynolds yang sama dan dibedakan oleh  $c/t$ -nya. Kedua grafik tersebut menunjukkan fenomena yang sama, diawali dengan terjadinya penurunan nilai koefisien tekanan secara drastis setelah titik stagnasi karena aliran mengalami percepatan di daerah *rounded*. Dilanjutkan dengan grafik tersebut mengalami kenaikan secara drastis karena perlambatan aliran akibat terbukanya lagi *streamline* yang sebelumnya menyempit. Setelah melewati daerah *rounded*, kedua grafik tersebut menunjukkan adanya proses terjadinya *bubble separation* hingga aliran mengalami *reattachment*. *Separation bubble* yang terbentuk diawali saat nilai koefisien tekanan mengalami sedikit penurunan, lalu kembali naik secara perlahan hingga sesaat sebelum grafik tersebut menjadi datar saat aliran tersebut melewati bidang tumpu aliran. Dimana dalam hal ini, konfigurasi B memiliki *separation bubble* yang relatif lebih panjang daripada konfigurasi D. Selanjutnya koefisien tekanan tersebut mengalami kenaikan lagi saat melewati *trailing edge* dan kembali datar saat mengalami separasi masif. Terlihat juga bahwa konfigurasi B mengalami separasi masif sedikit lebih awal dibandingkan dengan konfigurasi D.

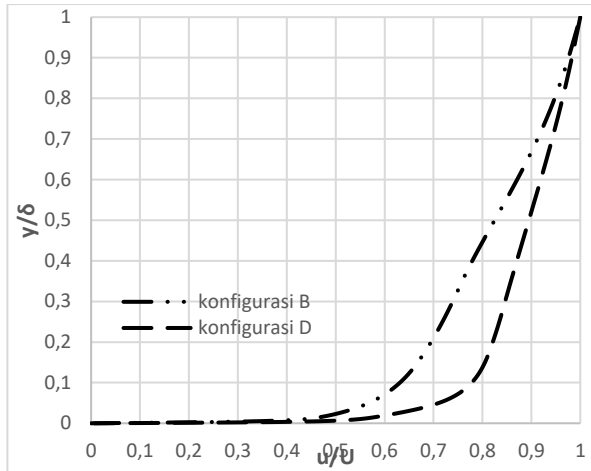
Dari grafik tersebut dan data-data yang telah dibahas sebelumnya, konfigurasi B memiliki nilai koefisien tekanan minimal yang lebih rendah, yaitu -3.462, dibandingkan dengan konfigurasi D, yaitu -3.392. *Separation bubble* yang terbentuk pada konfigurasi B terjadi pada  $x/c=0.021$  hingga mengalami *reattachment* pada  $x/c=0.148$ . Sedangkan pada konfigurasi D, *separation bubble* terbentuk pada  $x/c=0.012$  dan mengalami *reattachment* lebih awal ( $x/c=0.059$ ). Setelah melewati bidang tumpu aliran dan *trailing edge*, aliran dengan konfigurasi B mengalami separasi masif lebih awal pada  $x/c=0.940$  dengan nilai koefisien tekanan -0.283, dimana konfigurasi D mengalami separasi masif pada  $x/c=0.979$  dengan nilai koefisien tekanan -0.265.

Selanjutnya, dengan data-data tersebut juga dapat diukur panjang aktual *separation bubble* yang terbentuk dan posisi aktual titik separasinya (terhadap *trailing edge*). Dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan maksimal dan sudut dari *separation bubble* yang terbentuk. Sehingga dapat disimpulkan:

<b>Konfigurasi</b>	<b>B</b>	<b>D</b>
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.148	0.059
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.127	0.047
Titik separasi masif (x/c)	0.940	0.979
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	82.55	47
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	14.483	8.966
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	29.5	26.7
Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	261	286.35

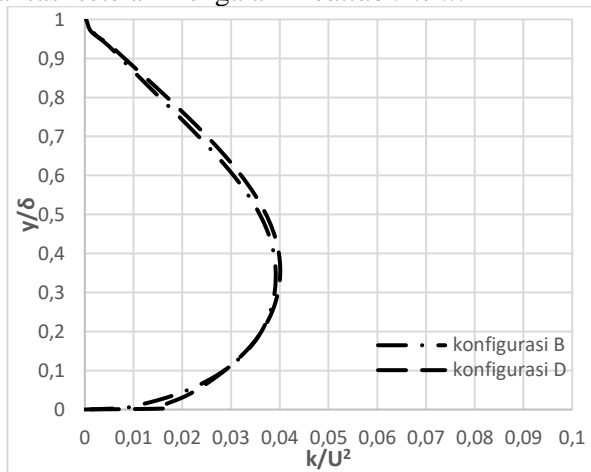
**Tabel 4.18** analisa karakteristik aliran konfigurasi B dan D

Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik alian juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang berjarak 300 mm dari depan (gambar 4.2). Profil kecepatan pada titik O untuk konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar 4.35.



**Gambar 4.35** profil kecepatan konfigurasi B dan D pada titik O

Gambar tersebut merupakan profil kecepatan pada daerah *upperside* benda uji yang diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O, dimana titik O berada pada bidang tumpu aliran dengan jarak tertentu dari titik *reattachment*. Titik O diposisikan sedemikian rupa agar aliran memiliki kesempatan untuk bertransisi dan relaksasi setelah mengalami *reattachment*.



**Gambar 4.36** turbulent kinetic energy konfigurasi B dan D pada titik O

Gambar 4.36 merupakan grafik yang menunjukkan *turbulent kinetic energy* aliran yang juga diambil setinggi 10 mm dari dinding pada titik O. *Turbulent kinetic energy* tersebut terjadi karena adanya fluktuasi di dalam aliran, dimana energi tersebut nantinya akan dimanfaatkan untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif di buritan.

Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa konfigurasi D yang memiliki variasi  $x/c$  yang lebih panjang daripada konfigurasi B, memiliki nilai profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* dengan nilai yang lebih besar juga. Sehingga konfigurasi D memiliki kemampuan yang lebih kuat untuk menunda separasi masif di buritan. Dengan menggunakan metode integrasi numerik didapatkan *shape factor* (H) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa kedua konfigurasi tersebut telah turbulen. Hasil dari perhitungan tersebut adalah sebagai berikut.

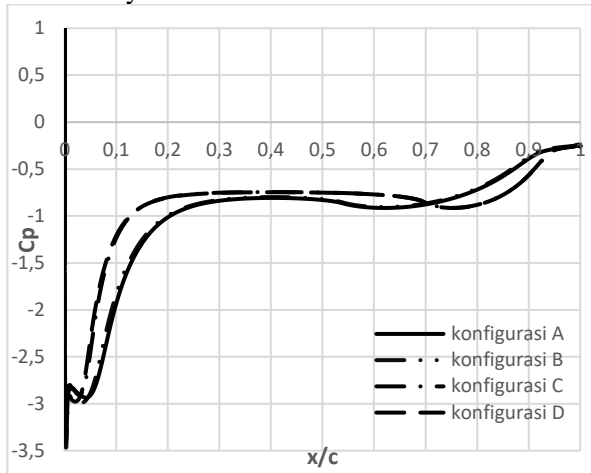
<b>Konfigurasi</b>	<b>B</b>	<b>D</b>
<i>Displacement thickness</i> ( $\delta^*$ )	0.0119	0.0104
<i>Momentum thickness</i> ( $\Theta$ )	0.00844	0.00835
<i>Shape factor</i> (H)	1.419	1.252

**Tabel 4.19** analisa *shape factor* aliran konfigurasi B dan D

#### 4.6. Diskusi

Untuk memahami bagaimana pengaruh dari bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran yang melintasi benda uji tersebut, maka data dari seluruh konfigurasi perlu dibandingkan. Perbandingan tersebut akan meliputi konfigurasi A yang merupakan kombinasi dari variasi  $x/c=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ , konfigurasi B yang merupakan kombinasi dari variasi  $x/c=6.5$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ , konfigurasi C yang merupakan kombinasi dari variasi  $x/c=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$  dan konfigurasi D yang merupakan kombinasi dari variasi  $x/c=10$

dan  $Re_c=10.15 \times 10^4$ . Berikut ini merupakan grafik yang merangkum analisa dari karakteristik aliran pada setiap konfigurasi yang telah dibahas sebelumnya.



**Gambar 4.37** analisa grafik koefisien tekanan

Jika dilihat dari titik *reattachment* dan *separation bubble* yang terbentuk, terlihat bahwa semakin besar bilangan Reynolds yang diberikan maka akan semakin awal aliran tersebut mengalami *reattachment*, seperti pada konfigurasi A dengan B dan C dengan D. Hal ini menunjukkan bahwa dengan bertambahnya bilangan Reynolds, maka *separation bubble* yang terbentuk akan semakin pendek. Terlihat juga dari grafik tersebut bahwa semakin panjang bidang tumpu aliran, maka semakin awal juga aliran tersebut mengalami *reattachment*, seperti pada konfigurasi A dengan C dan B dengan D. Hal ini menunjukkan bahwa panjang bidang tumpu aliran akan mempengaruhi kesempatan untuk aliran tersebut mengalami *reattachment* lebih awal.

Dari tabel 4.20 juga didapatkan data panjang aktual, tebal aktual dan sudut aktual dari *separation bubble* yang terbentuk. Data-data tersebut sesuai dengan sebelumnya, yaitu konfigurasi A memiliki panjang aktual, tebal aktual dan sudut aktual yang paling besar, sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi A memiliki

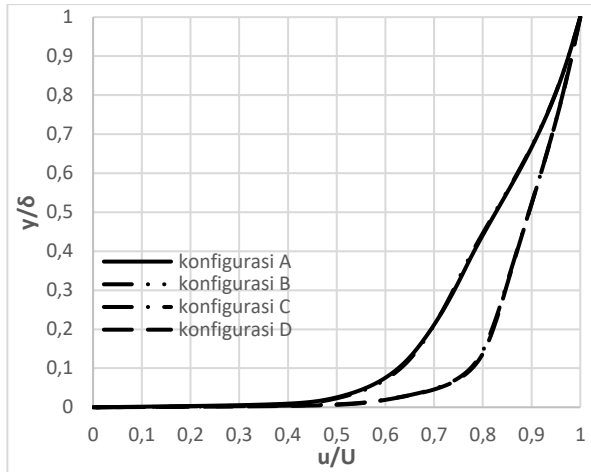


*separation bubble* yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Dapat dilihat juga bagaimana pengaruh dari panjang *separation bubble* yang terbentuk terhadap mundurnya separasi masif di buritan. Terlihat bahwa konfigurasi A yang memiliki panjang *separation bubble* paling panjang, mengalami separasi masif lebih awal dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Konfigurasi D yang memiliki panjang *separation bubble* paling pendek, mengalami separasi masif lebih lambat dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Dengan menghitung *shape factor*-nya, dapat diketahui apakah aliran tersebut bersifat laminar atau turbulen, dimana hasil dari perhitungan *shape factor* dapat dilihat pada tabel berikut.

<b>Konfigurasi</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.163	0.148	0.075	0.059
Panjang relatif <i>separation bubble</i> (x/c)	0.142	0.127	0.063	0.047
Titik separasi masif (x/c)	0.933	0.940	0.971	0.979
Panjang aktual <i>separation bubble</i> (mm)	92.3	82.55	63	47
Tebal maksimal <i>separation bubble</i> (mm)	16.552	14.483	11.034	8.966
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	37.9	29.5	33.9	26.7
Titik aktual separasi masif terhadap <i>trailing edge</i> (mm)	256.45	261	281.15	286.35

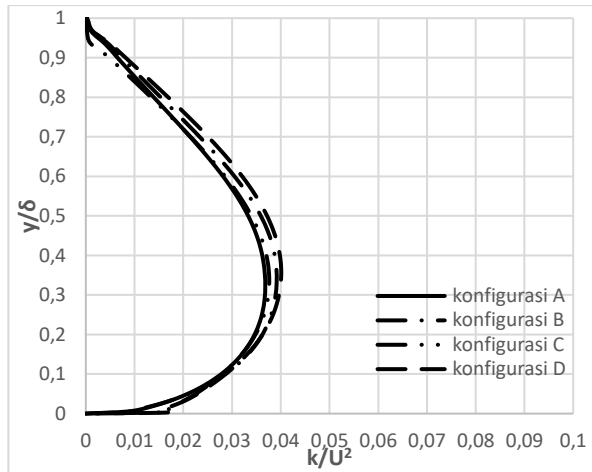
**Tabel 4.20** analisa karakteristik aliran

Selain dengan grafik koefisien tekanan, analisa karakteristik alian juga dilakukan dengan menganalisa hasil dari pengukuran profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada titik O yang telah dibahas sebelumnya.



**Gambar 4.38** analisa profil kecepatan

Walaupun tidak signifikan, gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin besar bilangan Reynolds yang diberikan maka akan semakin besar nilainya, terutama pada profil yang semakin dekat dengan dinding. Terlihat juga dari grafik tersebut bahwa semakin panjang bidang tumpu aliran, maka semakin besar juga nilainya, seperti pada konfigurasi A dengan C dan B dengan D. Sehingga dapat dilihat bahwa panjang bidang tumpu aliran memberikan pengaruh yang lebih signifikan. Gambar 4.39 menunjukkan bahwa semakin besar bilangan Reynolds yang diberikan maka akan semakin besar nilainya, seperti pada konfigurasi A dengan B dan C dengan D. Terlihat juga dari grafik tersebut bahwa semakin panjang bidang tumpu aliran, maka semakin besar juga nilainya, seperti pada konfigurasi A dengan C dan B dengan D. Sehingga dapat dilihat bahwa bilangan Reynolds memberikan pengaruh yang lebih signifikan.



**Gambar 4.39** analisa *turbulent kinetic energy* aliran

Dengan menggunakan metode integrasi numerik didapatkan *shape factor* ( $H$ ) aliran pada titik O dengan ketebalan *boundary layer* ( $\delta$ ) yang ditentukan dari 99% *inviscid* sehingga menunjukkan bahwa keempat konfigurasi tersebut telah turbulen. Terlihat pada tabel berikut bahwa dengan semakin besarnya nilai *turbulent kinetic energi* aliran, maka semakin kecil nilai *shape factor*-nya.

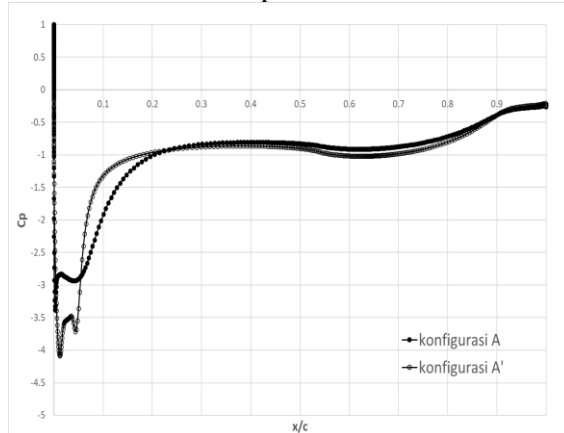
Konfigurasi	<i>Shape Factor</i> ( $H$ )
A	1.429
B	1.419
C	1.259
D	1.252

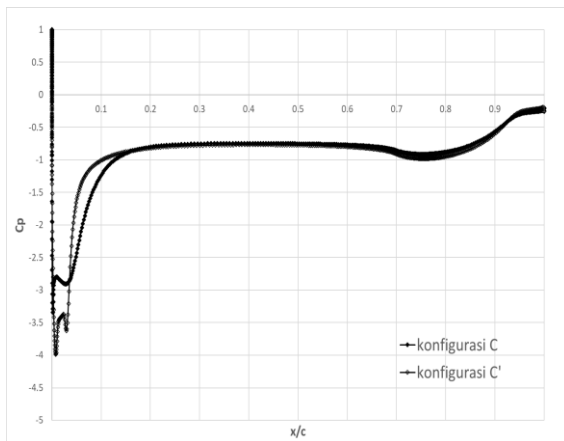
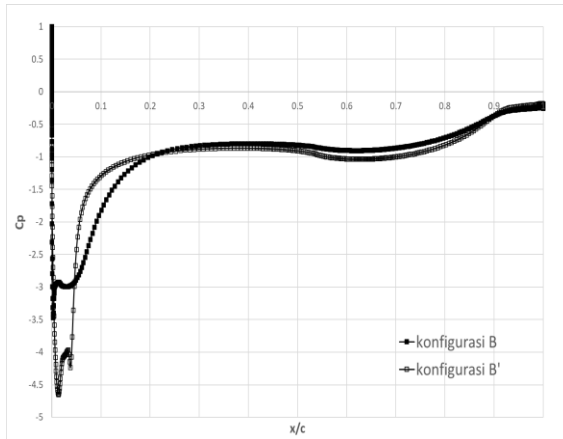
**Tabel 4.21** analisa *shape factor* aliran

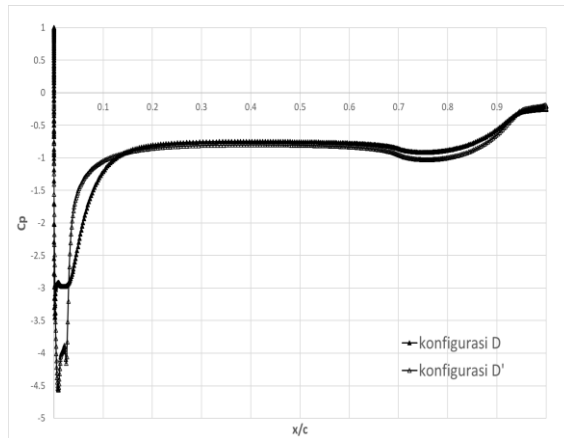
Hasil dari diskusi diatas menunjukkan bahwa aliran dengan bilangan *Reynolds* lebih besar dan bidang tumpu aliran lebih panjang akan mengalami *reattachment* lebih awal dan menghasilkan *separation bubble* yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena aliran tersebut mendapatkan tambahan energi yang lebih besar dari *primary flow* dan aliran tersebut memiliki cukup kesempatan untuk relaksasi sebelum bertemu *blockage* berikutnya yang berupa daerah divergen pada *trailing edge*.

Sehingga menyebabkan aliran dapat bertransisi dari laminer menjadi turbulen lebih cepat. Dengan bertambah cepatnya aliran mengalami transisi menjadi turbulen, aliran tersebut akan memiliki momentum yang lebih kuat untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif yang terjadi di daerah *downstream*.

Selanjutnya akan dibandingkan hasil penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan oleh **Wafa [11]**, dimana penelitian tersebut memiliki konfigurasi yang sama dengan penelitian ini namun berbeda pada *rounded* model benda uji. Penelitian tersebut dilakukan pada benda uji ( $r/t=0.2$ ) dengan variasi panjang aksial ( $x/c=6.5$  dan  $x/c=10$ ) dan bilangan Reynolds ( $Re_t=6.76 \times 10^4$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ). Untuk memahami bagaimana pengaruh dari bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran yang melintasi benda uji tersebut, maka data dari seluruh konfigurasi perlu dibandingkan. Berikut ini merupakan grafik koefisien tekanan yang membandingkan karakteristik aliran dari kedua penelitian tersebut.







**Gambar 4.40** perbandingan grafik koefisien tekanan

Jika dilihat dari titik *reattachment* dan *separation bubble* yang terbentuk, terlihat bahwa semakin ramah bentuk dari *leading edge* maka akan semakin awal aliran tersebut mengalami *reattachment*, seperti pada konfigurasi A dengan A' dan konfigurasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa dengan bertambahnya besarnya *rounded* pada *leading edge*, maka aliran akan semakin mudah dituntun untuk kembali *attach* pada dinding. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk dari *leading edge* juga akan mempengaruhi kesempatan untuk aliran tersebut mengalami *reattachment* lebih awal.

Dari tabel 4.22 juga didapatkan data titik *reattachment*, panjang relatif *separation bubble* yang terbentuk dan titik terjadinya separasi masif. Data-data tersebut sesuai dengan sebelumnya, yaitu konfigurasi A dan A' memiliki panjang aktual, tebal aktual dan sudut aktual yang paling besar, sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi A dan A' memiliki *separation bubble* yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Dapat dilihat juga bagaimana pengaruh dari panjang *separation bubble* yang terbentuk terhadap mundurnya separasi masif di buritan. Terlihat bahwa konfigurasi A dan A' yang memiliki panjang *separation bubble* paling panjang, mengalami separasi masif lebih awal dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Dengan menghitung *shape factor*-nya, dapat diketahui apakah

aliran tersebut bersifat laminar atau turbulen, dimana hasil dari perhitungan *shape factor* dapat dilihat pada tabel berikut.

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

**Tabel 4.22** perbandingan karakteristik aliran

Jika dibandingkan antara benda uji dengan  $r/t=0.1$  (konfigurasi A, B, C dan D) dengan benda uji dengan  $r/t=0.2$  (konfigurasi A', B', C' dan D'), terlihat bahwa benda uji dengan  $r/t=0.1$  dapat menunda lebih jauh terjadinya separasi masif. Walaupun benda uji dengan  $r/t=0.2$  memiliki panjang *separation bubble* dan *shape factor* yang lebih kecil, namun benda uji dengan  $r/t=0.1$  lebih optimal untuk menunda separasi masif pada keempat konfigurasi tersebut.

Hasil dari diskusi diatas menunjukkan bahwa selain pengaruh dari bilangan *Reynolds* lebih besar dan panjang bidang tumpu aliran, keramahan dari bentuk *leading edge* juga akan mempengaruhi kapan aliran mengalami *reattachment* dan ukuran *separation bubble* yang terbentuk. Hal ini disebabkan karena aliran tersebut akan dituntun dengan baik untuk kembali melekat pada dinding setelah terhempas saat melewati *leading edge*. Sehingga menyebabkan aliran dapat bertransisi dari laminar menjadi turbulen lebih cepat. Dengan bertambah cepatnya aliran mengalami transisi menjadi turbulen, aliran tersebut akan memiliki momentum yang lebih kuat untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* sehingga dapat menunda separasi masif yang terjadi di daerah *downstream*.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian secara eksperimen dan simulasi numerik dua dimensi untuk menganalisa karakteristik *separation bubble* yang dipengaruhi oleh bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran ini, didapatkan data mengenai penundaan separasi masif yang terjadi. Hasil dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Pada perbandingan antara konfigurasi A ( $x/c=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dengan B ( $x/c=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi C ( $x/c=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dengan D ( $x/c=10$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) yang memiliki variasi  $x/c$  yang sama, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi dengan bilangan Reynolds yang lebih besar dapat mengalami *reattachment* lebih awal dan membentuk *separation bubble* yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena aliran tersebut mendapatkan tambahan energi yang lebih besar dari *primary flow* sehingga aliran tersebut dapat mengalami *reattachment* lebih awal dan bertransisi lebih awal juga.
2. Pada perbandingan antara konfigurasi A ( $x/c=6.5$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dengan C ( $x/c=10$  dan  $Re_t=6.76 \times 10^4$ ) dan konfigurasi B ( $x/c=6.5$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) dengan D ( $x/c=10$  dan  $Re_t=10.15 \times 10^4$ ) yang memiliki variasi bilangan Reynolds yang sama, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi dengan panjang bidang tumpu aliran yang lebih panjang dapat mengalami *reattachment* lebih awal dan membentuk *separation bubble* yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena aliran tersebut memiliki cukup kesempatan untuk relaksasi sebelum bertemu *blockage* berikutnya yang berupa daerah divergen pada *trailing edge*.
3. Pada perbandingan keempat konfigurasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa aliran yang mengalami *reattachment* lebih awal dan membentuk *separation bubble* yang lebih kecil

dapat menunda separasi masif di buritan. Hal ini disebabkan karena aliran tersebut dapat bertransisi lebih awal dari laminer ke turbulen sehingga memiliki momentum yang lebih besar untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure* di daerah *downstream*.

## 5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang penulis perlu sampaikan untuk menunjang penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Perawatan *windtunnel* dan pengkondisian ruangan pengambilan data yang perlu diperhatikan agar meminimalisir error yang terjadi saat pengambilan data akibat peralatan. Begitu juga penambahan fasilitas pengambilan data seperti *pitot* dengan ukuran yang lebih kecil, *pressure transducer* dan *daqpro* yang memadai.
2. Penambahan jumlah *wall pressure tap* di daerah *rounded* benda uji karena banyak data-data penting yang dapat diambil pada daerah tersebut.
3. Perlu dilakukan pengukuran tekanan pada *outlet wind tunnel* sebagai *input* pada *pressure outlet* simulasi numerik.
4. Penambahan validasi profil kecepatan dan visualisasi aliran dari eksperimen untuk penentuan model turbulen yang lebih akurat.
5. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan menambah bilangan Reynolds yang lebih tinggi atau menambah variasi *angle of attack* pada benda uji dengan benda uji yang lebih aerodinamis.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Seshagiri, A., Cooper, E. & Traub, Lance W., 2009. **Effects of Vortex Generators on an Airfoil at Low Reynolds Numbers**. Prescott: Journal of Aircraft.
2. Hansen, K. L., Kelso, R. M., Choudhry, A. and Arjomandi, M., 2014. **Laminar Separation Bubble Effect on The Lift Cuve Slope on an Airfoil**. Melbourne: 19<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference.
3. Sutardi & Widodo, Wawan A., 2008. **Studi Eksperimental dan Numerik Karakteristik Boundary Layer pada Permukaan Pelat Datar dengan Gangguan Sebuah Obstacle Berbentuk Rectangular**. Surabaya: Seminar Nasional Teknik Mesin 3.
4. Sutrisno, Sasongko, Herman & Mirmanto, Heru, 2012. **Analisa Numerik Efek Ketebalan Bluff Rectangular terhadap Karakteristik Aliran di Dekat Dinding**. Yogyakarta: Annual Engineering Seminar 2012.
5. Lamballais E., Silvestrini, J. & Laizet, S., 2010. **Direct Numerical Simulation of Flow Separation Behind a Rounded Leading Edge: Study of Curvature Effects**. Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 31, no. 3, pp. 295–306, 2010.
6. Fox, Robert W. and Mc. Donald, Alan T., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, 5<sup>th</sup> edition**. John Wiley and Son, Inc.
7. Anderson, Jr. John D., 2007. **Fundamentals of Aerodynamics, 5<sup>th</sup> edition**. New York: McGraw-Hill.
8. Pauley, L.L., Moin, P. and Reynolds, W.C., 1988. **A Numerical Study of Unsteady Laminar Boundary Layer Separation**. Rep. TF-34, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
9. Hunt. J.C.R, **A Theory of Turbulent Flow Round Two-Dimensional Bluff Bodies**, Journal of Fluid Mechanics, 61(1973) 625-706.
10. Versteeg H.K., dan Malalasekera W., **An Introduction To**

**Computational Fluid Dynamics-The Finite Volume Method**, Longman Scientific & Technical, 1995.

11. Wafa, A. A., 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* ( $Re_t = 6.76 \times 10^4$  dan  $Re_t = 10.15 \times 10^4$ ) dan Panjang Aksial ( $c/t = 6.5$  dan  $c/t = 10$ ).** Surabaya.

## BIODATA PENULIS



Athalla Rafrisah lahir pada tanggal 03 Mei 1998 di Surabaya, Jawa Timur sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan di TK Dunia Anak Surabaya, SDN Kendangsari I Surabaya, SMPN 39 Surabaya dan SMAN 14 Surabaya. Pada tahun 2015, penulis mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan sekolahnya di jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya melalui jalur SNMPTN.

Selama berkuliah penulis dikenal aktif berdiskusi dan aktif di berbagai kegiatan kemahasiswaan, terutama di DIMENSI yang merupakan organisasi mahasiswa di bidang jurnalistik. Pada kepengurusan periode 2018/2019, penulis mendapat amanah untuk menjadi salah satu pimpinan dalam organisasi tersebut sebagai Pimpinan Redaksi. Pada tahun keempat, penulis mengikuti program pertukaran pelajar selama satu semester ke salah satu universitas di Malaysia, yaitu Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM) untuk belajar dan memperluas pandangannya. Penulis mengambil moto dari buku yang dibacanya, yaitu “Seorang Engineer yang tidak mengerti politik, tidak ada bedanya dengan seorang kuli”.

*Email:* arafrisah@gmail.com