

RANCANG BANGUN MEKANISME *FLAPPING-WING* MENIRU KUPU-KUPU UNTUK PENGEMBANGAN *MICRO AERIAL VEHICLE (MAV)*

Reo Yudhono¹⁾, Arfie Armelia Erissonia²⁾

¹⁾Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta
reo.yudhono@gmail.com

²⁾Aeronautika, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta
arfie.erissonia@gmail.com

Abstrak

Pada penelitian ini kami melakukan studi untuk merancang mekanisme *flapping-wing* yang meniru kupu-kupu *Monarch*. Hasil dari penelitian ini akan menjadi dasar untuk pengembangan *Micro Aerial Vehicle (MAV)* berkonfigurasi sayap kepak.

Serangga terbang telah mengambil perhatian khusus dari para peneliti, terutama sebagai inspirasi dalam pengembangan *flapping-wing MAV*. Secara umum, serangga terbang menggunakan tiga kombinasi mekanisme: *delayed stall*, *rotational circulation* dan *wake capture* [5]. Beberapa serangga juga menggunakan mekanisme *clap and fling* untuk meningkatkan gaya aerodinamiknya. Kupu-kupu adalah salah satu serangga terbang yang memiliki jumlah spesies terbesar di dunia. Pemilihan kupu-kupu sebagai referensi desain adalah karena ukuran sayapnya yang besar, sehingga mudah untuk diobservasi, dan frekuensi kepakannya yang relatif rendah.

Desain mekanisme *flapping-wing* yang berhasil dihasilkan dari penelitian ini menggunakan mekanisme *four-bar linkage*, dengan dua buah *reduction gear* untuk masing-masing sayap. Gerakan mekanisme *flapping-wing* dibangkitkan oleh DC motor berukuran diameter 7 mm. Rasio *pinion* dan *reduction gear* yang digunakan adalah 9:1. Pembuatan desain dan simulasi mekanisme dilakukan pada perangkat lunak CAD. Pembuatan prototipe mekanisme *flapping-wing* dan sayap tiruan dilakukan dengan 3D printer. Pada akhir penelitian dilakukan pengukuran sudut kepakannya mekanisme *flapping-wing* yang sudah dibuat pada frekuensi kepakannya 10 Hz. Hasil pengukuran menunjukkan prototipe yang dibuat memberikan sudut kepakannya sebesar 125°, dengan sudut *upstroke* sebesar 75° dan sudut *downstroke* sebesar 50°.

Kata kunci: *Flapping-wing*, MAV, kupu-kupu, rancang bangun

Pendahuluan

Serangga terbang telah mengambil perhatian khusus dari para peneliti, terutama sebagai inspirasi dalam pengembangan *flapping-wing micro aerial vehicle (FW-MAV)*. Setiap jenis serangga memiliki kinematika, frekuensi kepakannya dan mekanisme rotasi sayap yang berbeda-beda. Namun, semua serangga terbang membangkitkan gaya aerodinamika dengan tiga kombinasi mekanisme yang sama: *delayed stall*, *rotational circulation*, dan *wake capture* [3]. Beberapa serangga juga menggunakan mekanisme *clap and fling* untuk meningkatkan gaya angkatnya.

Ketertarikan penelitian pada serangga terbang dan penerapannya pada desain FW-MAV adalah karena kemampuannya untuk terbang pada *Reynolds Number* rendah [3]. Selain itu, untuk ukuran sayap yang sama, mekanisme *flapping-wing* dapat membangkitkan gaya aerodinamika hingga 3 kali lebih besar dibandingkan pada konfigurasi *fixed wing*. Hal lain yang sangat menarik adalah kemampuan serangga merubah moda terbangnya dengan cara merubah kinematika kepakannya. Hal ini memungkinkan manuver terbang yang sangat cepat pada MAV.

Kupu-kupu adalah salah satu serangga terbang yang memiliki jumlah spesies terbesar di dunia. Ada sekitar 20.000 jenis kupu-kupu di dunia. Bentuk dan ukuran sayap kupu-kupu akan berbeda-beda untuk setiap jenisnya [2]. Namun semuanya mengepak pada frekuensi yang relatif sama, yaitu sekitar 7 - 21 Hz [2]. Pemilihan serangga kupu-kupu sebagai referensi desain pengembangan MAV adalah karena ukuran sayapnya yang relatif besar, sehingga mudah untuk diobservasi dan ditiru.

Selain itu, frekuensi kepakannya yang rendah akan berpengaruh langsung pada rendahnya daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan mekanisme *flapping-wing*. Jenis kupu-kupu yang dipilih untuk ditiru adalah jenis kupu-kupu *Monarch*, ditunjukkan pada Gambar 1. Jenis kupu-kupu ini memiliki ukuran sayap yang lebih besar dibandingkan dengan jenis kupu-kupu yang lain.



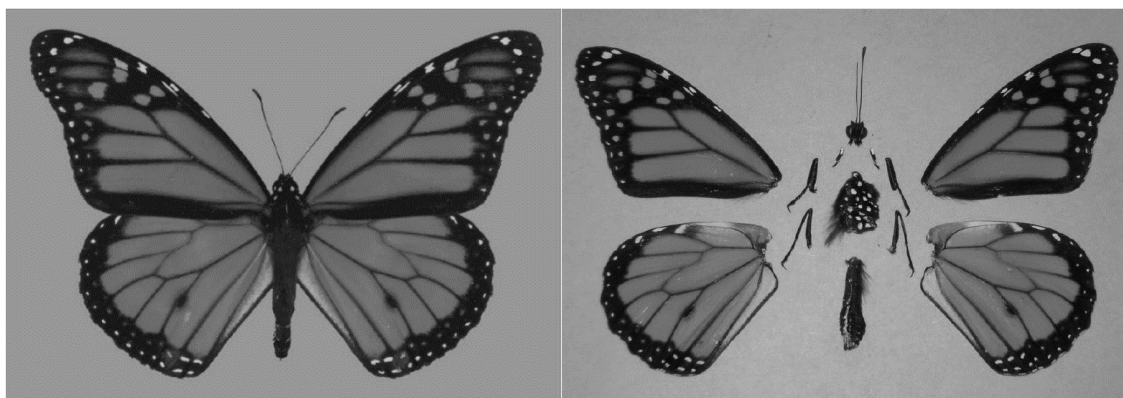
Gambar 1. Kupu-kupu *Monarch* (Stapanapituggit, 2015)

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan desain *flapping-wing* meniru kinematika sayap kupu-kupu. Penelitian ini akan menjadi dasar dari pengembangan MAV berkonfigurasi *flapping-wing*, yang akan terus dikembangkan hingga menjadi produk MAV yang dapat digunakan untuk fungsi *reconnaissance* dan *surveillance*, baik untuk komersil maupun untuk aplikasi militer. Data-data yang dihasilkan dari penelitian ini, bermanfaat sebagai data acuan untuk rancang bangun MAV selanjutnya.

Data dan informasi yang dihasilkan dalam penelitian ini tidak hanya dari sisi desain, namun juga dari sisi manufaktur dan perakitan. Dari pengalaman dasar yang telah dilakukan, penelitian ini akan menunjang penelitian-penelitian selanjutnya mengenai *flapping-wing* MAV.

Tinjauan Pustaka dan Pengembangan Hipotesis

Variasi morfologi pada kupu-kupu *Monarch* telah diteliti oleh Davis A.K. et al. pada papernya yang berjudul "*Measuring Intraspecific Variation in Flight-Related Morphology of Monarch Butterfly (Danaus plexippus): Which Sex Has the Best Flying Gear?*". Pada papernya ini, Davis A.K. et al melakukan pengukuran terhadap morfologi 47 kupu-kupu *Monarch* jantan dan 45 kupu-kupu *Monarch* betina. Setiap bagian tubuh spesimen kupu-kupu *Monarch* ditimbang dan diukur dimensinya. Gambar 2 menunjukkan salah satu spesimen kupu-kupu *Monarch* jantan dan bagian-bagian tubuhnya setelah dipisah-pisahkan untuk ditimbang. Hasil dari pengukuran semua spesimen disajikan pada Tabel 1.



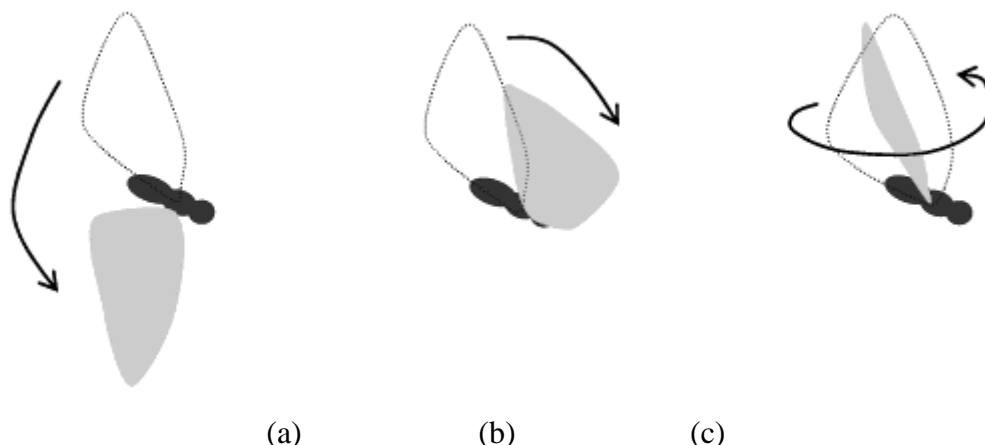
Gambar 2. (a) Kupu-kupu *Monarch* jantan. (b) Kupu-kupu *Monarch* dengan setiap bagian tubuh telah terpisah untuk ditimbang. (Davis, 2015)

Tabel 1. Karakteristik morfologi kupu-kupu *Monarch*. Nilai yang disajikan merupakan nilai rata-rata dengan standar deviasi dituliskan di dalam tanda kurung. (Davis, 2015)

Variable	Males	Females	Both sexes
Total wing area (mm ²)	157 (222)	154 (212)	156 (222)
Forewing area (mm ²)	55 (54)	55 (55)	55 (55)
Monarch live wt (mg)	38 (51)	37 (49)	37 (57)
Monarch dry wt (mg)	22 (15)	21 (14)	21 (15)
Prox dry wt (mg)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
Relative thorax size (%)	4 (1)	5 (1)	4 (1)
Abdomen dry wt (mg)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
Forewing dry wt (mg)	1 (1)	1 (1)	1 (1)
Wing loading (mg/mm ²)	3 (.009)	3.1 (.009)	3.1 (.011)
Flapping forewing wt (mg/mm ²)	36 (.0009)	42 (.0007)	39 (.0009)

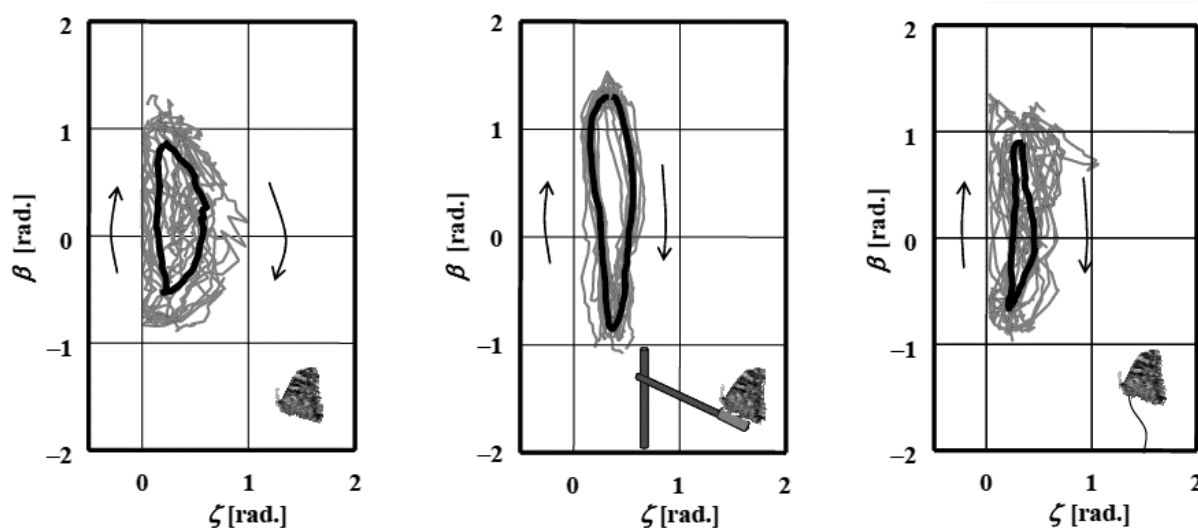
Secara morfologi, sayap kupu-kupu terdiri dari sepasang sayap depan (*forewing*) dan sepasang sayap belakang (*hindwing*). Saat terbang, sayap depan dan sayap belakang berkepak secara bersamaan (*coupling*). Pada kupu-kupu, mekanisme *coupling* ini terjadi akibat bagian belakang sayap depan bertindihan dengan bagian depan sayap belakang, sehingga kedua sayap ini bergerak layaknya satu buah sayap. Dalam bukunya yang berjudul “*The Urban Naturalist*”, Steven D. Garber menyatakan bahwa kupu-kupu *Monarch* memiliki rentang sayap 3.5 – 4 inci (8.9 – 10.2 cm) [6].

Kinematika sayap kupu-kupu telah diteliti oleh M. Fuchiwaki et al. pada papernya yang berjudul “*Characteristics of Butterfly Wing Motions and Their Application to Micro Flight Robot*”. Pada penelitiannya, M. Fuchiwaki menggunakan spesimen kupu-kupu berjenis *Cynthia cardui*. Parameter yang diukur pada observasi ini adalah sudut kepakan, β (*flapping angle*), sudut lead-lag, ζ (*lead-lag angle*) dan sudut rotasi, θ (*feathering angle*). Gambar 3 menunjukkan ketiga sudut kinematika sayap ini.



Gambar 3. (a) Flapping angle, (b) Lead-lag angle dan (c) Feathering angle (Fuchiwaki, 2010)

Parameter yang diobservasi dilakukan pada 3 kondisi: terbang bebas, terikat pada sebuah batang dan terikat pada tali. Hasil dari pengukuran pada ketiga kondisi ini disajikan pada gambar 4.



Gambar 4

Hasil perekaman posisi wing tip pada tiap kondisi terbang. (Fuchiwaki, 2010)

Dari penelitian yang dilakukannya, Fuchiwaki menemukan bahwa sudut kepakan (β) paling besar dicapai pada kondisi terbang terikat pada sebuah batang. Kondisi ini cukup merepresentasikan kondisi saat kupu-kupu beranjak untuk terbang (*take-off*), di mana memerlukan pembangkitan gaya aerodinamika yang paling besar. Pada kondisi ini, sudut kepakan dapat mencapai kira-kira -0.9 rad hingga 1.3 rad, atau setara dengan -51 deg hingga 74 deg. Dari hasil observasinya ini, Fuchiwaki membuat sebuah *micro flapping robot*. *Micro flapping robot* ini memiliki panjang chord 240 mm, bentang (setengah) sayap 80 mm dan wing loading 1.5 N/m². *Micro flapping robot* ini berkepak pada frekuensi 10 Hz.

Hasil dan Pembahasan

Merujuk pada penelitian mengenai morfologi kupu-kupu *Monarch* oleh Davis [1] dan observasi kinematik sayap oleh Fuchiwaki [4], kami telah menyusun parameter desain mekanisme flapping-wing dan sayap tiruan, sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.

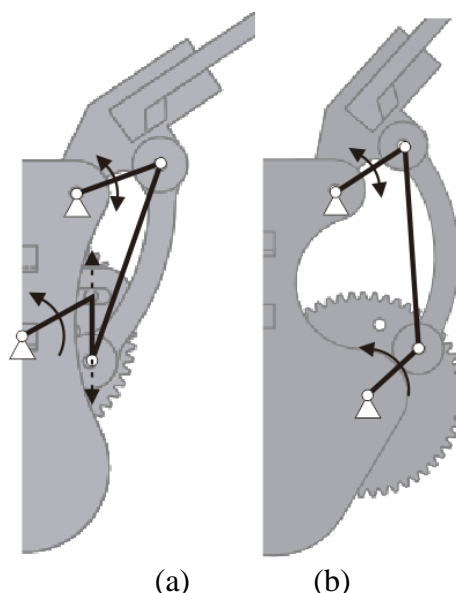
Tabel 2. Parameter desain mekanisme flapping-wing dan sayap tiruan

Parameter	Nilai
Sudut kepakannya di awal <i>downstroke</i>	75 deg
Sudut kepakannya di awal <i>upstroke</i>	50 deg
Sudut kepakannya (β)	125 deg
Span satu sisi sayap	50 mm

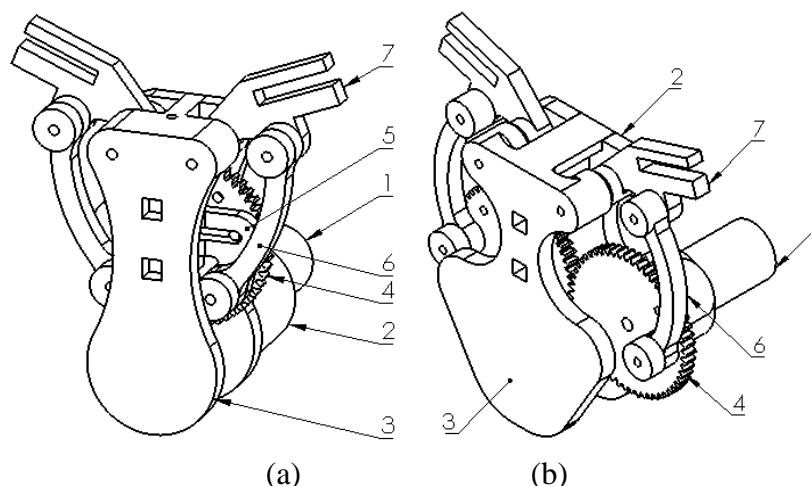
Desain mekanisme flapping-wing dilakukan dalam perangkat lunak SolidWorks 2016. Gerakan pada mekanisme akan dibangkitkan oleh *DC motor* berukuran diameter 7 mm. Gerakan putaran motor akan dirubah menjadi gerakan mengepak naik-turun pada sayap. Untuk merubah gerakan ini, kami membuat 2 buah mekanisme untuk dibandingkan.

Desain pertama (desain A) adalah dengan menggunakan perpaduan mekanisme *Scotch-yoke* dan *linkage*. Gerakan berputar dari motor akan direduksi terlebih dahulu pada *reduction gear*, dengan rasio 9:1. Pada *reduction gear* terdapat *shaft* yang akan menggerakkan *horizontal slider* naik dan turun. Perubahan gerakan berputar pada *reduction gear* ke gerakan translasi pada *horizontal slider* ini adalah mekanisme *Scotch-yoke*. Pada kedua ujung *horizontal slider* dipasang *coupler* yang akan terhubung pada *output link* dan sayap, sehingga gerakan naik-turun pada *horizontal slider* akan berubah menjadi gerakan kepakannya pada sayap. Mekanisme ini adalah mekanisme *linkage*.

Desain kedua (desain B) adalah dengan menggunakan mekanisme *four-bar linkage*. Gerakan berputar dari motor akan direduksi pada *reduction gear* dengan rasio 9:1. Pada desain ini terdapat 2 buah *reduction gear*, masing-masing untuk menggerakkan sayap kanan dan sayap kiri. Pada setiap *reduction gear* terdapat *shaft* yang akan terhubung dengan batang *coupler*. Batang *coupler* akan terhubung dengan *output link* dan sayap. Gerakan *coupler* akan membangkitkan gerakan mengepak pada sayap. Gambar 5 menunjukkan pemodelan mekanisme pada desain A dan desain B, sedangkan gambar 6 menunjukkan komponen-komponen pada desain A dan desain B.



Gambar 5. Model desain mekanisme *flapping-wing*: (a) kombinasi mekanisme *Scotch-yoke* dan *linkage*, (b) mekanisme *four-bar linkage*



Gambar 6. Komponen-komponen pada desain mekanisme flapping-wing: (a) desain A, (b) desain B.
1. DC motor, 2. Frame belakang, 3. Frame depan, 4. Reduction gear, 5. Horizontal slider, 6. Coupler, 7. Output link

Desain ini telah mengalami beberapa iterasi sejak pertama kali dibuat. Perubahan-perubahan desain dilakukan sebagai optimasi untuk menyesuaikan dengan keterbatasan-keterbatasan pada pembuatan prototipe. Berikut adalah hal-hal yang memberikan kontribusi terhadap optimasi desain mekanisme *flapping-wing*:

1. Metoda manufaktur

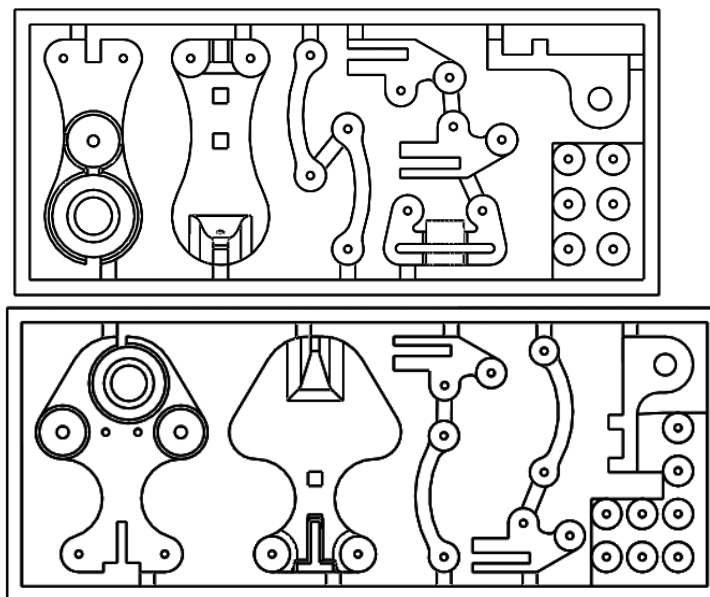
Pembuatan prototipe mekanisme *flapping-wing* dengan metoda *3D printing*, memberikan keterbatasan terhadap desain. Pada *3D printer* ukuran diameter *nozzle* adalah 0.4 mm. Pada awal-awal pembuatan desain, terdapat beberapa bagian yang memiliki lebar bagian bukan kelipatan 0.4 mm. Hal ini menyebabkan timbulnya lubang akibat tidak tertutup oleh material hasil printing. Sebagai contoh, apabila kita membuat lebar bagian 1 mm, maka *3D printer* akan mencetak kedua sisi lebar bagian tersebut masing-masing 0.4 mm, sementara bagian tengah dari lebar bagian tersebut tersisa 0.2 mm, lebih kecil dari ukuran *nozzle*, sehingga bagian tersebut tidak akan tertutup oleh material.

Optimasi yang dilakukan untuk menyesuaikan dengan metoda manufaktur ini adalah dengan mendesain keseluruhan komponen mekanisme *flapping-wing* memiliki lebar dalam kelipatan 0.4 mm. Terutama pada komponen-komponen yang memiliki lebar relatif kecil, seperti pada *vein* sayap yang memiliki lebar sebesar 0.8 mm.

2. Kekuatan Material

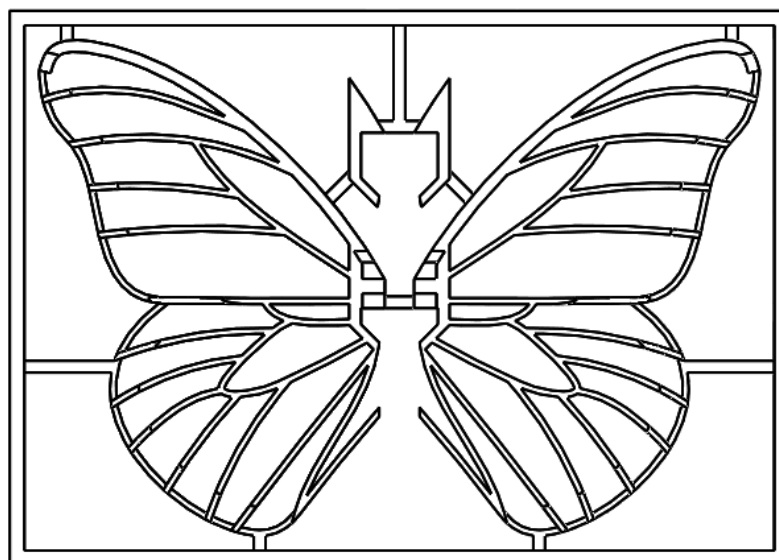
Material ABS yang digunakan pada *3D printer* memiliki kekuatan yang cukup baik, dibandingkan dengan material PLA. Namun, kelenturan material ABS lebih rendah dari PLA, sehingga material ABS cenderung lebih getas. Berdasarkan pada beberapa percobaan pembuatan prototipe, ukuran lebar minimal untuk komponen-komponen mekanisme *flapping-wing* adalah 2 mm. Sementara untuk sayap tiruan, ukuran lebar terkecil adalah 0.8 mm.

Sebelum dilakukan pembuatan prototipe dengan *3D printer*, masing-masing komponen disusun sedemikian rupa sehingga menjadi satu bagian. Hal ini dilakukan agar saat pembuatan, hasil yang didapat adalah sudah berupa 1 set mekanisme *flapping-wing*. Gambar 7 menunjukkan komponen-komponen *flapping-wing* yang sudah disusun pada perangkat lunak CAD, dan siap untuk dibuat pada *3D printer*.



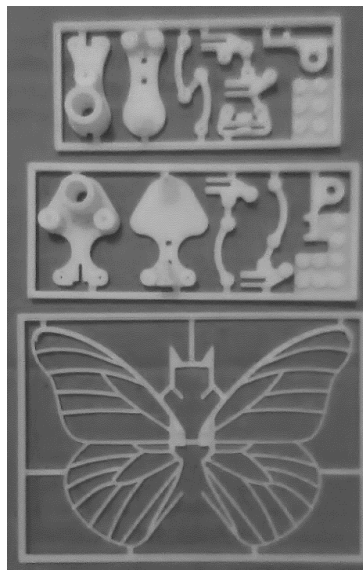
Gambar 7. Komponen-komponen *flapping-wing* tersusun dan siap dibuat pada 3D printer. Atas: mekanisme A, bawah: mekanisme B.

Hal yang sama juga dilakukan pada pembuatan sayap tiruan. Kedua sayap kiri dan kanan disusun sehingga dapat dibuat dalam 1 kali proses pencetakan dengan *3D printer*. Gambar 8 menunjukkan penyusunan sayap tiruan pada perangkat lunak CAD.



Gambar 8. Desain sayap tiruan yang siap dibuat pada 3D printer

Proses pembuatan prototipe dilakukan pada *3D printer* tipe UP Plus 2, dengan pengaturan resolusi pada sumbu Z 0.1 mm dan hasil pencetakan solid. Gambar 9 menunjukkan hasil pembuatan prototipe dari *3D printer*.

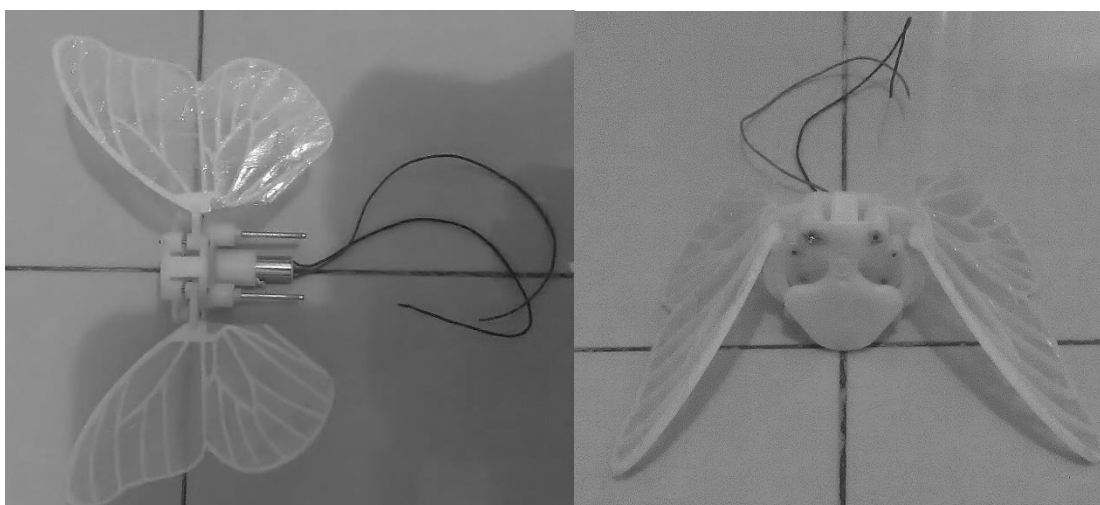


Gambar 9. Hasil pembuatan dari 3D printer

Perakitan mekanisme *flapping-wing* dilakukan manual dengan tangan, tanpa ada peralatan khusus. Sebelum dirakit, semua permukaan komponen-komponen mekanisme *flapping-wing* dihaluskan menggunakan amplas. Hal ini dilakukan untuk mengurangi gesekan yang timbul saat mekanisme bekerja. Setiap sumbu putar dibuat dari mata bor 1 mm. Komponen-komponen yang perlu disatukan direkatkan dengan lem *Cyano-Acrilic* (CA).

Dari 2 desain yang telah dibuat, pada saat perakitan ditemukan bahwa desain A memiliki permasalahan pada perubahan gerak rotasi menjadi gerak translasi. Dari beberapa kali perakitan mekanisme desain A, tidak menghasilkan satupun prototipe yang dapat beroperasi dengan baik. Sementara untuk desain B, mekanisme dapat beroperasi dengan baik.

Sayap tiruan dibuat dengan melekatkan membran plastik ke *vein* sayap tiruan yang dibuat pada 3D printer. Membran plastik direkatkan dengan menggunakan selotip dua sisi. Untuk perakitan sayap tiruan, perekatan dengan selotip dua sisi memberikan hasil yang lebih baik daripada perekatan dengan lem CA. Gambar 10 menunjukkan mekanisme *flapping-wing* desain B beserta sayap tiruan setelah selesai dirakit.

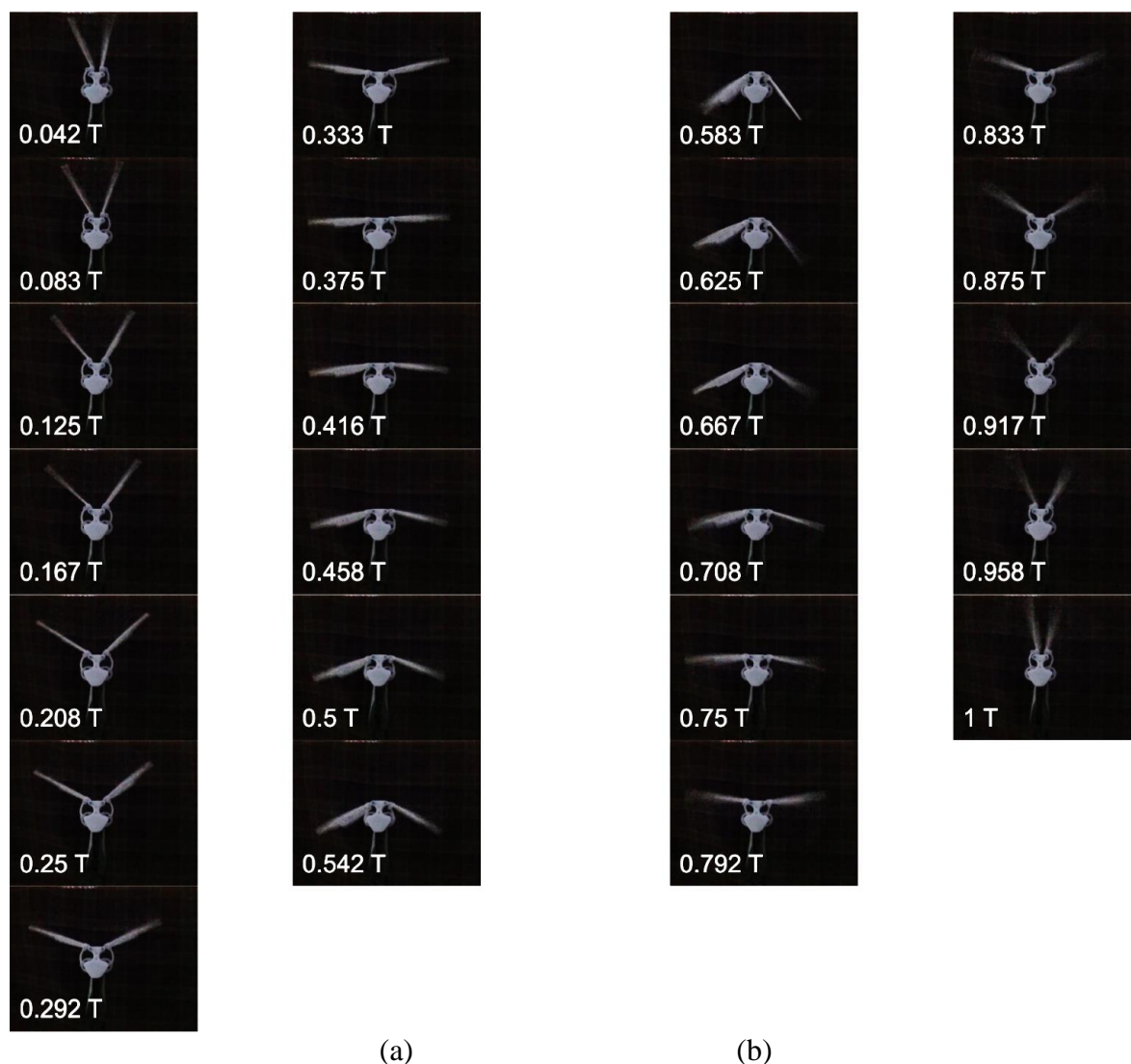


Gambar 10. Prototipe mekanisme *flapping-wing* desain B dan sayap tiruan setelah selesai dirakit

Untuk menjamin mekanisme *flapping-wing* bekerja dengan baik saat dioperasikan, pada setiap langkah perakitan, komponen-komponen yang bergerak harus selalu dipastikan dapat bergerak dengan lancar. Pada akhir perakitan, bagian-bagian yang memiliki komponen bergerak diberikan lubricant WD-40.

Setelah prototipe mekanisme *flapping-wing* sistem selesai dirakit, mekanisme akan diujicobakan dengan memberikan voltase ke *DC motor*. Hal-hal yang perlu diperiksa adalah pergerakan sayap pada mekanisme harus mengepak dengan baik, serta memberikan sudut kepakkan yang sesuai dengan desain. Gerakan sayap saat mengepak direkam dengan kamera berkecepatan cukup tinggi. Pada penelitian ini, kepakkan sayap prototipe mekanisme *flapping-wing* direkam menggunakan kamera Xiaomi Yi 4K, dengan pengaturan resolusi 1280 x 720 pixel dan kecepatan 240 fps. Perekaman dilakukan dari arah depan prototipe, sehingga besarnya sudut kepakkan dapat dilakukan.

Gambar 11 (a) menunjukkan sekuensial kepakkan sayap prototipe mekanisme *flapping-wing* mulai dari posisi sayap di awal hingga akhir kepakkan ke bawah (*downstroke*). Sedangkan gambar 11 (b) menunjukkan sekuensial kepakkan sayap prototipe mekanisme *flapping-wing* dari posisi sayap di awal hingga akhir kepakkan ke atas (*upstroke*).

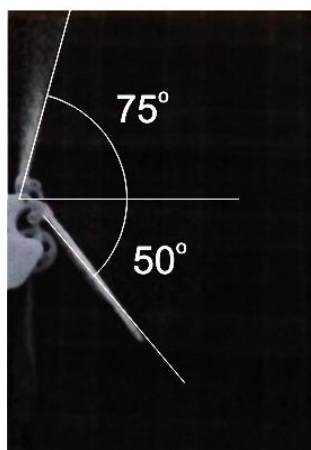


Gambar 11. Foto sekuensial gerakan kepakkan sayap pada prototipe mekanisme *flapping-wing* saat: (a) *downstroke* dan (b) *upstroke*

Dari foto sekuensial di atas, dapat dilihat bahwa untuk melakukan 1 kepakan sayap, hasil perekaman memberikan 24 buah frame. Dengan pengaturan kecepatan perekaman sebesar 240 fps, hal ini berarti dalam 1 detik, mekanisme *flapping-wing* melakukan kepakan sebanyak 10 kali. Atau dengan kata lain, frekuensi kepakan sayap adalah 10 Hz. Hal ini sudah sesuai dengan yang diharapkan.

Dari foto sekuensial di atas juga dapat dilihat bahwa mekanisme *flapping-wing* membutuhkan waktu *downstroke* yang lebih lama daripada waktu *upstroke*. Untuk melakukan gerakan *downstroke*, dibutuhkan waktu selama 0.542 perioda, sedangkan untuk melakukan gerakan *upstroke* dibutuhkan waktu selama 0.458 perioda.

Pengukuran sudut kepakan dilakukan dengan mengukur hasil perekaman pada posisi sayap di awal *downstroke* dan di awal *upstroke*. Sudut kepakan diukur dengan menempatkan foto hasil perekaman pada perangkat lunak CAD. Gambar 12 menunjukkan hasil pengukuran sudut kepakan sayap mekanisme *flapping-wing*.



Gambar 12. Hasil pengukuran sudut kepakan

Pengukuran sudut kepakan memberikan nilai yang sesuai dengan perancangan, yaitu sudut *upstroke* sebesar 75 deg dan sudut *downstroke* 50 deg.

Kesimpulan

Dari kegiatan penelitian ini, telah didapatkan desain mekanisme *flapping-wing* meniru kupu-kupu yang telah mampu menunjukkan keluaran geometri yang dapat dibandingkan dengan kupu-kupu. Pembuatan prototipe mekanisme *flapping-wing* juga sudah dapat dilakukan dengan baik menggunakan metoda manufaktur 3D printing.

Dari sisi desain, perancangan mekanisme *flapping-wing* dengan mekanisme *four-bar linkage* (desain B) memberikan hasil yang lebih baik daripada dengan mekanisme *scotch and yoke* (desain A). Permasalahan yang timbul pada desain A adalah pada bagian horizontal slider, yang merubah gerakan rotasi menjadi gerakan translasi. Perubahan gerakan ini tidak berjalan dengan baik. Sementara pada desain B, gerakan komponen-komponen pada mekanisme seluruhnya adalah gerakan rotasi.

Dari sisi manufaktur, pembuatan prototipe mekanisme *flapping-wing* dengan 3D printer dapat dilakukan dan telah memberikan hasil yang konsisten. Ketepatan hasil dari 3D printer juga baik.

Prototipe mekanisme *flapping-wing* telah dioperasikan pada frekuensi kepak 10 Hz, sesuai dengan referensi 4, dan telah memberikan besar sudut kepak yang sesuai dengan desain, yaitu 75 deg *upstroke* dan 50 deg *downstroke*.

Daftar Pustaka

- [1] A. K. Davis and M. T. Holden, "Measuring Intraspecific Variation in Flight-Related Morphology of Monarch Butterflies (*Danaus plexippus*): Which Sex Has the Best Flying Gear?," *Journal of Insects*, vol. 2015, 2015.
- [2] R. Betts and R. J. Wootton, "Wing shape and flight behaviour in butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea): a preliminary analysis," *Journal of Experimental Biology*, vol. 138, pp. 271-288, 1988.
- [3] M. H. Dickinson, F. O. Lehmann, and S. P. Sane, "Wing rotation and the aerodynamics basis of insect flight," *Science*, vol. 284, pp. 1954-1960, 1999.
- [4] . Fuchiwaki, T. Imura, and K. Tanaka, "Measuring Intraspecific Variation in Flight-Related Morphology of Monarch Butterflies (*Danaus plexippus*): Which Sex Has the Best Flying Gear?," presented at *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2010.
- [5] N. Satapanapituggit, K. Verojporn, D. Tin, L.Y. Chan and S. Srigrarom, "Flow field of flapping Monarch and Swallowtail butterfly-like wings," *The Journal of Unmanned System Technology*, vol. 3, no.1, pp. 6-15, 2015.
- [6] P S. D. Garber, *The Urban Naturalist*, Dover Publication, 1998.