

Kaji Eksperimental Pengaruh Jumlah dan Interval Pembuluh Sayap Di Arah *Chord* Terhadap Propulsi Sayap Lentur

Fauzan Putraandari dan Sheila Tobing[†]

Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

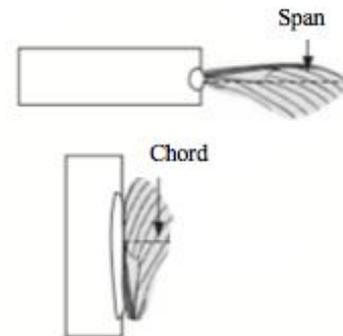
Abstrak—Selama dua dekade terakhir, telah banyak studi mengenai manfaat sayap membran lentur terhadap kinerja aerodinamika untuk pengembangan *Micro Air Vehicles* (MAVs). Studi eksperimental kali ini dilakukan untuk mengeksplorasi manfaat pengaruh profil sayap lentur terhadap kinerja aerodinamika pada bilangan Reynolds sebesar = 50000. Pengujian pengaruh kelenturan sayap dilakukan dengan cara menguji berbagai jumlah dan interval antar pembuluh sayap di arah *chord*. Pengujian untuk mengetahui kinerja aerodinamika pada setiap variasi profil sayap lentur dilakukan dengan menggunakan terowongan angin. Kinerja aerodinamika dapat diketahui dengan mengukur gaya angkat dan gaya hambat pada setiap variasi profil sayap lentur terhadap berbagai sudut serang. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa profil sayap dengan distribusi interval tidak seragam, terutama lebih padat di daerah dekat dengan pangkal sayap (*root*), akan memberikan manfaat kinerja aerodinamika yang signifikan. Pengukuran menunjukkan bahwa sayap dengan pembuluh yang lebih padat di daerah *root* dapat meningkatkan *leading edge vortices* (LEVs) dan membentuk pusaran udara di daerah tepi sayap (*tip vortices*) yang berguna untuk menyeimbangkan beban aerodinamika pada permukaan sayap atas dan bawah.

Kata kunci—Sayap membran lentur, Kinerja aerodinamika, Pembuluh sayap, Kelenturan arah *chord*.

I. PENDAHULUAN

MICRO *air vehicles* (MAVs) atau kendaraan udara mikro merupakan pesawat udara tanpa awak dengan maksimum dimensi fisik kurang dari 15 cm atau sekitar 6 inci dengan kecepatan terbang rendah sekitar 10-15 m/s. MAVs beroperasi dalam daerah low Reynolds number untuk range 10.000-100.000. Penelitian yang dilakukan dalam beberapa tahun terakhir telah menghasilkan kemajuan dalam miniatur elektronik digital, fabrikasi mikro, sel daya miniatur, komunikasi jarak jauh, serta teknologi pendukung lainnya. Oleh karena itu, penting untuk membangun bentuk sayap baru dan paradigma desain sayap untuk MAVs guna mencapai kinerja aerodinamika yang maksimal.

Wootton menguji eksperimental profil sayap lentur yang terinspirasi dari sayap serangga. Wootton mengungkapkan bahwa sayap tipis dan lentur merupakan bentuk unik untuk terbang dan meluncur, seperti serangga. Serangga merupakan hewan yang menunjukkan kemampuan terbang yang unik sehubungan dengan manuver dan kelincahan yang tidak bisa diamati pada spesies lain dengan ukuran yang sebanding seperti



Gambar. 1: Arah *chord* dan arah *span* dari sayap serangga [2]

burung dan kelelawar. Bentuk sayap serangga mengalami lentur dan putaran yang signifikan selama penerbangan, yang dapat mengubah arah dan kecepatan pada gaya aerodinamika [1].

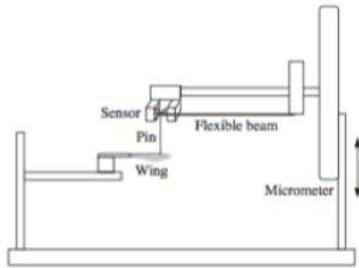
Combes dan Daniel menguji eksperimen profil sayap serangga dengan memberikan gaya statis di tepi sayap [2]. Combes dan Daniel mengungkapkan bahwa fungsi dari pembuluh sayap (*wing veins*) terutama kerangka *wing veins* di arah *chord* berpengaruh sampai 95% nilai kelenturan dari keseluruhan sayap serangga (Gambar 1). Kelenturan pembuluh sayap di arah *chord* akan menjadi langkah penting dalam menentukan struktur sayap dan kelenturan terhadap kinerja aerodinamika pada serangga.

Tamai menguji secara eksperimen dan simulasi pada profil sayap lentur dengan variasi jumlah pembuluh sayap di daerah membran [3]. Tamai menunjukkan bahwa fitur yang berpotensi untuk MAVs agar dapat bermanuver yaitu karena profil sayap yang lentur dapat memberikan kinerja aerodinamika yang lebih baik dibandingkan profil sayap yang lebih kaku. Kinerja aerodinamika dapat diketahui berdasarkan pengukuran dari gaya angkat (*lift force*) dan gaya hambat (*drag force*) dengan menambahkan berbagai tulang rusuk (*rib*) kepada membran.

Dalam penelitian ini yaitu studi eksperimental untuk mengeksplorasi manfaat masing-masing profil sayap lentur dengan menambahkan jumlah pembuluh sayap dan distribusi interval antar pembuluh sayap di arah *chord*. Pengukuran pengaruh jumlah dan interval pembuluh sayap dilakukan dengan mengetahui kinerja aerodinamika yaitu dengan mengukur gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*) terhadap variasi

[†]Corresponding author: Sheila Tobing (e-mail: sheila.tobing@atmajaya.ac.id).

Manuscript received August 1, 2019; revised September 1, 2019.



Gambar. 2: Penelitian dilakukan dengan mengukur kelenturan pada sayap dengan menerapkan kekuatan titik untuk menekukan sayap tersebut [2]

sudut serang (*angle of attack*, α). Harapan dari penelitian ini agar dapat mengetahui pengaruh jumlah dan interval pembuluh sayap di arah chord terhadap kemampuan sayap untuk meningkatkan kinerja aerodinamika.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Arah span dan arah chord

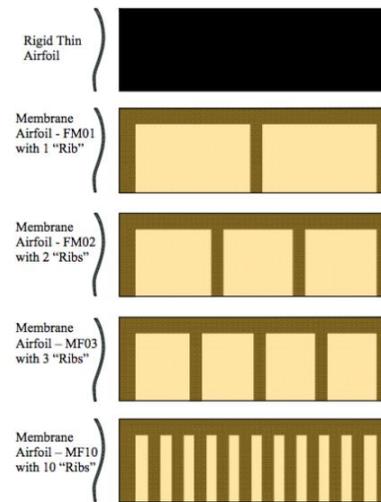
Combes dan Daniel menguji eksperimental pada sayap serangga menunjukkan bahwa kelenturan sayap dipengaruhi oleh distribusi arah *span* dan arah *chord* [2]. Cara mengukur kelenturan pada sayap serangga dengan menerapkan kekuatan titik untuk menekuk sayap, yang ditunjukkan oleh Gambar. 2.

Hasil dari penelitian Combes dan Daniel dengan melakukan uji *bending* yang dilakukan pada sayap serangga menunjukkan bahwa kelenturan pada masing-masing sayap serangga secara konstan tergantung ukuran dari penampang sayap serangga dan juga daerah ujung pada sayap serangga yang lentur bertindak sebagai alat *control* aliran yang menstabilkan serangga selama penerbangan [2].

B. Profil Sayap Lentur

Tamai melakukan pengujian yang terinspirasi dari bentuk sayap kalelawar yang memiliki membran yang lentur. Tujuan penelitian Tamai untuk mengeksplorasi manfaat dengan menggunakan sayap membran lentur pada bilangan Reynolds rendah untuk aplikasi MAVs [3]. Penelitian tersebut dilakukan dengan simulasi PIV dengan *Chord Reynolds Number (ReC)* sebesar 70.000. Dengan menambahkan berbagai tulang rusuk (*rib*) yang kaku kedalam sayap pada membran lentur, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar. 3.

Seperti ditunjukkan oleh Gambar. 3., sayap yang digunakan pada penelitian Tamai memiliki panjang pembuluh sayap di arah *span* yang sama dengan jumlah pembuluh sayap di arah *chord* dan interval seragam. Material membran lentur menggunakan *latex sheet* yang dililitkan di pembuluh sayap pada rangka utama sayap tersebut pada permukaan atas dan bawah. Hasil penelitian Tamai, menunjukkan bahwa profil sayap dengan pembuluh sayap di arah *chord* yang lebih sedikit (membran sayap yang lentur) dapat memberikan kinerja aerodinamika yang lebih baik dibandingkan dengan profil sayap yang kaku. Kelenturan dari membran pada profil sayap tersebut dapat mengubah bentuk *camber* mereka untuk beradaptasi



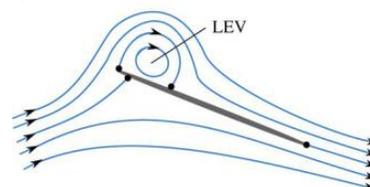
Gambar. 3: Profil sayap yang digunakan dalam penelitian Tamai [3]

dengan arus masuk secara otomatis untuk menyeimbangkan perbedaan tekanan yang diterapkan pada permukaan atas dan bawah pada sayap

C. Mekanika Unsteady Aerodynamics pada Flapping Wing

Beberapa mekanisme dari *unsteady aerodynamics* yang berkaitan dengan aerodinamika *flapping wing* untuk menghasilkan gaya terdiri dari *Leading Edge Vortex (LEV)* [4]. Fenomena LEVs menciptakan daerah dengan tekanan yang lebih rendah pada bagian atas sayap yang memperbesar gaya angkat atau *lift*. Karakteristik utama dari peran LEVs terhadap produksi gaya *lift* bervariasi terhadap bilangan Reynolds, kelenturan sayap, dan kinematika *flapping wing*. Fenomena LEVs akan terjadi dilokasi yang dekat dengan *leading edge*. Ketika sebuah *flapping wing* melalui beberapa panjang *chord*, aliran yang dilewati akan terpisah dari *leading* dan *trailing edge* dan juga ujung dari sayap, membentuk sebuah pusaran yang besar yang disebut dengan *leading-edge vortex (LEV)* yang ditunjukkan oleh Gambar. 4 [4].

Dalam mekanisme terbang sebuah *flapping wing*, keberadaan LEVs sangat penting untuk menunda terjadinya fenomena *stall (delayed stall)* dan untuk menambah produksi gaya aerodinamik. LEVs menghasilkan daerah dengan tekanan yang lebih rendah pada intinya yang menyebabkan meningkatnya gaya hisap pada permukaan atas sayap [4].



Gambar. 4: Skema yang menunjukkan struktur LEVs [4]

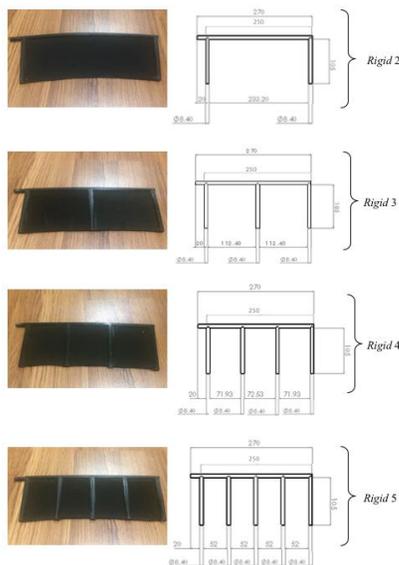
TABEL I: Kode Desain Profil Sayap

Kode Profil Sayap	Jumlah Pembuluh Sayap	Penjelasan Distribusi Interval Antar Pembuluh Sayap
Rigid 2	2	Seragam
Rigid 3	3	Seragam
Rigid 4	4	Seragam
Rigid 5	5	Seragam
Rigid 4-	4	Tidak Seragam, lebih padat di daerah <i>root</i>
Rigid 4+	4	Tidak Seragam, lebih padat di daerah <i>tip</i>
Rigid 5-	5	Tidak Seragam, lebih padat di daerah <i>root</i>
Rigid 5+	5	Tidak Seragam, lebih padat di daerah <i>tip</i>
Sudut 20	3	Membentang dari daerah <i>root</i> membentuk sudut 20

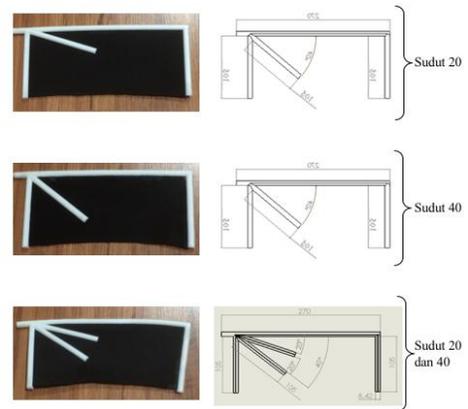
III. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada tugas akhir ini adalah eksperimen pada profil sayap yang memiliki kelenturan yang bervariasi karena tergantung pada jumlah dari setiap pembuluh sayap dan distribusi interval antar pembuluh sayap. Pengujian profil sayap pada penelitian kali dicetak menggunakan 3D *printing* dan eksperimen menggunakan terowongan angin. Bilangan Reynolds ($Re = 50000$) [5].

Profil sayap yang uji berbentuk silinder dengan panjang penampang sebesar 250 mm, yang sudah disesuaikan dengan luas area dari bagian pengujian terowongan angin dan meja pada 3D *printing*. Kemudian, pembuluh sayap di arah *chord* sebesar 105 mm ($c=105$ mm), dengan ketebalan silinder 8,4 mm yang disesuaikan dengan desain bentuk *airfoil* yang digunakan oleh penelitian Null dan Shkarayev [6]. Setelah pembuluh sayap lentur sudah ditentukan luas penampangnya, selanjutnya menentukan variasi kelenturan membran sayap yang diuji. Variasi kelenturan penelitian kali ini adalah jumlah pembuluh sayap yang diuji sebanyak 2-5 dengan distribusi interval yang seragam (Gambar 5) dan jumlah pembuluh sayap sebanyak 4 dan 5 dengan interval tidak seragam (Gambar 6). Selain itu, variasi lainnya adalah profil sayap dengan jumlah



Gambar. 5: Profil sayap lentur dengan jumlah dan distribusi interval pembuluh sayap seragam



Gambar. 6: Profil sayap lentur dengan penambahan pembuluh sayap berbentuk sudut

pembuluh sayap sebanyak 2 dengan penambahan pembuluh sayap yang berbentuk sudut (Gambar 7). Variasi profil sayap dengan menggunakan kode profil sayap dimana menjelaskan variasi profil sayap yang diuji yang dicantumkan di Tabel 1.

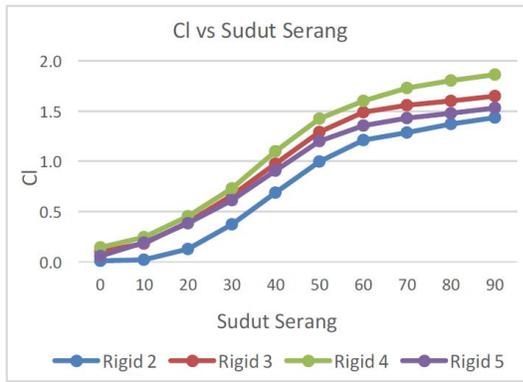
Kemudian, profil sayap dipasangkan dengan membran berupa kain *latex* dengan ketebalan 1,15 mm. Pemasangan membran kain *latex* terhadap profil sayap dilakukan secara manual dengan menggunakan lem.

IV. HASIL DAN ANALISA

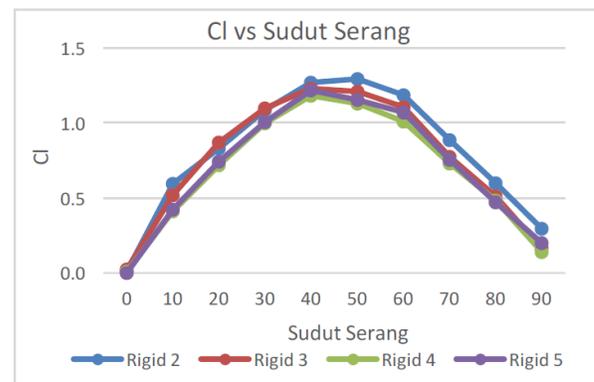
Analisis studi eksperimen untuk pengujian gaya aerodinamika dilakukan dengan menggunakan terowongan angin. Pengujian gaya aerodinamika tersebut dilakukan menggunakan bilangan Reynolds sebesar $Re = 50000$. Setiap profil sayap diuji pada sudut serang (α) 0° sampai 90° dengan interval 10° untuk mendapatkan *lift* dan *drag*. Kemudian disubstitusikan ke persamaan koefisien gaya angkat atau *lift* (C_l) dan koefisien gaya hambat atau *drag* (C_d). Maka, kinerja aerodinamika dapat diketahui dengan membandingkan koefisien gaya angkat (C_l) dan koefisien gaya hambat (C_d) dalam bentuk *lift-to-drag ratio* (C_l/C_d).

A. Hasil Gaya Aerodinamika Pada Profil Sayap

1) **Pengaruh Jumlah dan Interval Pembuluh Sayap Terhadap Drag:** pengujian pada profil sayap dengan jumlah pembuluh sayap dengan interval yang seragam menunjukkan C_d



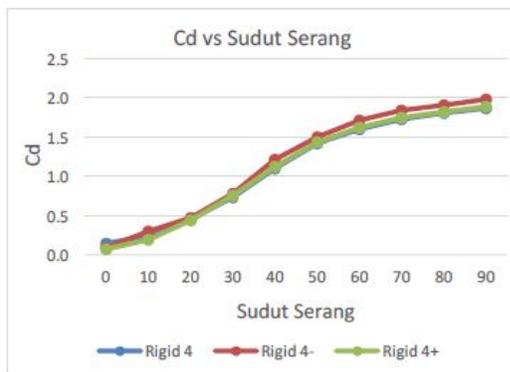
Gambar. 7: Grafik C_l terhadap sudut serang α dengan profil sayap yang memiliki jumlah pembuluh 2-5 dan interval yang seragam.



Gambar. 9: Grafik C_l terhadap sudut serang α dengan profil sayap yang memiliki jumlah pembuluh 2-5 dan interval yang seragam

selalu meningkat seiring dengan bertambahnya sudut serang (Gambar. 7). Faktor yang menyebabkan *drag* terus meningkat seiring bertambahnya sudut serang adalah fenomena terjadinya pemisahan aliran (*flow separation*) yang akan menyebabkan aliran laminar menjadi turbulen dan terjadi pusaran besar (*vortex*) dibelakang sayap. Pengujian menunjukkan bahwa profil sayap dengan membran yang lentur (**Rigid 2**) menghasilkan

nilai C_d yang paling rendah seiring bertambahnya sudut serang dibandingkan dengan profil sayap lain. Saat sudut serang terus bertambah, membran sayap yang terlalu lentur mencegah terjadinya *flow separation* yang menyebabkan aliran turbulen dan pusaran aliran (*vortices*) dibagian belakang sayap tidak terlalu besar. Kemudian, profil sayap yang tidak lentur/kaku (**Rigid 5**) tidak juga menghasilkan nilai C_d yang besar pula. Kekakuan pada membran sayap yang membuat aliran udara pada permukaan profil sayap kurang sepenuhnya melewati *trailing edge*. Dengan kata lain, saat terjadi *flow separation*, maka aliran turbulen dan *vortex* dibagian belakang sayap juga tidak terlalu besar. Alhasil, seiring bertambahnya sudut serang, profil sayap dengan membran yang terlalu kaku juga kurang berpengaruh dalam meningkatkan *drag*.



(a)

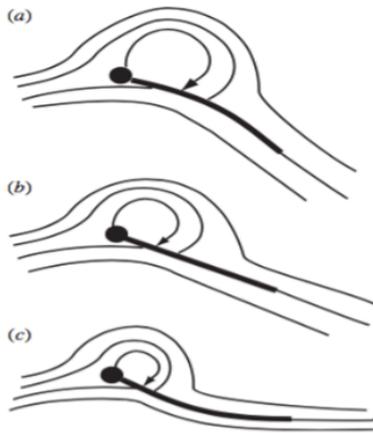


(b)

Gambar. 8: Grafik C_d terhadap sudut serang (α) pada profil sayap yang memiliki distribusi interval antar pembuluh sayap tidak seragam: (a) jumlah pembuluh sayap 4, (b) jumlah pembuluh sayap 5.

Pengujian menunjukkan bahwa nilai C_d pada profil sayap dengan distribusi interval pembuluh sayap tidak seragam cenderung akan lebih meningkat saat sudut serang $\alpha > 50^\circ$ (Gambar. 8 (a)). Terutama, terlihat signifikan pada profil sayap dengan jumlah pembuluh sebanyak 5 dengan distribusi interval antar pembuluh sayap lebih padat di daerah dekat dengan pangkal sayap (*root*), yaitu **Rigid 5-** pada (Gambar. 8 (b)). Hal tersebut karena bentuk profil sayap *Rigid 5-* yang memiliki kombinasi membran kaku dan membran lentur yang menjadi peran penting untuk menyesuaikan aliran udara yang masuk untuk menyeimbangkan perbedaan tekanan di permukaan atas dan bawah pada sayap. Kemudian, pembuluh sayap yang lebih padat di daerah *root* menyebabkan peningkatan aliran turbulen dan *vortex* pada saat *flow separation* yang dapat meningkatkan *drag* saat sudut serang $50^\circ \ll 90^\circ$.

2) **Pengaruh Jumlah dan Interval Pembuluh Sayap Terhadap Lift:** pengujian menunjukkan bahwa variasi jumlah pembuluh sayap dan distribusi interval yang seragam menghasilkan nilai C_l yang meningkat seiring bertambahnya sudut serang sampai dengan 40° 50° ($0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ sampai dengan 50°) Namun, yang menjadi perhatian pada pengujian adalah profil sayap dengan membran yang paling lentur (**Rigid 2**) akan menghasilkan nilai C_l yang lebih meningkat dan satu-satunya profil sayap yang mengalami kondisi *stall* pada sudut serang $\alpha = 50$. Hal ini terjadi karena kelenturan membran pada **Rigid 2** berperan penting dalam meningkatkan fenomena



Gambar. 10: Pola aliran LEV pada profil sayap; (a) membran sayap paling lentur ; (b) membran sayap lentur ; (c) membran sayap paling kaku [7].

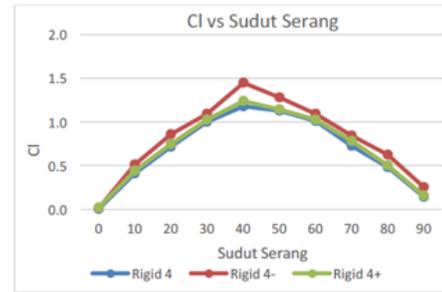
leading edge vortices (LEVs).

Zhao, Huang, Deng, dan Sane menguji secara eksperimen tiga profil sayap (3D) dengan kelenturan yang berbeda, mulai dari sayap yang sangat lentur (Gambar. 10 (a)), sayap lentur (Gambar 10 (b)) dan sayap yang tidak lentur/kaku (Gambar 10 (c)) [7]. Mereka menemukan bahwa LEVs pada sayap yang lentur (Gambar 11 (a)) paling besar dibandingkan dengan dua sayap lainnya. LEVs yang lebih besar menghasilkan daerah bertekanan rendah pada permukaan atas sayap yang lebih besar pula. Daerah bertekanan rendah pada LEVs menyebabkan terciptanya lift tambahan dan menunda stall (delayed stall) yang merupakan ciri khas unsteady aerodynamics. LEVs yang lebih besar ini menyebabkan kenaikan lift yang lebih tinggi pula dibandingkan dengan dua sayap lainnya.

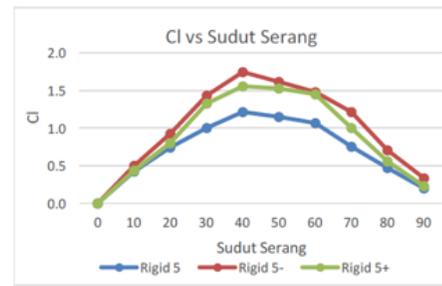
Pengujian menunjukkan bahwa profil sayap dengan distribusi interval antar pembuluh sayap yang tidak seragam menghasilkan nilai C_l akan cenderung lebih meningkat saat sudut serang ($0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$) sampai terjadi kondisi stall saat sudut serang ($40^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) (Gambar. 11). Lebih tepatnya, peningkatan nilai C_l lebih signifikan jika jumlah pembuluh sayap memiliki distribusi interval yang lebih padat di daerah dekat dengan pangkal sayap (*root*), terlihat jelas di grafik pada profil sayap **Rigid 5-** (Gambar 11 (b)).

Komponen kunci dari peningkatan gaya angkat pada profil sayap **Rigid 5-** disebabkan kekakuan membran di daerah root dapat membentuk pusaran udara (*vortices*) di daerah tip yang disebut *tip vortices* (TiV). Dimana, TiV adalah pusaran udara karena tekanan yang tinggi di bawah permukaan sayap naik ke daerah tekanan rendah di permukaan atas untuk membuat tekanan udara menjadi seimbang. Meskipun dalam penelitian kali ini tidak dapat mengukur tekanan atau struktur pada *tip vortices*. Tetapi, hasil penelitian menunjukkan bahwa membran lentur di daerah tip meningkatkan gaya angkat lebih signifikan. Mustafa dan Halil menguji secara eksperimental variasi *tip vortices* pada profil sayap (3D) dengan bilangan terhadap sudut serang sebesar $\alpha = 8^\circ$ sampai $\alpha = 20^\circ$ [8]. sebesar $\alpha = 8^\circ$ sampai $\alpha = 20^\circ$ [8].

Mustafa dan Halil menemukan bahwa peningkatan gaya



(a)

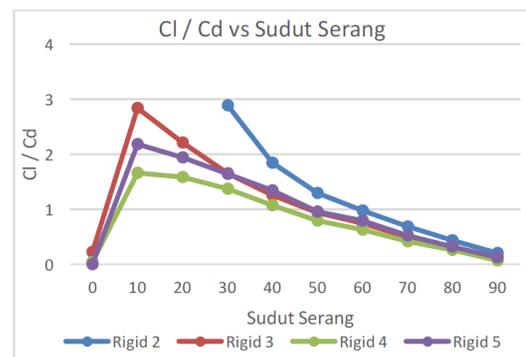


(b)

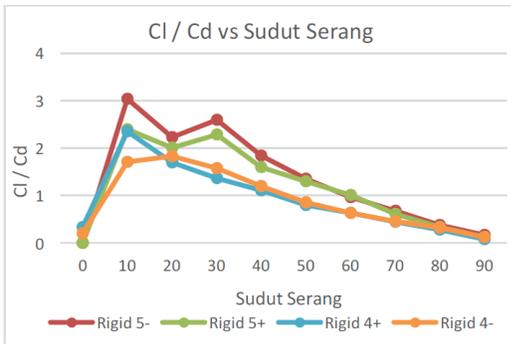
Gambar. 11: Grafik C_l terhadap sudut serang α pada profil sayap yang memiliki distribusi interval antar pembuluh sayap tidak seragam: (a) jumlah pembuluh sayap 4, (b) jumlah pembuluh sayap 5.

angkat sebagian besar dipengaruhi oleh *tip vortices*. *Tip vortices* menjadi kekuatan tambahan untuk profil sayap berdeformasi menyesuaikan aliran udara dan meningkatkan LEVs yang dapat membantu memperbesar tekanan rendah di permukaan atas sayap dari tekanan tinggi di permukaan bawah sayap [8].

3) **Pengaruh Jumlah dan Interval Pembuluh Sayap Terhadap Lift-to-Drag Ratio:** hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa nilai (C_l/C_d) pada pengujian profil sayap berjumlah pembuluh sebanyak 2 (**Rigid 2**) menghasilkan angka yang terlalu besar saat sudut serang $\alpha \leq 20^\circ$. Hal tersebut karena nilai drag yang terlalu fluktuatif. Selama percobaan berlangsung, membran lentur pada Rigid 2 terlihat berdeformasi bebas (*fluttering*) di bagian *trailing edge* saat aliran udara melewati sayap pada sudut serang $\alpha \leq 20^\circ$. Sehingga, penulis tidak dapat



Gambar. 12: Grafik (C_l/C_d) terhadap sudut serang α dengan profil sayap yang memiliki jumlah pembuluh 2-5 dan interval yang seragam

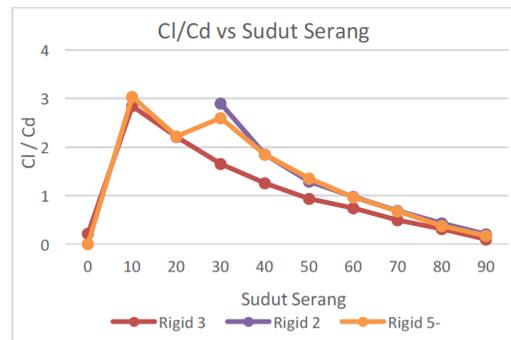


Gambar. 13: Grafik (C_l/C_d) terhadap sudut serang α dengan profil sayap yang memiliki jumlah pembuluh 4 dan 5 dengan interval yang seragam

menganalisa kinerja aerodinamika pada **Rigid 2** (Gambar. 12). Maka, penulis tidak mencantumkan grafik nilai (C_l/C_d) pada **Rigid 2** pada sudut serang $\alpha \leq 20^\circ$. Hasil pengukuran lift-to-drag ratio (C_l/C_d) terhadap sudut serang (α) menunjukkan bahwa permukaan profil sayap dengan membran yang lebih lentur (**Rigid 2**) ternyata menghasilkan kinerja aerodinamika yang tinggi pada sudut serang $\alpha \leq 30^\circ$ dibandingkan dengan profil sayap lain (Gambar. 12). Kemudian, **Rigid 4** merupakan profil sayap yang menghasilkan (C_l/C_d) paling rendah dibandingkan dengan profil sayap lainnya.

Kemudian, hasil pengukuran lift-to-drag ratio (C_l/C_d) pembuluh sayap dengan distribusi interval yang tidak seragam menunjukkan bahwa profil sayap dengan jumlah pembuluh sebanyak 5 dengan distribusi interval yang lebih padat di daerah root (**Rigid 5-**) mengalami peningkatan (C_l/C_d) yang lebih signifikan dibandingkan profil sayap lain (Gambar. 13).

Hasil pengukuran lift-to-drag ratio (C_l/C_d) pada profil sayap **Rigid 2**, **Rigid 3** dan **Rigid 5-** menunjukkan bahwa **Rigid 5-** memiliki nilai (C_l/C_d) yang dapat beradaptasi seiring bertambahnya sudut serang ($0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$). Nilai (C_l/C_d) pada **Rigid 5-** hampir sama dengan **Rigid 3** pada saat sudut serang rendah ($\alpha \leq 20^\circ$) dan hampir sama dengan **Rigid 2** pada saat sudut serang $\alpha \leq 30^\circ$ (Gambar. 14). **Rigid 5-** merupakan sayap yang memiliki kombinasi lentur dan kaku, yaitu pembuluh yang lebih padat di daerah root serta kelenturan membran di daerah tip. Fungsi dari pembuluh sayap yang lebih padat di daerah dekat dengan pangkal yaitu untuk dapat menahan beban aerodinamika. Dimana, ketika sudut serang semakin bertambah, aliran udara yang melewati profil sayap **Rigid 5-** akan terpisah, profil sayap dengan pembuluh sayap yang lebih padat di root dapat menguatkan profil sayap dengan membentuk sebuah pusaran yang besar di bagian tip (*tip vortices*). Kekakuan membran di bagian root menjadikan pusaran udara dapat membantu meningkatkan LEVs yang berguna untuk menyeimbangkan tekanan yang tinggi di permukaan bawah agar naik ke tekanan yang rendah di permukaan atas pada sayap. Maka, hasil pembahasan dari semua pengukuran lift-to-drag ratio pada variasi profil sayap yang diuji menunjukkan bahwa jumlah pembuluh sebanyak 5 dan distribusi interval pembuluh yang lebih padat di daerah root (**Rigid 5-**) menjadi pengaruh penting dalam menghasilkan



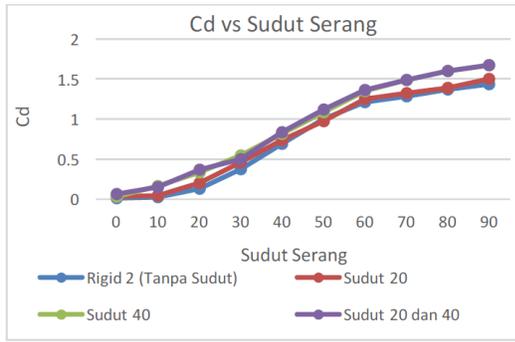
Gambar. 14: Grafik (C_l/C_d) terhadap sudut serang α terhadap sudut serang pada profil sayap distribusi yang seragam dan tidak seragam

produksi kinerja aerodinamika agar optimal. Maksud dari optimal ialah produksi kinerja aerodinamika yang dapat beradaptasi terhadap beban aerodinamik pada saat sudut serang dari $\alpha = 0^\circ$ sampai $\alpha = 90^\circ$.

Zhao, Huang, Deng, dan Sane menguji eksperimen *flapping wings* pada profil sayap dengan kompleksitas pembuluh di dekat pangkal sayap yang terinspirasi dari profil sayap serangga meskipun pembuluh sayap tidak serempak mengikuti kompleksitas serangga aslinya [7]. Hasil yang dilaporkan Zhao dkk. menunjukkan bahwa adanya kompleksitas pembuluh sayap dapat meningkatkan kinerja aerodinamika yang optimal dan lebih baik dibandingkan dengan profil sayap yang terlalu lentur. Fungsi kompleksitas pembuluh sayap dapat menguatkan struktural dalam menahan beban statis, sehingga dapat meningkatkan efisiensi aerodinamika sayap dalam mekanisme kepak atau *flapping* untuk menghasilkan gaya angkat dan gaya dorong. Dalam mekanisme terbang suatu *flapping wings*, kompleksitas pembuluh dekat dengan pangkal sayap dapat membantu sayap menyeimbangkan tekanan tinggi di permukaan bawah sayap terhadap tekanan rendah dipermukaan atas sayap.

B. Hasil Gaya Aerodinamika Pada Pembuluh Sayap Bersudut.

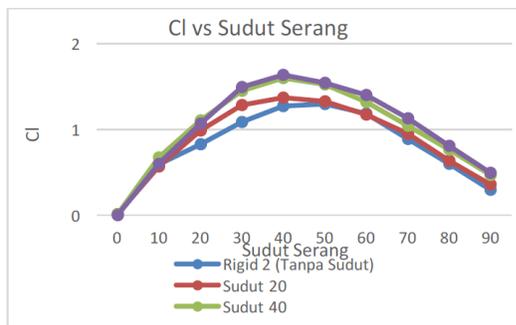
Pembahasan selanjutnya adalah mengetahui pengaruh pembuluh sayap terhadap kinerja aerodinamika dengan menambahkan struktur pembuluh sayap yang membentuk sudut dari daerah pangkal sayap (*root*). Pembuluh sayap dengan bentuk sudut membentang dari pangkal sayap hingga membran sayap dengan sudut sebesar 20° , 40° dan gabungan kedua sudut tersebut. Pengujian pada pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut dilakukan pada profil sayap dengan jumlah pembuluh sayap sebanyak 2 (**Rigid 2**). Maka dari itu, analisis pada pengujian ini dilakukan dengan perbandingan antar pembuluh sayap sebanyak 2 dengan pembuluh sayap sebanyak 2 yang ditambahkan dengan pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut. Jika dilihat dari profil sayap dengan pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut dari pangkal sayap, distribusi pembuluh sayap antar sudut 20° dan 40° terlihat berbeda.



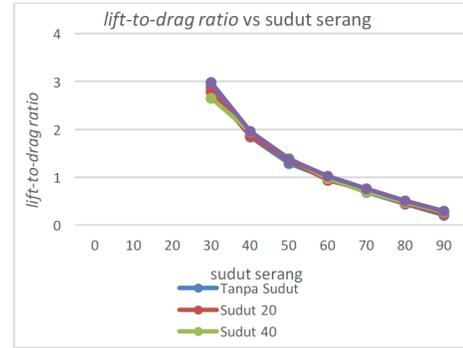
Gambar. 15: Grafik C_d terhadap sudut serang α dengan profil sayap dengan pembuluh sayap yang bersudut

- 1) Pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut 20° memiliki distribusi yang lebih menguatkan arah sayap span.
- 2) Pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut 40° memiliki distribusi yang lebih menguatkan arah sayap chord.
- 3) Pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut 20° dan 40° memiliki distribusi yang lebih menguatkan arah sayap span dan chord.

Pengujian yang membandingkan sayap dengan pembuluh yang membentang berbentuk sudut dengan sayap tanpa pembuluh sayap yang berbentuk sudut menunjukkan bahwa penambahan pembuluh sayap dengan bentuk sudut menghasilkan nilai C_d (Gambar. 15) dan C_l (Gambar. 16) akan lebih meningkat saat sudut serang ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$). Namun, lebih tepatnya peningkatan nilai C_d dan C_l lebih meningkat secara signifikan jika pembuluh sayap berbentuk sudut 40° dan gabungan antara sudut 20° dan 40° . Pembuluh sayap dengan sudut 40° dan gabungan antara sudut 20° dan 40° menghasilkan nilai (C_d dan C_l yang hampir sama jika dilihat di grafik. Hal tersebut, menunjukkan bahwa distribusi pembuluh sayap yang lebih membentang di arah chord (sudut 40°) lebih berpengaruh dalam meningkatkan gaya angkat dan gaya hambat dibandingkan dengan pembuluh sayap yang membentang di arah span (sudut 20°). Kemudian, pada grafik nilai C_d dan C_l akan lebih meningkat lagi jika pembuluh sayap yang membentang berbentuk gabungan antara sudut 20° dan



Gambar. 16: Grafik C_l terhadap sudut serang α dengan profil sayap dengan pembuluh sayap yang bersudut



Gambar. 17: Grafik (C_l/C_d) terhadap sudut serang α dengan profil sayap dengan pembuluh sayap yang bersudut

TABEL II: Persentase kenaikan nilai (C_l/C_d) pada pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut 20°

α	Sudut 0°	Sudut 20°	%
30	2,891	2,795	-3,43
40	1,846	1,864	0,97
50	1,294	1,361	5,20
60	0,981	0,934	-4,96
70	0,689	0,720	4,42
80	0,438	0,456	4,10
90	0,205	0,238	16,28

40° . Pembuluh sayap yang membentang berbentuk gabungan antara sudut 20° dan 40° lebih menguatkan daerah pangkal sayap karena distribusi pembuluh sayap terdapat di arah chord dan span. Hal tersebut yang menyebabkan profil sayap lebih padat di daerah root yang dapat membantu meningkatkan gaya angkat dan gaya hambat.

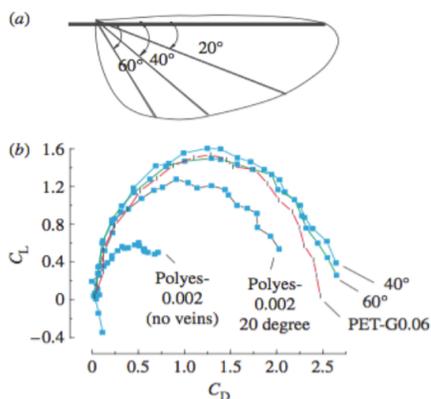
Selanjutnya yaitu menganalisa kinerja aerodinamika pada profil sayap yang memiliki pembuluh sayap berbentuk sudut dengan mengetahui perbandingan antara C_d dan C_l (*lift-to-drag ratio*) (Gambar. 17). Hasil pengukuran *lift-to-drag ratio* (C_l/C_d) pada profil sayap dengan pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut sebesar 20° , 40° dan gabungan antara kedua sudut tersebut menghasilkan nilai (C_l/C_d) yang lebih meningkat dibandingkan dengan profil sayap tanpa sudut. Presentase kenaikan pembuluh sayap yang bersudut dapat dilihat pada Tabel. II, Tabel. III dan Tabel. IV.

Hasil perbandingan nilai (C_l/C_d) yaitu bahwa profil sayap yang memiliki penambahan pembuluh sayap berbentuk sudut 20° dan pembuluh bersudut 40° meningkatkan kinerja aerodinamika dibandingkan dengan profil sayap tanpa sudut (Tabel. II). Tetapi, peningkatan kinerja aerodinamika lebih tinggi persentasenya pada pembuluh sayap bersudut 40° , yaitu terdistribusi di arah chord. Namun, kedua profil sayap ini terjadi penurunan pada saat sudut serang $\alpha = 30^\circ$ dan juga saat sudut serang $\alpha = 60^\circ$. Sedangkan, profil sayap yang memiliki penambahan pembuluh sayap berbentuk sudut 20° dan 40° atau dengan kata lain yang terdistribusi di arah chord dan span ternyata paling meningkatkan kinerja aerodinamika dengan persentase kenaikannya yang tinggi diantara pembuluh sayap bersudut lainnya (Tabel. IV). Kemudian, tidak ada penurunan kinerja aerodinamika seiring bertambahnya sudut serang. Hal

TABEL III: Persentase kenaikan nilai (C_l/C_d) pada pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut 40°

α	Sudut 0°	Sudut 20°	%
30	2,891	2,656	-8,84
40	1,846	1,957	6
50	1,294	1,400	8,18
60	0,981	0,978	-0,24
70	0,689	0,700	1,47
80	0,438	0,478	9,18
90	0,205	0,281	36,98

tersebut, karena penambahan 2 pembuluh sayap bersudut 20° dan 40° terdistribusi menguatkan arah span dan arah chord pada profil sayap secara lebih merata yang mengakibatkan lebih baik performa aerodinamikanya. Kemudian, pembuluh sayap berbentuk sudut 20° dan 40° dapat menguatkan struktur profil sayap di daerah pangkal sayap (root) yang dapat meningkatkan LEVs dengan memperbesar pusaran di daerah tip (tip vortices). Namun, meningkatnya kinerja aerodinamika pada pembuluh sayap berbentuk sudut 20° dan 40° lebih dominan karena pengaruh adanya pembuluh sayap yang membentang bentuk sudut 40° atau dengan kata lain pengaruh pembuluh sayap yang terdistribusi di arah chord. Zhao dkk menguji secara eksperimen profil sayap tanpa penambahan pembuluh sayap dengan profil sayap dengan penambahan variasi pembuluh sayap yang berbentuk sudut 20° , 40° dan 60° (Gambar. 18 (a)) [7]. Pengujian variasi profil sayap tersebut dilakukan dengan bahan membran yang lentur. Hasil dari penelitian yaitu bahwa pembuluh sayap yang membentang di area sayap yang lebih besar yaitu pembuluh sayap yang berbentuk sudut 40° dan 60° dapat meningkatkan kinerja aerodinamika lebih signifikan dibandingkan pembuluh sayap yang berbentuk sudut 20° dan tanpa pembuluh sayap (Gambar. 18 (b)). Hal tersebut, karena pembuluh sayap yang berbentuk 40° dan 60° dapat memperkuat area sayap dalam menahan beban aerodinamika dan dapat memperbesar leading edge vortices (LEVs) dengan meningkatkan pusaran dibagian tip



Gambar. 18: Koefisien gaya angkat dan hambat pada pembuluh sayap yang bersudut dan tanpa sudut. (a) Kerangka ukuran pembuluh sayap yang bersudut, (b) perbandingan C_l dan hambat C_d pada setiap variasi profil sayap [7].

TABEL IV: Persentase kenaikan nilai (C_l/C_d) pada pembuluh sayap yang membentang berbentuk sudut 20° dan 40°

α	Sudut 0°	Sudut 20°	%
40	1,846	1,958	6,04
50	1,294	1,379	6,56
60	0,981	1,026	4,62
70	0,689	0,759	10,06
80	0,438	0,507	15,90
90	0,205	0,295	43,83

(tip vortices).

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan eksperimen dan analisis yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan, diantaranya adalah:

- 1) Profil sayap dengan membran yang paling lentur (**Rigid 2**) menghasilkan kinerja aerodinamika yang tinggi pada sudut serang $\alpha \leq 30^\circ$. Namun, profil sayap **Rigid 2** saat sudut serang $\alpha \leq 20^\circ$ belum dapat di simpulkan, karena hasil dari gaya hambat atau drag bernilai sangat fluktuatif yang sehingga lift-to-drag ratio sangat besar.
- 2) Peningkatan gaya angkat pada Rigid 2 pada sudut serang $\alpha \leq 30^\circ$ disebabkan kelenturan pada membran sayap yang dapat meningkatkan *leading edge vortices* (LEVs) dipermukaan atas sayap.
- 3) Profil sayap dengan pembuluh sayap yang lebih padat atau kaku di daerah dekat dengan pangkal sayap (*root*) yaitu **Rigid 5** memberikan pengaruh terhadap kinerja aerodinamika agar optimal. Kinerja aerodinamika yang dihasilkan paling stabil seiring bertambahnya sudut serang ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$).
- 4) Penambahan 2 pembuluh sayap yang membentang bersudut gabungan 20° dan 40° di daerah dekat dengan pangkal sayap (*root*) paling signifikan meningkatkan kinerja aerodinamika jika dibandingkan dengan profil sayap bersudut lainnya. Pengaruh peningkatan kinerja aerodinamika karena adanya pembuluh sayap yang membentang membentuk sudut 40° yang dapat menguatkan struktur sayap dalam menahan beban aerodinamika.
- 5) Fungsi dari pembuluh sayap yang padat di root agar dapat menguatkan profil sayap dan membentuk pusaran udara (*vortices*) di daerah tip yang disebut *tip vortices* (TiV) yang akan lebih meningkatkan LEVs.

B. Saran

Berdasarkan simpulan diatas, penulis mengajukan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya diantaranya yaitu material yang digunakan untuk membran sayap tidak menggunakan bahan kain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. J. Wootton, *Scientific American* **263**, 114 (1990).
- [2] S. Combes and T. Daniel, *Journal of Experimental Biology* **206**, 2989 (2003).

- [3] M. Tamai, J. Murphy and H. Hu, An experimental study of flexible membrane airfoils at low reynolds numbers, in *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (AIAA, 2008).
- [4] S. Swartz, J. Iriarte-Diaz, D. Riskin, X. Tian, A. Song and K. Breuer, Wing structure and the aerodynamic basis of flight in bats, in *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (AIAA, 2007).
- [5] W. Shyy, D. Jenkins and R. Smith, *AIAA journal* **35**, 1545 (1997).
- [6] W. Null and S. Shkarayev, *Journal of Aircraft* **42**, 1537 (2005).
- [7] L. Zhao, Q. Huang, X. Deng and S. P. Sane, *Journal of the Royal Society Interface* **7**, 485 (2009).
- [8] M. S. Genç, G. Özkan, H. H. Açikel, M. S. Kiriş and R. Yildiz, Effect of tip vortices on flow over naca4412 aerofoil with different aspect ratios, in *EPJ Web of Conferences*, 2016.