



Jurnal Artikel

Analisis Lift Performance Sayap Pesawat Terhadap Penambahan Winglet dan Variasi Aspect Ratio

Muhammad Farhan Abidin^{1*}, Bobie Suhendra², Aripin³

¹Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang

²Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang

³Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang

¹1910631150108@student.unsika.ac.id, ²bobie.suhendra@ft.unsika.ac.id, ³arifin@staff.unsika.ac.id

*Corresponding author – Email : 1910631150108@student.unsika.ac.id

Artikel Info - : Received : ; Revised : ; Accepted:

Abstrak

Sayap merupakan komponen vital dalam sebuah pesawat terbang karena berperan dalam terbentuknya gaya angkat pesawat. Sayap pesawat juga memiliki beragam parameter yang bertujuan menunjang performa gaya angkat pesawat, seperti aspect ratio, taper ratio, sudut sibak dan sudut twist. Dalam penelitian ini parameter aspect ratio dianalisis lebih dalam untuk melihat pengaruhnya terhadap lift performance sayap seperti C_l dan C_d . Selain itu, efek penambahan winglet akan ikut dikaji dalam penelitian ini karena komponen ini umum ditemui pada sayap pesawat saat ini yang ditujukan untuk meningkatkan efisiensi aerodinamis sayap. Sebagai bahan analisis, sayap pesawat CN-235 dipilih dalam analisis ini. Analisis dilakukan dengan metode simulasi menggunakan Ansys Fluent untuk memperoleh karakteristik C_l dan C_d . Metode ini menghasilkan geometri, perilaku aliran, serta karakteristik aerodinamika sayap dengan menggunakan persamaan RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) dengan model turbulen. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan menggabungkan variasi aspect ratio dan penambahan winglet pada planform sayap maka menghasilkan sayap yang mampu meraih sudut serang maksimum yang lebih rendah dari variasi sayap yang lain dan koefisien lift yang lebih tinggi. Selain itu, sayap juga mampu menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi pada jenis sayap dengan winglet.

Kata Kunci: aspect ratio; efisiensi; koefisien drag; koefisien lift; winglet.

Abstract

Wings are a vital component in an airplane because they play a role in the formation of the aircraft's lift force. Airplane wings also have various parameters that aim to support the performance of aircraft lift, such as aspect ratio, taper ratio, offset angle and twist angle. In this study the aspect ratio parameter was analyzed more deeply to see its effect on wing lift performance such as C_l and C_d . In addition, the effect of adding winglets will also be studied in this study because these components are commonly found on current aircraft wings which are intended to increase wing aerodynamic efficiency. As an analysis material, the CN-235 aircraft wing was chosen in this analysis. The analysis was carried out using a simulation method using Ansys Fluent to obtain the characteristics of C_l and C_d . This method produces geometry, flow behavior, and aerodynamic characteristics of the wing using the RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) equation with the turbulent model. The results of the analysis show that combining aspect ratio variations and adding winglets to the wing planform results in a wing capable of achieving a lower maximum angle of attack than other wing variations and a higher lift coefficient. In addition, the wings are also able to produce higher efficiency on the types of wings with winglets.

Keywords: aspect ratio; efficiency; drag coefficient; lift coefficient; winglets.

1. PENDAHULUAN

Pesawat CN 235 adalah sebuah pesawat transportasi taktis yang dikembangkan oleh perusahaan penerbangan Indonesia, IPTN

(sekarang dikenal sebagai PT Dirgantara Indonesia) bekerja sama dengan perusahaan penerbangan Spanyol, CASA (sekarang dikenal sebagai Airbus Military) [1]. Pesawat ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1983 dan telah digunakan oleh berbagai negara di seluruh dunia. CN 235 dirancang sebagai pesawat dengan kemampuan serbaguna, dapat digunakan untuk berbagai misi termasuk transportasi penumpang dan kargo, misi SAR (*Search And Rescue*), pemadam kebakaran, pengintaian maritim, patroli perbatasan, dan ragam kegunaan lainnya. Pesawat ini memiliki kemampuan operasi dari landasan pacu yang pendek dan tidak beraspal, membuatnya cocok untuk operasi di daerah terpencil atau wilayah dengan infrastruktur yang terbatas.

Kemampuan pesawat ini dalam melakukan berbagai misi direpresentasikan melalui prestasi terbang pesawat tersebut. Prestasi terbang mengacu pada kecepatan maksimum pesawat, jarak maksimum yang dapat ditempuh, kapasitas penumpang, efisiensi, serta kestabilan dan manuverabilitas pesawat. Prestasi terbang tersebut berhubungan dengan peran sayap pesawat yang akan memengaruhi prestasi terbang. Hal ini dikarenakan pada sayap tertumpu hampir seluruh beban yang ada seperti gaya aerodinamik, gaya inersial, dan gaya propulsi.

Untuk menanggung seluruh beban pada pesawat maka perlu untuk memperhatikan parameter-parameter yang ada pada sayap. Parameter penting pada sayap pesawat adalah *aspect ratio*, *taper ratio*, sudut dihedral, sudut sibak, dan sudut *twist*. Pada penelitian ini parameter sayap yang diteliti adalah *aspect ratio* yang akan diuji. Selain *aspect ratio* variabel lainnya yang akan dikaji adalah efek penambahan *winglet* pada setiap variasi *aspect ratio*. Tujuan penelitian ini dilakukan untuk mengetahui *lift performance* pesawat berupa koefisien *lift* (C_l), koefisien *drag* (C_d), dan efisiensi aerodinamis (η). Proses penghitungan *lift performance* dilakukan dengan melaksanakan proses simulasi

menggunakan Ansys Fluent [2].

Sayap pesawat terbang merupakan komponen vital yang berperan penting dalam prosesnya untuk mengangkat badan pesawat dan menerbangkan pesawat terbang menuju tujuannya. Sayap pesawat terbang dalam prinsipnya yang paling sederhana berfungsi untuk menghasilkan gaya angkat melalui bentuknya yang aerodinamis [3][4]. Sayap sebagai penghasil utama gaya angkat, tersusun atas airfoil di seluruh luasan sayap [5].

Pada bagian ujung sayap umumnya terjadi aliran turbulen yang biasa disebut *wingtip vortex*. Ini merupakan fenomena aliran udara menggulung ke belakang pada ujung sayap yang dikarenakan perbedaan tekanan pada bagian atas dan bawah sayap pesawat. Pergerakan aliran yang menggulung ke belakang (*downstream*) terjadi akibat gerak maju pesawat [6].

Aspect ratio merupakan perbandingan kuadrat panjang bentang sayap (*wingspan*) terhadap panjang sayap dari depan ke belakang (*chord*) [6]. Berdasarkan penjelasan berikut, *aspect ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$AR = \frac{b^2}{s}$$

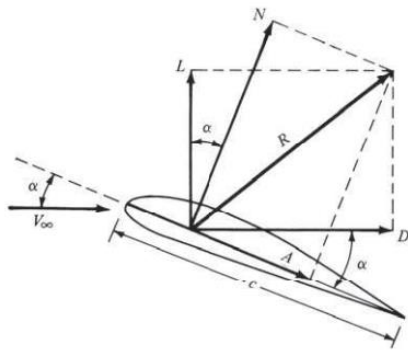
(1)

Dimana berdasarkan rumusan di atas dapat terlihat bahwa *aspect ratio* yang lebih tinggi akan memiliki gaya hambat yang lebih rendah pada kondisi gaya angkat tertentu dibandingkan dengan sayap yang memiliki luas yang sama namun lebih pendek dan lebar.

Aerodinamika merupakan suatu cabang ilmu dinamika fluida dan gas yang mempelajari pergerakan udara khususnya saat berinteraksi dengan benda padat. Interaksi ini menimbulkan gaya aerodinamis yang timbul akibat gesekan udara dengan sayap pesawat terbang sehingga terjadi perbedaan tekanan antara permukaan sayap bagian atas dan bagian bawah [7]. Setidaknya terdapat dua gaya yang timbul yaitu, gaya angkat pesawat (*lift*) dan gaya hambat pesawat (*drag*).

Gaya angkat pesawat (L) timbul akibat

dari resultan gaya (R) yang tegak lurus terhadap kecepatan aliran bebas (V_∞) yang dalam hal ini adalah kecepatan udara. Sedangkan gaya hambat (D) pesawat timbul akibat resultan gaya (R) yang sejajar dengan kecepatan aliran bebas. Selain itu terdapat gaya normal (N) yang merupakan gaya yang timbul dari resultan gaya (R) yang tegak lurus terhadap *chord* (c). Sedangkan gaya aksial (A) timbul akibat resultan gaya (R) yang sejajar dengan *chord* (c). Hubungan geometrik antar gaya dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 1. Hubungan geometrik gaya aerodinamika [8]

Berdasarkan hubungan geometrik gaya aerodinamika yang ditampilkan pada gambar di atas, dapat digambarkan suatu hubungan gaya melalui formulasi persamaan berikut [9]:

$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \quad (2)$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha \quad (3)$$

dimana α merupakan sudut serang dari sayap pesawat.

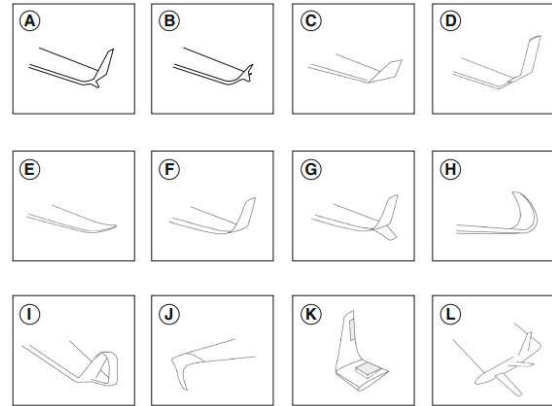
Pengetahuan mengenai gaya-gaya aerodinamik sangat penting dalam proses analisis untuk menghasilkan serangkaian perhitungan yang akurat. Namun, banyaknya parameter pengujian dalam menentukan besar gaya-gaya aerodinamik tersebut menjadi sukar untuk ditentukan melalui pengujian eksperimental. Dengan adanya koefisien gaya tak berdimensi, dimensi sayap dapat diperkecil untuk pengujian terowongan angin, karena nilai koefisien gaya tak berdimensinya sama walaupun dengan skala ukuran sayap yang berbeda [10]. Koefisien gaya tak

berdimensi dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$C_L \equiv \frac{L}{q_\infty S} \quad (4)$$

$$C_D \equiv \frac{D}{q_\infty S} \quad (5)$$

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \quad (6)$$



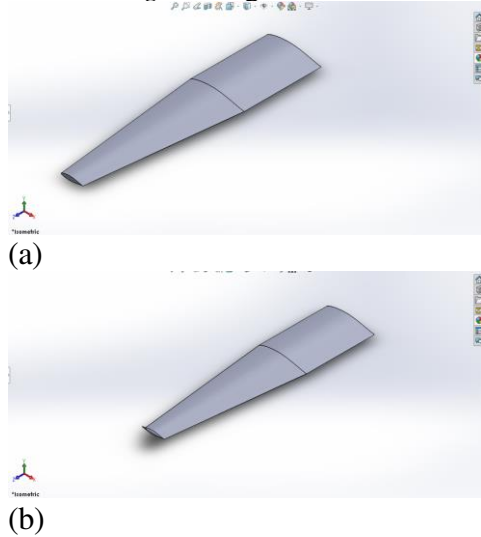
Gambar 2. a Whitcomb winglet. b Tip fence. c Canted winglet. d Vortex diffuser. e Raked winglet. f Blended winglet. g Blended split winglet. h Sharklet. i Spiroid winglet. j Downward canted winglet. k Active winglets. l Tip sails [11]

Pada gambar di atas terlihat beberapa jenis *winglet* yang umum digunakan pada sayap pesawat. Seperti jenis *raked winglet* memiliki bentuk yang sedikit miring atau condong ke belakang. Tipe *winglet* ini dirancang untuk mengurangi turbulensi di ujung sayap dengan mengalihkan aliran udara di sekitar ujung sayap, jenis *winglet* ini diterapkan pada pesawat Boeing 787 Dreamliner menggunakan *raked winglet*. Jenis *winglet* yang umum digunakan selanjutnya adalah *blended winglet* di mana tipe ini memiliki bentuk melengkung yang terintegrasi dengan sayap. Desain ini memberikan transisi yang halus antara sayap dan *winglet*, mengurangi turbulensi dan meningkatkan efisiensi aerodinamis. Jenis *winglet* lainnya adalah *canted winglet* yang dalam penerapannya dapat memvariasikan sudut *cant*, di mana besar sudut *cant* yang baik akan membantu memengaruhi aliran udara di sekitar sayap, mengurangi resistensi induksi dan meningkatkan efisiensi aerodinamis sayap [12]. Hal ini

ditunjukkan oleh penelitian yang dilakukan J. E. Guerrero, M. Sanguineti, K. Wittkowski pada 2020 di mana sudut *cant* yang tepat dapat meningkatkan kurva *lift slope*, meningkatkan gaya angkat maksimum, dan meningkatkan *lift-to-drag ratio*. Sehingga dalam penelitian ini dipilihlah jenis *canted winglet* sebagai tipe *winglet* yang akan diterapkan [11].

2. METODE PENELITIAN

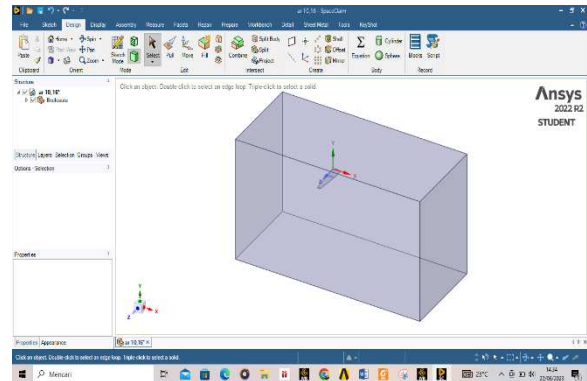
Dalam penelitian ini jenis airfoil yang digunakan adalah NACA 65(3)-218. Airfoil jenis ini merupakan airfoil yang diterapkan pada sayap pesawat CN 235. Airfoil kemudian dikembangkan pada *software* Solidworks untuk membuat desain 3D dari sayap pesawat yang akan diuji. Dalam pengujian ini dibuat 3 variasi *aspect ratio*, yaitu AR 0,4; AR 7,13; dan AR 12 dengan konfigurasi tanpa *winglet* dan menggunakan *winglet*. *Winglet* yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *canted winglet* dengan sudut 45°.



Gambar 3. Desain 3D sayap (a) tanpa *winglet* dan (b) dengan *winglet*

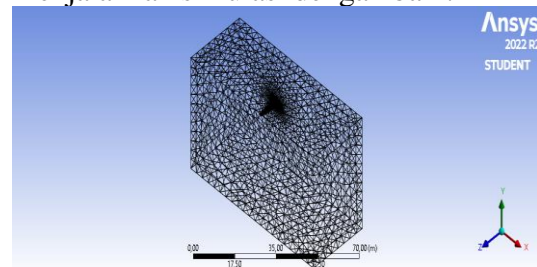
Selanjutnya *file* desain sayap pesawat disimpan dalam bentuk *.STEP* untuk diekspor ke dalam Ansys Spececlaim. Di dalam Ansys Spaceclaim *file* desain kemudian diolah lebih lanjut untuk membuat *enclosure* yang berfungsi sebagai *wind tunel* virtual. Kemudian melakukan proses *name selection* untuk memberikan nama pada setiap *part enclosure* dan desain sayap, ini berfungsi

untuk memudahkan pemberian *boundary condition* pada proses *setup* di Ansys Fluent.



Gambar 4. *Enclosure* yang telah dibuat

Proses selanjutnya adalah melakukan *meshing* pada geometri yang telah dibuat. Pada penelitian ini jenis *mesh* yang digunakan adalah *unstructured mesh* dengan jumlah *mesh* 300.000-400.000. Dalam proses *meshing* yang terpenting adalah bagaimana *mesh* yang dibuat mampu merepresentasikan geometri yang telah dibuat, hal ini bertujuan agar analisis CFD dalam Ansys Fluent tidak melenceng. Semakin banyak jumlah *mesh* yang digunakan maka hasil simulasi yang akan diperoleh juga semakin akurat [13]. Namun, penggunaan *mesh* dalam jumlah yang banyak akan memakan waktu simulasi yang panjang. Sehingga proses pembentukan *mesh* juga harus memerhatikan kapasitas memori komputer yang digunakan agar tetap mampu menjalankan simulasi dengan baik.



Gambar 4. Hasil *meshing*

Untuk melanjutkan pada proses simulasi pada Ansys Fluent diperlukan data karakteristik udara yang akan di-*input*. Maka dari itu, berikut adalah tabel yang memuat karakteristik udara yang akan disimulasikan pada Ansys Fluent.

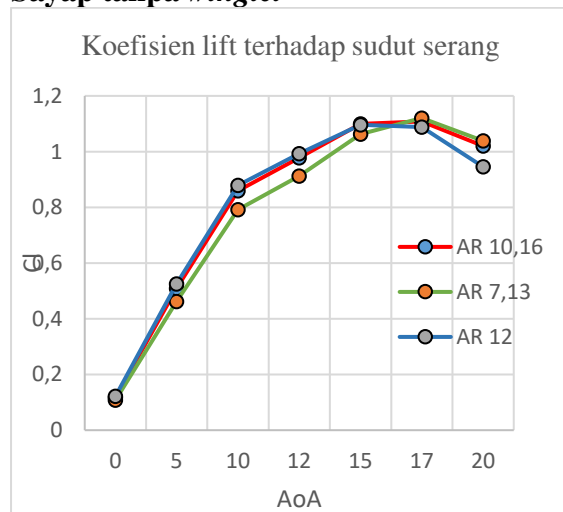
Tabel 1. Karakteristik Udara [6]

| Karakteristik | Ukuran |
|----------------|-------------------------|
| Ketinggian | 6100 m |
| Density | 0.653 kg/m ³ |
| Total Pressure | 46576,188 Pa |
| Temperature | 248,547 K |
| Velocity | 126 m/s |
| Viscosity | 1,59e-5 kg/m.s |

Setelah mengetahui karakteristik udara yang akan disimulasikan, maka dapat dilakukan proses simulasi pada Ansys Fluent. Hasil simulasi akan menghasilkan besar nilai *lift performance* yaitu koefisien *lift* (C_l) dan koefisien *drag* (C_d) pada setiap variasi sayap yang diuji. Setelahnya, nilai-nilai tersebut dapat diolah dalam bentuk tabulasi maupun grafik, dan hasil simulasi dapat divisualisasikan dalam bentuk kontur yang akan menampilkan distribusi tekanan dan lain sebagainya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

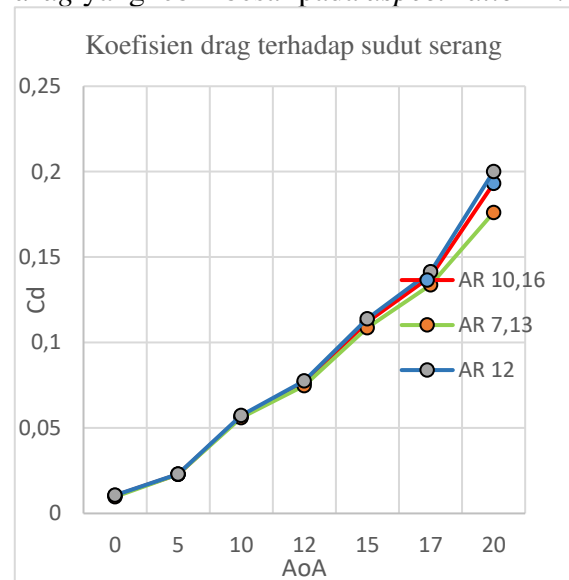
Sayap tanpa *winglet*



Gambar 5. Grafik C_l variasi *aspect ratio*

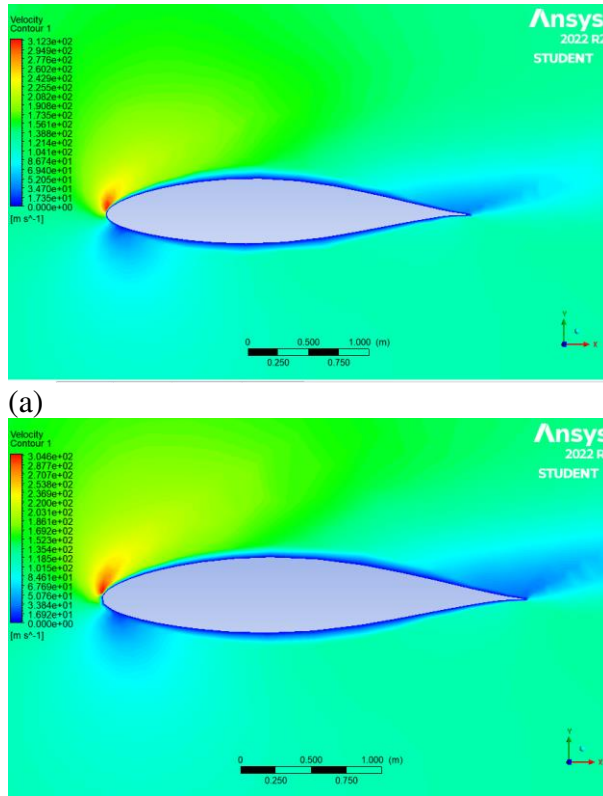
Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa $C_{l_{max}}$ terjadi ketika sayap dengan variasi AR 12 berada pada sudut serang 15°. Hal ini menunjukkan perbaikan tingkat *lift performance* pada sayap pesawat jika dibandingkan dengan *aspect ratio* pabrikan yaitu AR 10,16. Namun, seperti yang dipaparkan pada bagian landasan teori bahwa setelah mencapai $C_{l_{max}}$ sayap pesawat akan mengalami penurunan koefisien *lift* yang disebabkan bertambahnya koefisien gaya hambat. Pada gambar di atas terlihat setelah mencapai

titik koefisien *lift* maksimum, sayap pesawat mulai mengalami penurunan di mana pada sudut serang 20° terjadi penurunan di semua variasi *aspect ratio*. Variasi *aspect ratio* 12 mengalami penurunan yang lebih rendah dibandingkan dengan variasi *aspect ratio* lainnya. Hal ini disebabkan oleh pertambahan koefisien *drag* yang lebih besar pada *aspect ratio* 12.



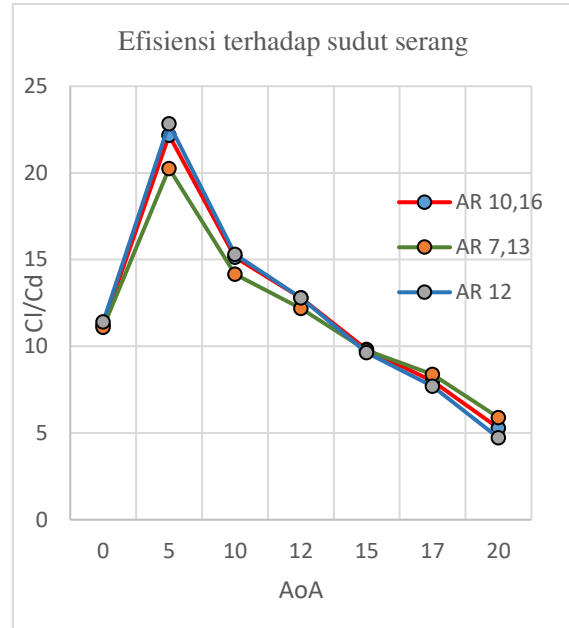
Gambar 6. Grafik C_d pada variasi *aspect ratio*

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa kenaikan *aspect ratio* pada sayap pesawat juga diikuti oleh kenaikan koefisien *drag*. Grafik di atas menggambarkan *aspect ratio* yang lebih besar mengalami pertumbuhan koefisien gaya hambat yang lebih besar daripada variasi *aspect ratio* lainnya. Hal ini pula yang menyebabkan pada sudut serang yang tinggi *aspect ratio* yang lebih besar memiliki koefisien gaya angkat yang lebih rendah dibandingkan sayap dengan variasi *aspect ratio* lainnya. Pertumbuhan nilai koefisien *drag* terjadi karena adanya peristiwa separasi aliran udara pada *upper surface* yang lebih tinggi dibandingkan permukaan sayap pesawat dengan *aspect ratio* yang lebih rendah.



(a)
(b)
Gambar 7. Separasi aliran (a) AR 7,13 dan (b) AR 12

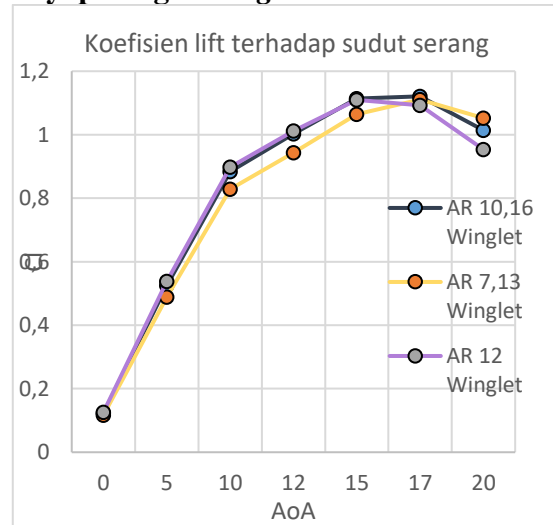
Separasi aliran merupakan fenomena aliran udara di sekitar sayap pesawat tidak mengikuti kontur permukaan dengan baik dan terlepas dari permukaan tersebut [14]. Pada gambar di atas terlihat adanya separasi aliran udara yang terjadi pada kedua kondisi sayap antara variasi AR 7,13 dan AR 12. Pada sudut serang tinggi yaitu 17°, sayap dengan AR 7,13 permukaan atas sayap memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan udara pada bagian atas sayap AR 12. Hal ini berpengaruh penting terhadap terjadinya separasi aliran karena kecepatan udara yang rendah akan menyebabkan tekanan udara menurun dan mengakibatkan aliran udara terlepas [15].



Gambar 8. Grafik efisiensi dari beragam variasi *aspect ratio*

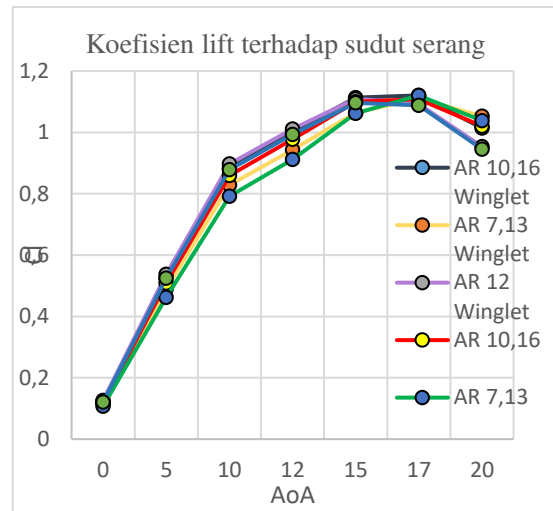
Sepresi aliran juga dapat menimbulkan peningkatan resistensi aerodinamis pada pesawat. Aliran yang terlepas dari permukaan menciptakan turbulensi yang meningkatkan gaya gesek dan mengurangi efisiensi aerodinamis. Gambar di atas menunjukkan hal tersebut di mana pada sudut serang rendah ketika sayap pesawat tidak mengalami separasi aliran, efisiensi aerodinamis sayap AR 12 sangat tinggi yaitu 22,8%. Namun, saat sudut serang semakin tinggi efisiensinya terus menurun akibat fenomena separasi aliran yang terjadi.

Sayap dengan *winglet*



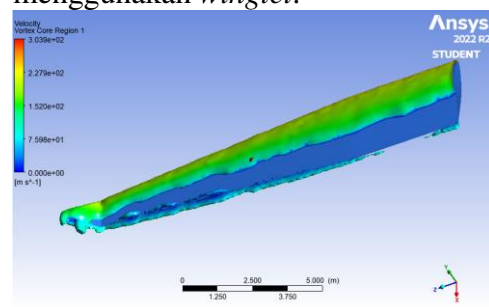
Gambar 9. Grafik Cl variasi sayap dengan *winglet*

Sekilas terlihat grafik di atas tidak jauh berbeda dengan grafik pada gambar sebelumnya, namun dalam grafik di atas terjadi penambahan koefisien gaya angkat pada sayap pesawat. Pada setiap variasi *aspect ratio* yang diuji mengalami kenaikan $C_{l_{max}}$. Sayap dengan AR 10,16 mengalami kenaikan $C_{l_{max}}$ dari 1,108 menjadi 1,12 dan begitu juga dengan AR 12 dari 1,096 menjadi 1,109. Perbandingan koefisien *lift* dari setiap variasi *aspect ratio* dengan atau tanpa *winglet* dapat terlihat dari grafik di bawah ini. Dalam grafik di bawah juga dapat terlihat bahwa pada sayap tanpa *winglet* dengan AR 7,13 memiliki koefisien *lift* yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan jenis AR yang sama namun dengan menggunakan *winglet*. Hal ini dipengaruhi oleh disebabkan ketidakcocokan jenis *winglet* yang diterapkan pada sayap jenis AR 7,13. Ketidakcocokan ini menyebabkan aliran udara di sekitar sayap terganggu sehingga menimbulkan turbulensi yang pada akhirnya mengurangi efisiensi aerodinamis. Fenomena ini didukung oleh penelitian yang dilakukan J. E. Guerrero, M. Sanguineti, K. Wittkowski pada 2020 yang meneliti tentang pengaruh variasi sudut *cant* pada jenis *canted winglet* terhadap *lift performance* sayap Onera M6. Hasil yang didapatkan adalah bahwa pada sudut serang 20° jenis sayap tanpa *winglet* menghasilkan koefisien *lift* yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan sayap yang menggunakan *winglet* dengan sudut *cant* 80° [11].

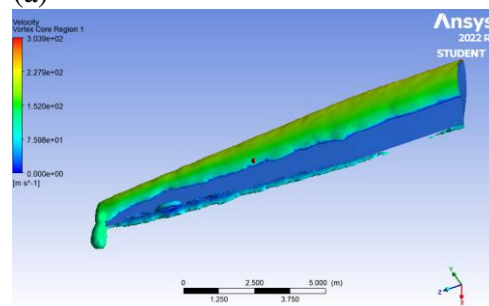


Gambar 10. Grafik Cl pada semua variasi sayap

Kenaikan koefisien *lift* yang lebih tinggi saat sayap pesawat menggunakan *winglet* terjadi karena salah satu penyebab utama separasi aliran adalah turbulensi yang terbentuk di ujung sayap. *Winglet* dirancang untuk mengurangi turbulensi ini dengan mengalihkan aliran udara di sekitar ujung sayap. Dapat terlihat pada gambar di bawah merupakan kondisi pertumbuhan turbulensi di ujung sayap (*wingtip vortex*) pada sayap dengan dan tanpa menggunakan *winglet*.



(a)



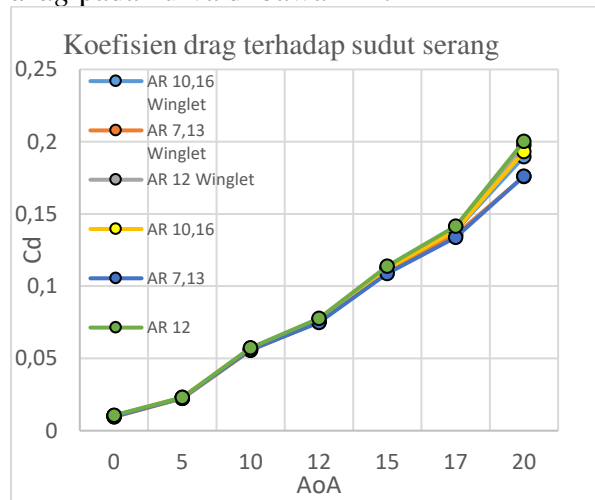
(b)

Gambar 11. *Wingtip vortex* pada sayap (a) *winglet* dan (b) tanpa *winglet*

Pada gambar di atas dapat terlihat bahwa sayap dengan penambahan *winglet*

dapat lebih mampu mengarahkan aliran udara yang turbulen pada permukaan sayap. Dengan mengarahkan aliran udara turbulen pada ujung sayap, *winglet* membantu menjaga aliran udara tetap melekat pada permukaan sayap pesawat, sehingga mengurangi terjadinya separasi aliran udara.

Selanjutnya, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa separasi aliran menyebabkan resistensi berupa penambahan gaya hambat akibat timbulnya gaya gesek yang semakin tinggi seiring dengan pertambahan sudut serang pesawat. Penggunaan *winglet* dalam penelitian ini menunjukkan bahwa gaya hambat dapat direduksi melalui pertumbuhan koefisien *drag* pada kurva di bawah ini.



Gambar 12. Grafik Cd pada semua variasi sayap

Berdasarkan grafik di atas dapat dibuat sebuah gambaran mengenai peran *winglet* dalam mereduksi koefisien *drag* yang terjadi. Dengan melakukan tabulasi terkait data yang telah diperoleh pada grafik di atas, maka dapat dilihat tabel *drag reduction* yang menggambarkan kemampuan *winglet* dalam mengurangi resistensi gaya hambat yang terjadi pada variasi setiap sayap. Tabel-tabel di bawah menunjukkan bahwa *winglet* mereduksi cukup besar resistensi gaya hambat yang terjadi dengan nilai maksimum 2,63% pada variasi sayap pesawat AR 12 di sudut serang 5°.

Tabel 2. *Drag reduction* AR 10,16

| AoA | ΔC_d | Drag reduction (%) |
|-----|--------------|--------------------|
| 0° | 0,017742 | 1,774164 |
| 5° | 0,025879 | 2,587938 |
| 10° | 0,016426 | 1,642611 |
| 12° | 0,011427 | 1,142728 |
| 15° | 0,001047 | 0,104692 |
| 17° | 0,001842 | 0,184222 |
| 20° | 0,018111 | 1,811052 |

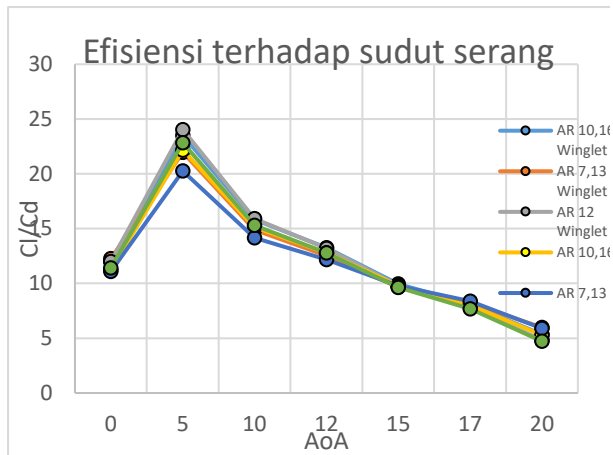
Tabel 3. *Drag reduction* AR 7,13

| AoA | ΔC_d | Drag reduction (%) |
|-----|--------------|--------------------|
| 0° | 0,019057 | 1,90571 |
| 5° | 0,02456 | 2,45598 |
| 10° | 0,005839 | 0,583884 |
| 12° | 0,006866 | 0,686616 |
| 15° | 0,013917 | 1,391734 |
| 17° | 0,01361 | 1,361031 |
| 20° | 0,001219 | 0,121922 |

Tabel 4. *Drag reduction* AR 12

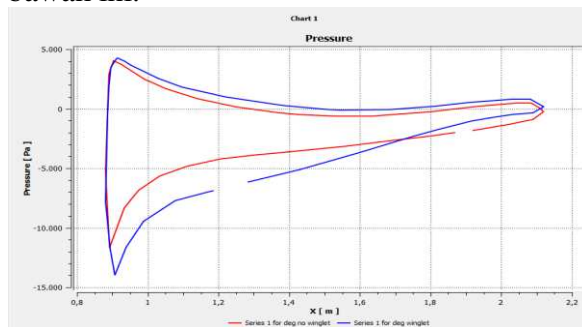
| AoA | ΔC_d | Drag reduction (%) |
|-----|--------------|--------------------|
| 0° | 0,013665 | 1,366546 |
| 5° | 0,026314 | 2,631405 |
| 10° | 0,016618 | 1,661811 |
| 12° | 0,013512 | 1,351206 |
| 15° | 0,006148 | 0,614758 |
| 17° | 0,007816 | 0,781572 |
| 20° | 0,013129 | 1,312885 |

Dengan pengurangan koefisien *drag* maka implikasi selanjutnya adalah penambahan *winglet* mampu menaikkan efisiensi aerodinamis pada sayap seperti terlihat pada gambar di bawah ini. Di mana dapat terlihat bahwa konfigurasi sayap dengan AR 12 dan penambahan *winglet* menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi sayap lainnya. Hal ini menunjukkan adanya keterkaitan yang baik antara memvariasikan *aspect ratio* sayap pesawat dengan penambahan *winglet*.



Gambar 13. Efisiensi pada setiap variasi sayap

Penambahan *winglet* pada sayap pesawat yang mampu menghasilkan koefisien gaya angkat yang lebih besar dibandingkan sayap pesawat tanpa *winglet* dipengaruhi oleh distribusi tekanan yang dihasilkan. Pada sayap dengan *winglet* tekanan pada bagian bawah sayap mampu terbentuk lebih besar dibandingkan dengan sayap tanpa *winglet*. Hal ini menyebabkan sayap pesawat mampu menghasilkan gaya angkat yang lebih besar dibandingkan sayap tanpa *winglet*. Distribusi tekanan pada sayap pesawat dengan dan tanpa *winglet* ini dapat dilihat melalui grafik di bawah ini.



Gambar 14. Grafik distribusi tekanan

4. DAFTAR PUSTAKA

- S. Syamsuar, “Analisis Data Uji Prestasi Terbang Field Performance Pada Pesawat Udara CN235,” *War. Penelit. Perhub.*, vol. 25, no. 5, p. 337, 2019, doi: 10.25104/warlit.v25i5.736.
- R. Febritasari, A. A. I. Yusuf, T. A. Sutrisno, I. K. A. Widi, and A. D. Korawan, “Analisa Pengaruh Panjang Muffer Pada Mesin 4 Tak

Berkapasitas 125cc Terhadap Karakteristik Daya dan Torsi Mesin Menggunakan Pengujian dyno dan Komputasi Fluida Dinamis,” *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 43–53, 2023.

- M. W. Pane, Andreas, and R. Samosir, “Perancangan Turbin Angin Vertikal Modifikasi Darries Menggunakan Geometri Airfoil Naca 2412,” *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 178–187, 2023.
- R. Samosir, M. Pane, and J. H. Lumbantoruan, “Perancangan Turbin Angin Vertikal Modifikasi Gabungan Savonius dan Darrieus Menggunakan Geometri NACA 0018,” *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 69–77, 2021.
- S. M. Berkowitz, *Theory of wing sections*, vol. 249, no. 3. 1950. doi: 10.1016/0016-0032(50)90516-3.
- N. Husnayati and M. A. Moelyadi, “Analisis Aerodinamika Dan Studi Parameter Sayap Cn-235 Kondisi Terbang Jelajah (Aerodynamic Analysis and Parametric Study of Cn-235 Wing At Cruise Condition),” *J. Kaji. Teknol.*, vol. 11, no. 2, pp. 127–136, 2013.
- B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, Rothmayer, and A. P, *Fundamentals of Fluid Mechanics Seventh Edition*. 2013.
- J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics (6th edition)*, vol. 1984, no. 3. 2011.
- J. D. Anderson, S. Corda, and D. M. Van Wie, “Numerical lifting line theory applied to drooped leading-edge wings below and above stall,” *J. Aircr.*, vol. 17, no. 12, pp. 898–904, 1980, doi: 10.2514/3.44690.
- A. Romadhon and D. Herdiana, “Analisis Cfd Karakteristik Aerodinamika Pada Sayap Pesawat Lsu-05 Dengan Penambahan Vortex Generator (Analysis of Cfd Aerodynamic Characteristics At the Wing of Aircraft Lsu-05 With the Addition of Vortex

- Generator),” *J. Teknol. Dirgant.*, vol. 15, no. 1, p. 45, 2017, doi: 10.30536/j.jtd.2017.v15.a2518.
- J. E. Guerrero, M. Sanguineti, and K. Wittkowski, Variable cant angle winglets for improvement of aircraft flight performance, vol. 55, no. 10. Springer Netherlands, 2020. doi: 10.1007/s11012-020-01230-1.
- I. Hanif, G. Jatisukanto, A. Amroe, and A. Nafi, “Pengaruh Sudut Tekuk (Cant) Winglet Menggunakan Airfoil Naca 2215 Pada Aerodinamika Sayap Pesawat,” no. 3, pp. 41–45, 2017.
- M. E. Ferguson, “Design and Computational Fluid Dynamics Analysis of an Idealized Modern Wingsuit,” 2017.
- R. Bur, D. Coponet, and Y. Carpels, “Separation control by vortex generator devices in a transonic channel flow,” *Shock Waves*, vol. 19, no. 6, pp. 521–530, 2009, doi: 10.1007/s00193-009-0234-6.
- R. Wawan, “ANALISIS PENGARUH KONTROL AKTIF SEPARASI ALIRAN PADA MODEL KENDARAAN TERHADAP HAMBATAN AERODINAMIKA,” file:///C:/Users/VERA/Downloads/AS KEP_AGREGAT_ANAK_and_REM AJA_PRINT.docx, vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 2020.