

Studi Eksperimen dan Numerik Karakteristik Aliran Dua Dimensi pada *Thick Plate–Rounded Leading Edge* ($r/t = 0.2$) dengan Pengaruh *Reynolds Number* ($Re_t = 6.76 \times 10^4$ dan $Re_t = 10.15 \times 10^4$) dan Panjang Aksial ($c/t = 6.5$ dan $c/t = 10$)

Ahmad Ali Wafa dan Herman Sasongko

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya

e-mail: herman@me.its.ac.id

Abstrak—Perkembangan teknologi membuat Engineer di dunia berusaha menciptakan kendaraan dengan performa yang optimal. Hal tersebut salah satunya dapat dicapai dengan penggunaan desain bodi aerodinamis sebagai upaya mereduksi gaya drag pada kendaraan. Salah satu metode untuk mereduksi drag adalah dengan memundurkan titik separasinya dengan cara mempercepat transisi boundary layer dari laminar ke turbulen. salah satu metode untuk mempercepat transisi baoundasy layer adalah dengan menggunakan *separation bubble*. *Separation Bubble* terbentuk sebagai hasil dari aliran yang terseparasi kemudian *attach*. beberapa faktor yang mempengaruhi *separation bubble* adalah bilangan Reynolds, bentuk *leading edge* dan kesempatan aliran untuk kembali *attach* berupa bidang tumpu aliran. penelitian ini meneliti korelasi antara ketiga faktor dengan karakteristik *separation bubble* yang terbentuk serta hubungannya dengan penundaan separasi massif di daerah *downstream*. penelitian ini dilakukan dengan benda uji plat datar dengan bentuk *leading edge semi-rounded* ($r/t=0.2$) dengan variasi panjang aksial benda ($c/t = 6,5$ dan 10) serta bilangan Reynolds ($Re_t = 6,76 \times 10^4$ dan $10,15 \times 10^4$). hasil dari penelitian ini adalah dengan Bilangan Reynolds yang lebih besar dan bidang tumpu aliran yang lebih panjang mampu membuat aliran mengalami *reattachment* lebih awal dan dimensi *separation bubble* yang lebih kecil. hal ini membuat aliran yang melewati benda mengalami transisi *boundary layer* lebih awal sehingga momentum aliran semakin bertambah untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*.

Kata Kunci—*Bubble Separation*, Reduksi Gaya Drag, Transisi *Boundary Layer*, Panjang Bidang Tumpu Aliran.

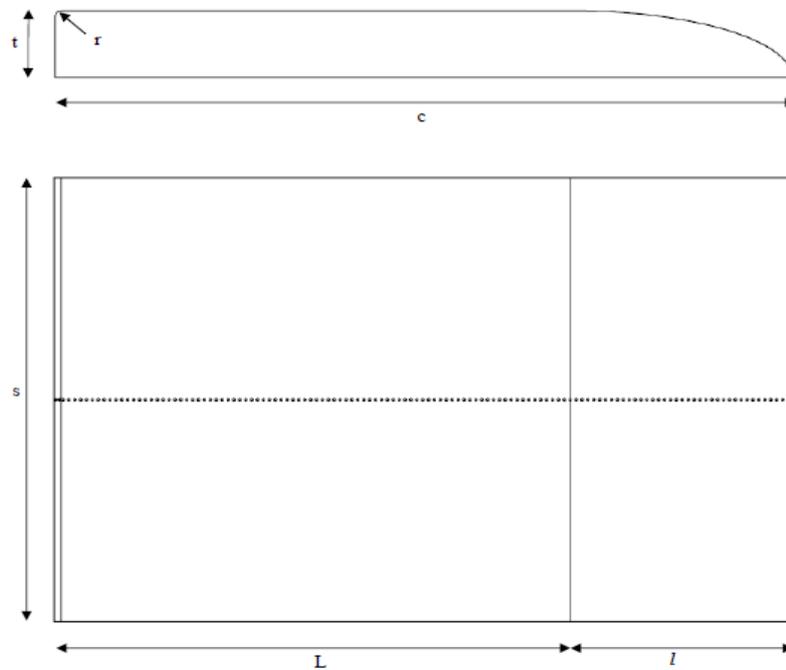
I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN teknologi membuat Engineer di dunia berusaha menciptakan kendaraan dengan performa yang optimal. Hal tersebut salah satunya dapat dicapai dengan penggunaan desain bodi aerodinamis sebagai upaya mereduksi gaya drag pada kendaraan. Terjadinya reduksi gaya drag akan mengurangi energi yang hilang sehingga konsumsi bahan bakar kendaraan menjadi semakin efisien. Salah satu metode untuk mereduksi drag adalah dengan memundurkan titik separasinya dengan cara mempercepat transisi boundary layer dari laminar ke turbulen. Aliran

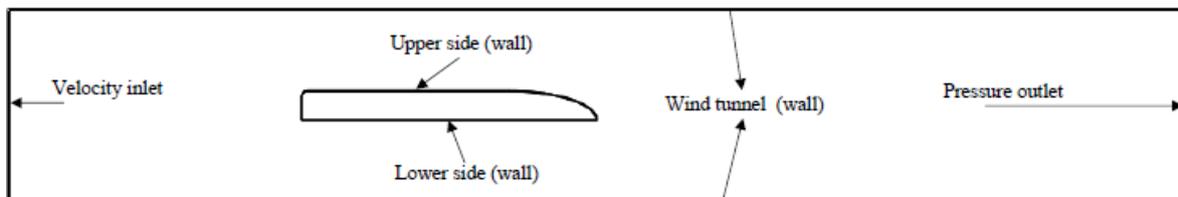
turbulen memiliki momentum yang lebih besar sehingga mampu melawan *adverse pressure* lebih lama dan memundurkan titik separasi lebih jauh. Mempercepat transisi boundary layer dapat dilakukan dengan memaksa aliran untuk bertransisi menggunakan metode *active control*. Selain menggunakan *active control*, metode lain yang bisa dilakukan adalah dengan menggunakan *passive control*. Salah satu bentuk *passive control* adalah pengupayaan transisi boundary layer dari laminar ke turbulen melalui terbentuknya *separation bubble*. *Separation bubble* terbentuk dari proses separasi alian yang Kembali *attach*.

Proses terbentuknya *separation bubble* yang langsung diikuti dengan terbentuknya turbulent boundary layer ini dimanfaatkan untuk menunda atau bahkan dapat meniadakan terjadinya separasi aliran masif pada *downstream*. Salah satu penelitian mengenai hal ini adalah penelitian yang dilakukan oleh Samson et al., yang meneliti tentang separasi *bubble* yang terbentuk pada *flat plate* dengan *leading edge* berbentuk semi sirkular [1]. Penelitian tersebut dilakukan pada *low-speed wind tunnel* dengan variasi *Reynold number* antara 25000 hingga 75000. Penelitian itu menunjukkan bahwa *laminar flow* terjadi pada 20% dari total *separation length* pada *bubble*, setelah itu terbentuk turbulent boundary layer. Panjang *bubble* yang terbentuk berkembang lebih besar sebanding dengan nilai RE.

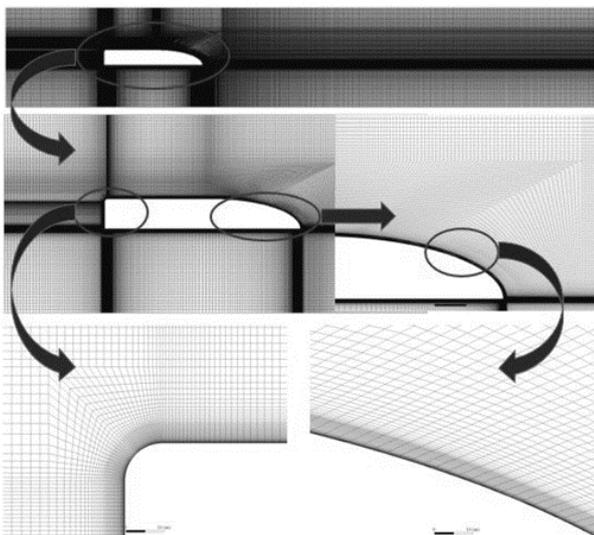
Terbentuknya aliran turbulen menaikkan momentum pada aliran tersebut sehingga mampu melawan *adverse pressure* lebih besar. Penelitian lain yang dilakukan oleh Aribowo mengenai mekanisme *stall* akibat tumbuh, berkembang, dan pecahnya separasi *bubble* pada permukaan sayap NACA 0017 [2]. Variasi pada penelitian ini adalah *Reynold number* pada nilai $7,1 \times 10^4$ dan $1,06 \times 10^5$ serta sudut serang (angle of attack) mulai dari sudut 0° hingga mencapai sudut *stall*-nya dengan interval 2° . Hasil yang didapat adalah penambahan sudut serang akan menyebabkan terjadinya separasi *bubble* dan penambahan sudut serang mengakibatkan titik separasi dan titik *reattachment* pada separasi *bubble* bergeser menuju *leading edge* hingga menimbulkan efek *stall*. Penelitian lain juga dilakukan oleh Herbst et al., tentang Analisa *bubble separation* pada airfoil NACA SD7003 dengan *chord* $c = 0,2$



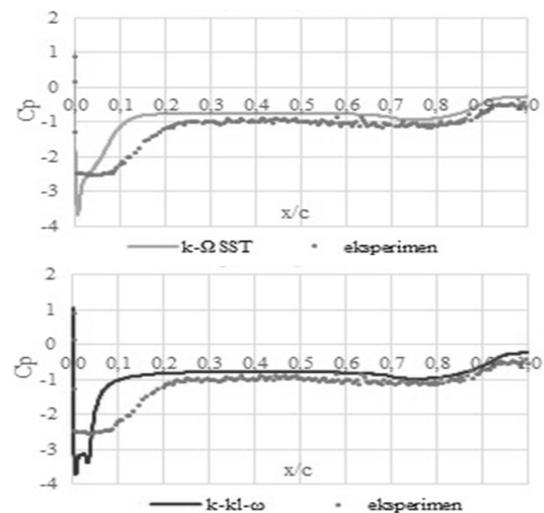
Gambar 1. Parameter Pengukuran Benda Uji.



Gambar 2. Boundary Condition Benda Uji.



Gambar 3. Meshing



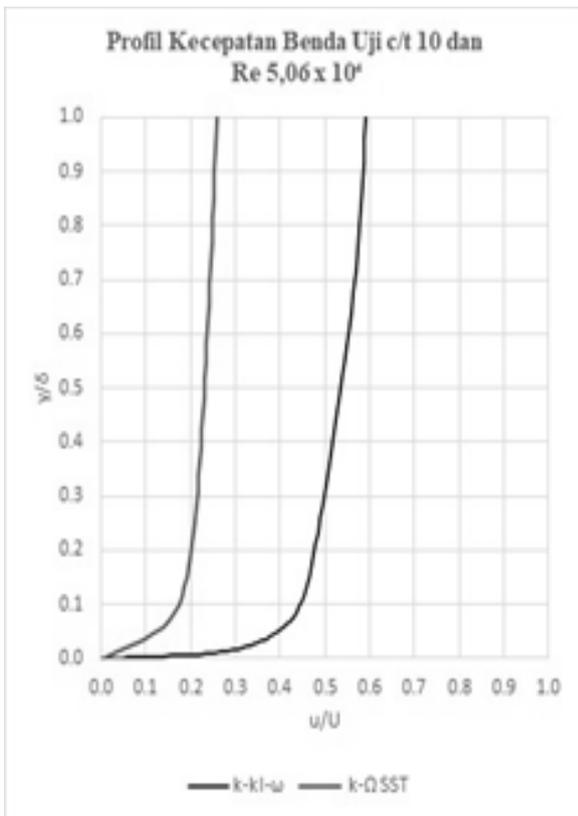
Gambar 4. Grafik Cp perbandingan antara simulasi numerik dengan Eksperimen (a) K-Ω SST (b) k-k1-ω

cm dan variasi *angle of attack* antara 4 hingga 16 derajat diuji pada *Reynold number* 60.000 [3]. Hasil yang didapat adalah terbentuk *bubble separation* pada *leading edge* dengan intensitas turbulensi sebesar 10% pada suction side. Dari ketiga penelitian di atas dapat di simpulkan bahwa separasi *bubble* mampu memintas transisi dari laminar ke turbulen sehingga momentum yang di dapat menjadi lebih besar dan energi untuk melawan *adverse pressure gradient* menjadi lebih besar.

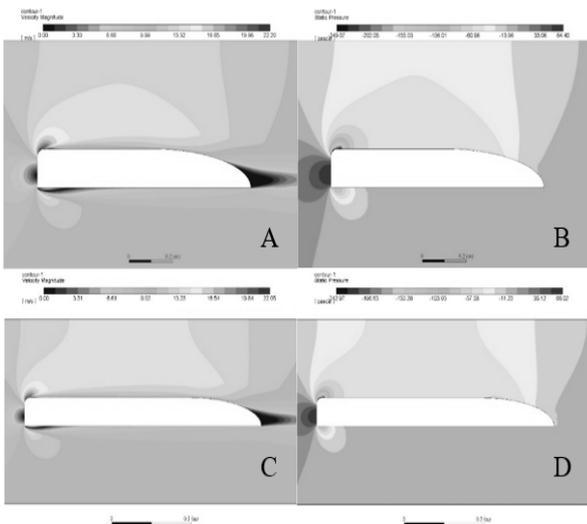
Bubble Separation terbentuk sebagai hasil dari aliran yang terseparasi kemudian *reattach*. Kemampuan aliran untuk

reattach dipengaruhi oleh adanya penambahan energy (*entrainment energy*) yang didapatkan dari *primary flow* (*primary flow*) dan adanya kesempatan bagi aliran yang terseparasi untuk *reattach* melalui bidang tumpu aliran dibelakang yang cukup panjang.

Penelitian mengenai pengaruh *Reynolds number* ataupun bentuk *Leading edge* telah banyak dikemukakan, namun penelitian mengenai kombinasi pengaruh *dynamic force* aliran yang direpresentasikan oleh *Reynolds number* pada bentuk *leading edge* tertentu serta panjang bidang tumpu aliran hampir tidak pernah dikemukakan. Panjang bidang



Gambar 5. Grafik Velocity Profile Perbandingan Antara Simulasi Numerik dengan Eksperimen antara K- ω SST dan k-kl- ω

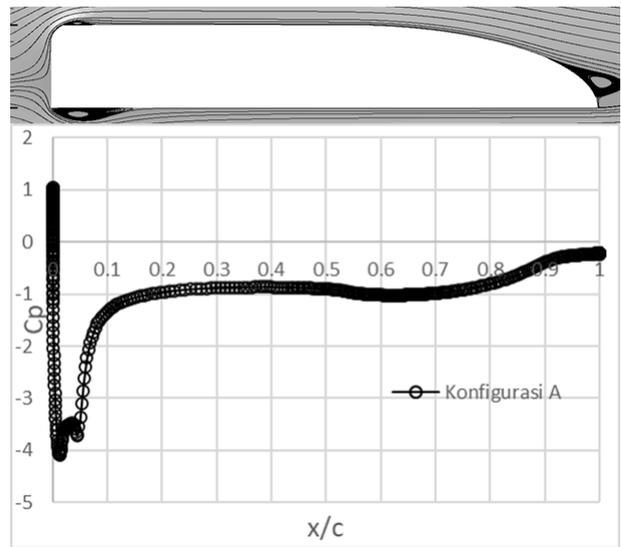


Gambar 6. Kontur Warna Velocity dari Konfigurasi Uji A, B, C, dan D

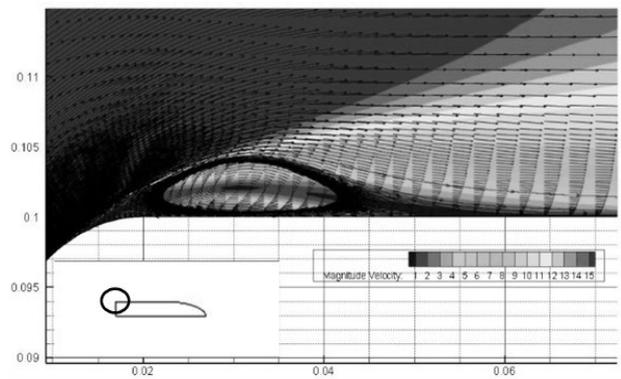
tumpu aliran merupakan jarak antara dua titik potensi separasi aliran depan dan belakang. Penambahan panjang bidang tumpu aliran di belakang *leading edge* diduga dapat memperbesar kesempatan aliran untuk *reattach*. Fenomena ini sangat menarik untuk diteliti lebih jauh karena dengan mempercepat *reattachment* akan memundurkan separasi *massive* di belakangnya.

II. URAIAN PENELITIAN

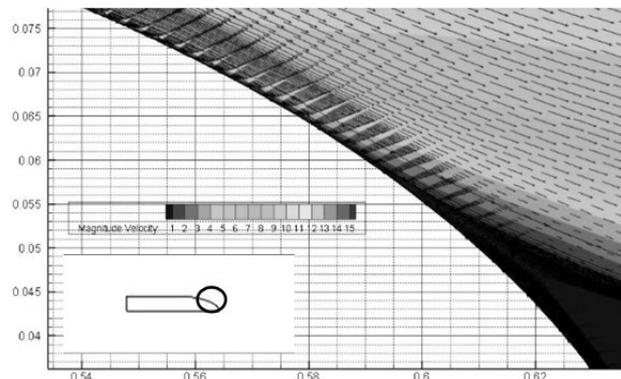
Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dan simulasi numerik dua dimensi menggunakan benda uji dengan panjang *chord* (c) 650 mm dan 1000 mm, lebar (b) 660 mm dan tebal (t) 100 mm seperti pada gambar 1 yang diujikan pada



Gambar 7. Grafik Cp dan Visualisasi Aliran Konfigurasi A.



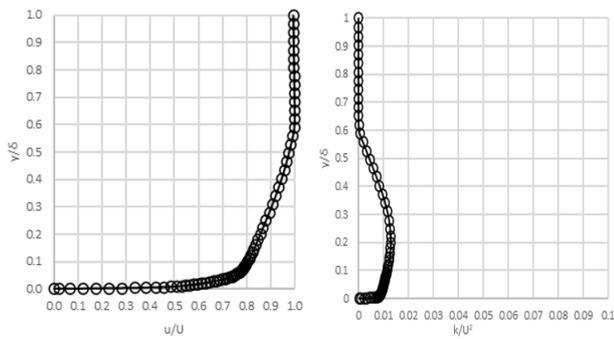
Gambar 8. Vektor Aliran pada *Leading Edge*



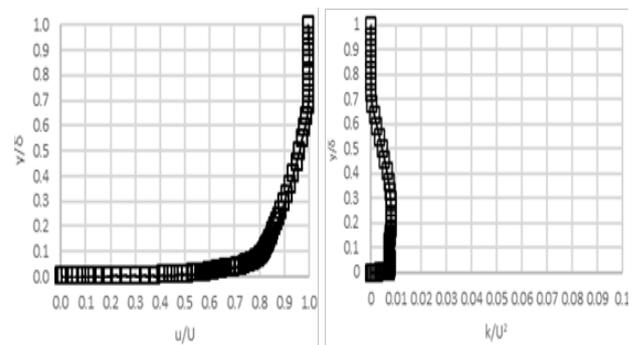
Gambar 9. Vektor Aliran pada *Trailing Edge*

bilangan Reynolds $6,76 \times 10^4$ dan $10,15 \times 10^4$. Panjang *chord* tersebut terdiri dari panjang *trailing edge* (l) 300 mm dan bidang tumpu aliran (L) yang divariasikan sebesar 350 mm dan 700 mm. Hasil yang akan diambil dari penelitian ini adalah visualisasi aliran, tekanan statis yang nantinya akan diolah menjadi grafik koefisien tekanan, juga profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy* yang hanya diukur pada *midspan upsides* benda uji saja.

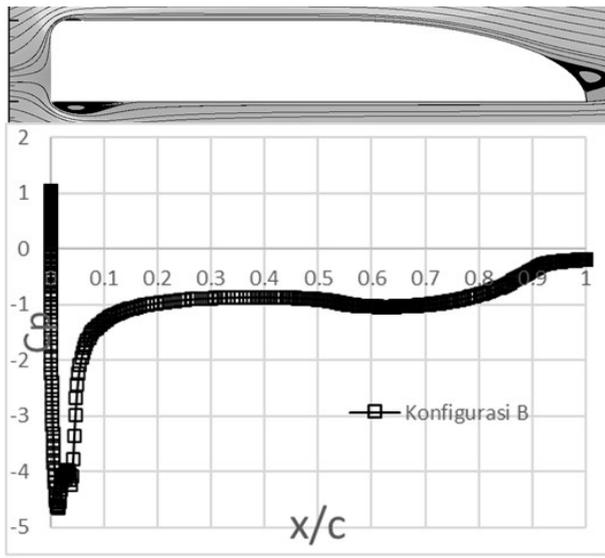
Dari konfigurasi benda uji diatas, disusun konfigurasi penelitian sebagai berikut: Konfigurasi A ($c/t=6,5$ dan $Re_t=6,76 \times 10^4$), Konfigurasi B ($c/t=6,5$ dan $Re_t=10,15 \times 10^4$), Konfigurasi C ($c/t=10$ dan $Re_t=6,76 \times 10^4$) dan Konfigurasi D ($c/t=10$ dan $Re_t=10,15 \times 10^4$). Konfigurasi di atas dibuat sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk melihat



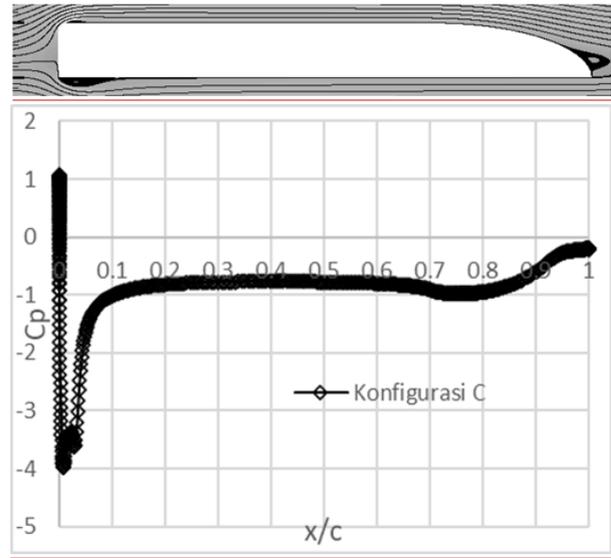
Gambar 10. Velocity Profile dan Turbulent Kinetic Energy pada Konfigurasi A



Gambar 12. Velocity Profile dan Turbulent Kinetic Energy pada Konfigurasi B



Gambar 11. Grafik Cp dan Visualisasi Aliran Konfigurasi B



Gambar 13. Grafik Cp dan Visualisasi Aliran Konfigurasi C

pengaruh antara konfigurasi dengan karakteristik *separation bubble*.

A. Metode Eksperimen

Eksperimen dilakukan pada *windtunnel* Lantai 3 Departemen Teknik Mesin ITS. Pengambilan data dilakukan pada *upper side* benda uji. Data yang diambil berupa tekanan statis. data diambil menggunakan 220 *wall pressure tap* yang dihubungkan dengan *pressure transducer* setelah divalidasi dengan manometer. Pemasangan *wall pressure tap* di *midspan* benda uji. Tekanan statis yang telah didapatkan akan digunakan sebagai validasi model turbulen dan simulasi.

B. Metode Simulasi Numerik

Simulasi Numerik dilakukan secara dua dimensi dengan menggunakan *software* ANSYS Fluent dengan *mesh* yang telah dilakukan uji *Grid Independency*. Model Turbulen yang digunakan adalah *k-kl-ω* yang merupakan model turbulen yang cocok digunakan untuk menangkap fenomena transisi *boundary layer* aliran dari laminar menjadi turbulen.

Hasil yang didapatkan dari simulasi numerik berupa tekanan statis, *velocity profile*, *turbulent kinetic energ*, dan visualisasi *streamline* aliran. *Velocity profile* dan *turbulent kinetic energy* diukur pada titik O yang berjarak 300 mm dari *leading edge*. kedua data di atas digunakan untuk menentukan nilai *Shape factor (H)* aliran menggunakan persamaan berikut.

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \tag{1}$$

Dimana dengan pendekatan integrasi numerik trapesium, *displacement thickness* (δ^*) dan *momentum thickness* (θ) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\delta^* = \left[\sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \left(\frac{u}{U} \right)_i \Delta \left(\frac{y}{\delta} \right)_i \right\} \right] \tag{2}$$

$$\theta = \delta \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{u}{U} \right)_i \left\{ 1 - \left(\frac{u}{U} \right)_i \Delta \left(\frac{y}{\delta} \right)_i \right\} \right] \tag{3}$$

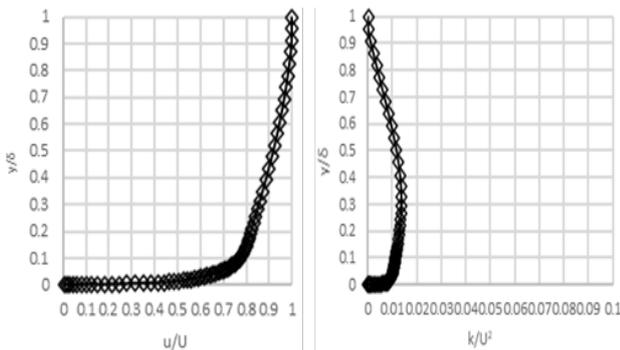
Perhitungan *shape factor* dilakukan pada ketebalan *boundary layer* 99% *Inviscid* dan digunakan untuk membuktikan apakah aliran tersebut sudah bertransisi menjadi turbulen setelah mengalami *reattachment*.

III. HASIL DAN DISKUSI

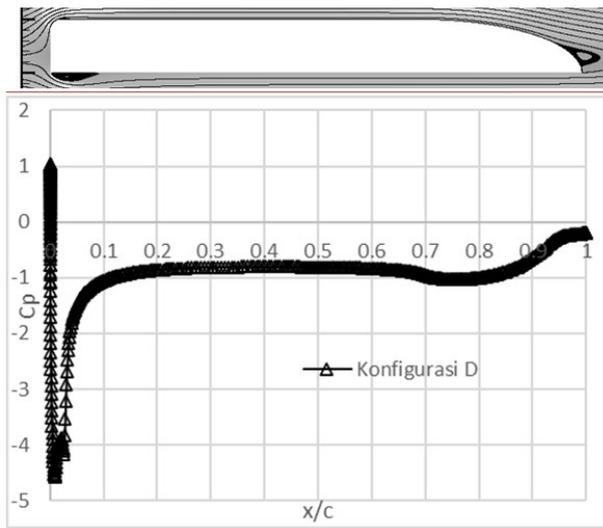
A. Validasi

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

Jika diperhatikan, kedua grafik memiliki trendline yang hampir sama mulai dari $x/c = 0,2$ sampai $x/c = 1$. Namun



Gambar 14. Velocity Profile dan Turbulent Kinetic Energy pada Konfigurasi C



Gambar 15. Grafik Cp dan Visualisasi Aliran Konfigurasi D

trendline yang berbeda ditunjukkan pada $x/c = 0$ hingga $x/c = 0,1$ dimana nilai C_p pada grafik $k-\omega$ lebih besar daripada $k-\omega$ sst. Walaupun perbedaan nilai C_p antara hasil numerik $k-\omega$ dengan hasil eksperimen lebih besar, namun saya menganggap bahwa hasil numerik ini mampu menunjukkan fenomena aliran yang mendekati sama dengan hasil eksperimen. Fenomena tersebut adalah adanya proses separasi masif yang gagal terjadi setelah melewati *leading edge*, ditunjukkan dengan melandainya kenaikan nilai koefisien tekanan setelah melewati daerah akselerasi dan dilanjutkan dengan terbentuknya *separation bubble* yang menandakan terjadinya proses *reattachment*.

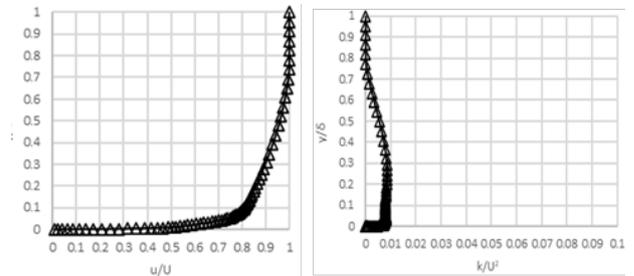
Setelah melewati titik *reattachment*, kedua grafik tersebut memiliki kecenderungan yang sama seperti saat melewati plat datar hingga mengalami separasi masif di buritan. Sehingga saya memilih simulasi numerik dengan model turbulen $k-\omega$ sebagai metode numerik yang cocok untuk eksperimen kali ini.

Selanjutnya dilakukan juga perbandingan *velocity profile* antara kedua model turbulen yang diambil pada titik O. dengan perbandingan ini didapatkan bahwa model turbulen yang cocok adalah $k-\omega$

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

Tabel 1.
Analisa Karakteristik Aliran

Konfigurasi	A	B	C	D
Titik <i>reattachment</i> (x/c)	0.1249	0.1124	0.0792	0.0694
Panjang <i>separation bubble</i> (x/c)	0.103	0.0879	0.0671	0.0554
Tinggi <i>separation bubble</i> (x/c)	0.013	0.0095	0.0067	0.0051
Sudut <i>separation bubble</i> (°)	27°	20°	25°	19°
<i>Shape factor</i>	13,027	12,285	1.3077	1.2981

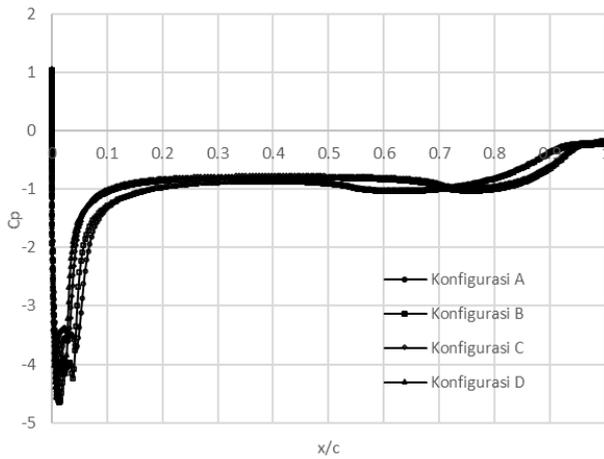


Gambar 16. Velocity Profile dan Turbulent Kinetic Energy pada Konfigurasi D

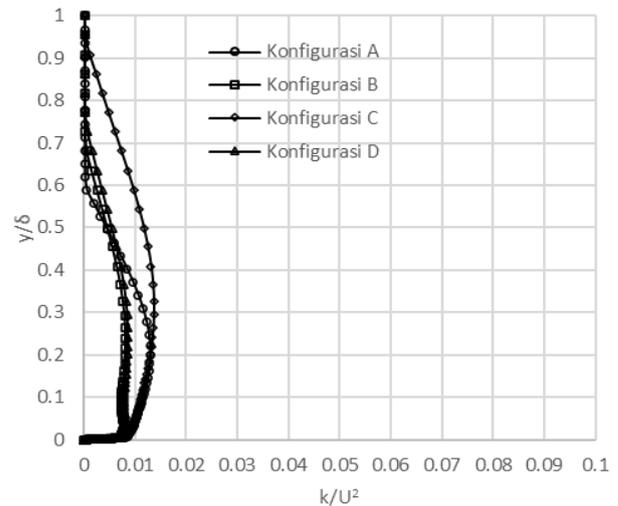
B. Gambaran Umum

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

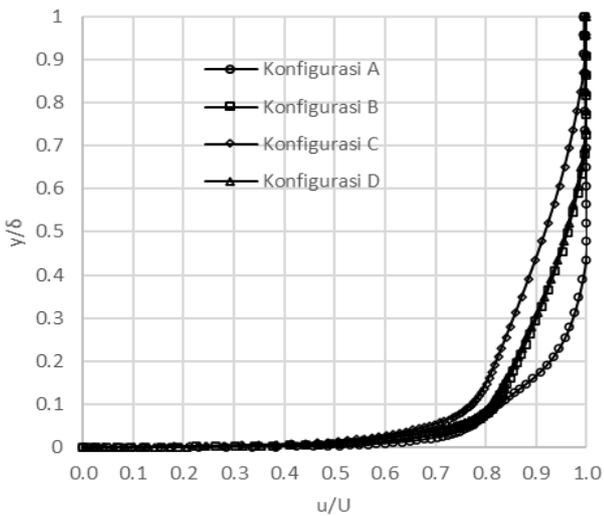
Streamline aliran pada *freestream* kemudian mengalami fenomena yang berbeda – beda. Aliran yang menabrak tepat di titik tengah penampang benda akan mengalami stagnasi sehingga menghasilkan tekanan yang sangat besar pada permukaan benda seperti yang ditunjukkan pada kontur tekanan pada gambar (b). Sedangkan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



Gambar 17. Grafik Cp Perbandingan Antara Konfigurasi A, B, C, dan D



Gambar 19. perbandingan *turbulent kinetic energy* pada keempat konfigurasi (A, B, C dan D)



Gambar 18. perbandingan *velocity profile* pada keempat konfigurasi (A, B, C dan D)

aliran yang terseparasi tidak akan Kembali menuju *surface* dan menjadi separasi masif.

Jika dilihat pada Gambar 6, keempat konfigurasi memiliki kecenderungan yang sama. Pengujian dengan nilai Re_t yang lebih besar ($Re_t=10.15 \times 10^4$) akan menghasilkan ukuran *separation bubble* yang lebih kecil daripada pengujian dengan nilai Re_t lebih rendah ($Re_t=6.76 \times 10^4$). hal ini juga dapat diartikan bahwa pengujian dengan nilai Re_t yang lebih besar akan membuat aliran mengalami *reattachment* lebih dulu. Kondisi ini diyakini mampu memundurkan titik separasi massif di daerah buritan. Lebih jauh, keempatnya dibandingkan, maka dapat diketahui bahwa pengujian pada bidang tumpu aliran yang lebih panjang ($c/t=10$) memiliki dimensi *separation bubble* dan daerah *wake* yang lebih sempit.

C. Analisa Karakteristik

C_p merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan tekanan statis pada permukaan benda uji. Grafik C_p kemudian dianalisa untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada konfigurasi uji. Hasil Analisa yang diharapkan adalah titik *reattachment*, titik separasi massif di daerah buritan, dan kondisi aliran di atas bidang tumpu berupa profil kecepatan dan *turbulent kinetic energy*. Berikut disajikan grafik C_p simulasi dan eksperimen pada konfigurasi uji $c/t=6.5$ dan

$Re_t=6.76 \times 10^4$ pada Gambar 7. Pada grafik di atas, dapat diketahui bahwa aliran mengalami penurunan nilai C_p yang sangat drastis. Hal ini terjadi karena aliran memasuki daerah *convergence streamtube* sehingga aliran dipercepat secara mendadak. Tepat setelah meninggalkan *rounded leading edge*, *streamtube* melebar hingga membentuk *divergence region* dan memperlambat aliran secara mendadak pula dan menghasilkan perubahan nilai C_p yang drastis. Setelah naik, grafik C_p mendatar sesaat kemudian naik secara perlahan hingga akhirnya mendatar. Pada saat grafik C_p mendatar sesaat, terjadi proses transisi boundary layer aliran dari laminar menjadi turbulen. Pada saat grafik C_p mengalami kenaikan secara perlahan, terjadi proses *reattachment* aliran yang terseparasi dengan bantuan *entrainment energy* dari *primary flow* hingga aliran Kembali *attach* pada *surface* dan membentuk *separation bubble*. Grafik C_p setelahnya menunjukkan trendline yang datar di sepanjang bidang tumpu. Selanjutnya, grafik C_p mengalami kenaikan secara perlahan hingga grafik C_p mendatar. Pada saat grafik C_p mengalami kenaikan, aliran memasuki *trailing edge*. daerah ini memiliki *adverse pressure* yang sangat besar. oleh karena aliran sudah tidak mampu melawan *adverse pressure* di daerah *trailing edge*, maka aliran terdefleksi menjauhi *surface* dan menjadi separasi masif.

Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada $x/c=0,01216$ dengan $C_p=-4,0859$. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada $x/c=0,124884$ dengan $C_p=-1,16107$. Lebih jauh, separasi masif pada *trailing edge* terjadi pada $x/c=0,926$ dengan $C_p=-0,2942$. Dari analisa ini didapatkan juga dimensi *bubble* mulai dari tebal maksimum *bubble*, panjang *bubble*, dan sudut *bubble* yang disajikan pada Tabel 1.

Selanjutnya disajikan visualisasi vector kecepatan pada Konfigurasi A sebagai referensi visual fenomena yang terjadi pada daerah *leading edge* dan *trailing edge*.

Visualisasi ini bertujuan untuk menunjukkan fenomena aliran yang terjadi pada kedua daerah. Pada gambar 8 dapat dilihat bahwa ada beberapa panah pada profil kecepatan di daerah *bubble* yang berlawanan arah dengan panah di atasnya. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi *circulating flow* (aliran berputar) pada daerah di dalam *bubble*. Dapat dilihat bahwa terdapat beberapa panah pada profil kecepatan yang

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

Selain menganalisa grafik C_p , karakteristik aliran juga dapat dianalisa melalui *velocity profile* dan *turbulent kinetic energy* pada titik O. Analisa ini bertujuan untuk mengetahui apakah aliran telah bertransisi menjadi turbulen. dengan perhitungan didapatkan nilai *shape factor* pada Tabel 1. Selanjutnya disajikan Grafik C_p untuk konfigurasi B pada Gambar 11.

Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada $x/c=0,01317$ dengan $C_p=-4,6482$. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada $x/c=0,11$ dengan $C_p=-1,2298$. Lebih jauh, separasi massif pada *trailing edge* terjadi pada $x/c=0,933$ dengan $C_p=-0,2453$. Dari analisa ini didapatkan juga dimensi *bubble* mulai dari tebal maksimum *bubble*, panjang *bubble*, dan sudut *bubble* yang disajikan pada Tabel 1.

Selain menganalisa grafik C_p , karakteristik aliran juga dapat dianalisa melalui *velocity profile* dan *turbulent kinetic energy* pada titik O. analisa ini bertujuan untuk mengetahui apakah aliran telah bertransisi menjadi turbulen. dengan perhitungan didapatkan nilai *shape factor* pada Tabel 1.

Selanjutnya disajikan Grafik C_p untuk konfigurasi C pada Gambar 13. Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada $x/c=0,0084$ dengan $C_p=-3,9804$. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada $x/c=0,0792$ dengan $C_p=-1,1265$. Lebih jauh, separasi massif pada *trailing edge* terjadi pada $x/c=0,9541$ dengan $C_p=-0,2561$. Dari analisa ini didapatkan juga dimensi *bubble* mulai dari tebal maksimum *bubble*, panjang *bubble*, dan sudut *bubble* yang disajikan pada Tabel 1.

Selain menganalisa grafik C_p , karakteristik aliran juga dapat dianalisa melalui *velocity profile* dan *turbulent kinetic energy* pada titik O. analisa ini bertujuan untuk mengetahui apakah aliran telah bertransisi menjadi turbulen. dengan perhitungan didapatkan nilai *shape factor* pada Tabel 1.

Selanjutnya disajikan Grafik C_p untuk konfigurasi D pada Gambar 15. Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan terendah terjadi pada $x/c=0,0089$ dengan $C_p=-4,565$. Aliran yang terseparasi di depan mengalami *reattachment* pada $x/c=0,0694$ dengan $C_p=-1,232$. Lebih jauh, separasi massif pada *trailing edge* terjadi pada $x/c=0,957$ dengan $C_p=-0,2461$. Dari analisa ini didapatkan juga dimensi *bubble* mulai dari tebal maksimum *bubble*, panjang *bubble*, dan sudut *bubble* yang disajikan pada Tabel 1.

Selain menganalisa grafik C_p , karakteristik aliran juga dapat dianalisa melalui *velocity profile* dan *turbulent kinetic energy* pada titik O. analisa ini bertujuan untuk mengetahui apakah aliran telah bertransisi menjadi turbulen. dengan perhitungan didapatkan nilai *shape factor* pada Tabel 1. Untuk mempermudah penarikan kesimpulan dari analisa diatas, maka semua data di satukan dalam Tabel 1.

D. Diskusi

Untuk memahami bagaimana pengaruh dari bilangan Reynolds dan panjang bidang tumpu aliran terhadap karakteristik aliran yang melintasi benda di tersebut, maka data dari seluruh konfigurasi perisil dibandingkan. berikut ini

disajikan grafik yang membandingkan konfigurasi A, B, C, dan D yang telah dibahas sebelumnya.

Dari Gambar 17, dapat diketahui bahwa penambahan bahwa dengan panjang bidang tumpu aliran terbukti dapat memengaruhi *reattachment* menjadi lebih awal, seperti pada konfigurasi A dan C serta konfigurasi B dan D. jika merujuk pada nilai kuantitatif pada Tabel 1, maka dapat di simpulkan bahwa dengan panjang bidang tumpu aliran yang sama, kenaikan nilai *reynolds number* akan membuat titik *reattachment* aliran semakin maju, yang menandakan bahwa kenaikan nilai *Reynolds number* terbukti mampu membuat *reattachment* aliran semakin awal sehingga memintaskan aliran untuk bertransisi menjadi turbulen. Kenaikan nilai *reynolds number* juga terbukti mampu memundurkan titik separasi karena naiknya *turbulent kinetic energy* pada aliran sehingga lebih mampu untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*. Selain itu, *Reynolds number* juga mempengaruhi dimensi *bubble*, dimana *bubble* akan menjadi lebih pendek dan tipis seiring dengan kenaikan nilai *Reynolds number*. Dari tabel yang sama, dapat pula disimpulkan bahwa dengan nilai *Reynolds number* yang sama, penambahan panjang bidang tumpu aliran mampu memajukan titik *reattachment* dan memundurkan titik separasi massif di buritan. Hal ini bisa terjadi karena bidang tumpu aliran yang lebih panjang memberikan kesempatan bagi aliran untuk berelaksasi dan mentransfer *turbulent kinetic energy* menjadi energi tambahan untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*.

Selain perbandingan Grafik C_p antar konfigurasi, analisa juga dilakukan dengan membandingkan *velocity profile* (Gambar 18) dan *turbulent kinetic energy* (Gambar 19) pada konfigurasi A, B, C, dan D. Gambar 19 menyajikan grafik *turbulent kinetic energy* di titik O untuk semua konfigurasi. Dapat dilihat bahwa konfigurasi D memiliki nilai *turbulent kinetic energy* yang paling besar di antara semua konfigurasi. Hal ini dapat terjadi karena *turbulent kinetic energy* memerlukan beberapa saat untuk meluruhkan fluktuasi pada aliran menjadi energi tambahan untuk melawan *adverse pressure* di buritan. Sehingga, dapat di simpulkan bahwa konfigurasi D merupakan konfigurasi yang paling optimal untuk menunda separasi massif di buritan dan berhasil merepresentasikan hasil pengujian untuk nilai *Reynolds number* yang tinggi dan bidang tumpu aliran yang panjang.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Pada konfigurasi c/t yang sama dengan variasi nilai Re_t ($6,76 \times 10^4$ dan $10,15 \times 10^4$), dalam perbandingan antara konfigurasi A dan B serta Konfigurasi C dan D, dapat disimpulkan bahwa dengan kenaikan nilai Re_t maka separasi massif di daerah *downstream* menjadi lebih mundur. Hal ini bisa terjadi karena aliran mendapatkan energi dari *primary flow* lebih besar sehingga aliran mengalami *reattachment* lebih awal dan transisi *boundary layer* yang lebih awal juga.

Pada konfigurasi Re_t yang sama dengan variasi nilai c/t (6,5 dan 10), dalam perbandingan antara konfigurasi A dan C serta Konfigurasi B dan D, dapat disimpulkan bahwa dengan menambah panjang bidang tumpu aliran di belakang *leading edge* mampu memundurkan titik separasi massif di daerah *downstream*. Hal ini bisa terjadi karena jarak antara *blockage* aliran pada *trailing edge* menjadi lebih jauh sehingga

memberikan kesempatan aliran yang berfluktuasi untuk relaksasi dan mengubah energi fluktuasi menjadi momentum tambahan untuk melawan *adverse pressure* di daerah *downstream*.

Secara keseluruhan, kenaikan Reynolds number dan penambahan panjang bidang tumpu aliran mampu membuat *reattachment* menjadi lebih awal sehingga mempercepat transisi pintas aliran dari laminar menuju turbulen dan memundurkan titik separasi massif di daerah *downstream*.

REFERENCES

- [1] A. Samson, S. Sarkar, and K. Anand, "Experimental investigation of a separation bubble on a flat plate with semi-circular leading edge for different Reynolds numbers," in *9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT 2012)*, 2012, pp. 316–325.
- [2] A. Aribowo, "Penelitian mekanisme stall akibat perkembangan gelembung separasi pada sayap NACA 0017 secara eksperimen di terowongan angin subsonik," *J. Teknol. Dirgant.*, vol. 2, no. 2, pp. 82–88, 2010, doi: 10.30536/j.tjd.2004.v2.a803.
- [3] S. L. Herbst, C. J. Kähler, and R. Hain, "Influence of large-scale free-stream turbulence on an SD7003 airfoil at low Reynolds numbers," 2018, doi: 10.2514/6.2018-3490.