Rancang Bangun Pesawat Udara Tanpa Awak Sayap Tetap Bermesin Potong Rumput: Kajian Propulsi

Ferdi Sriwahyuda[1], Kobilah Alfariza Abdillah Sopiyan[2], Retno Aulya[3], Adrifalni[4], Saskiani Fatimah Putri[5], Syam Husaini Ardiansyah[6], Singgih Satrio Wibowo[*]

[1]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: ferdi.sriwahyuda.aer23@polban.ac.id
[2]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: kobilah.alfariza.aer23@polban.ac.id
[3]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: retno.aulya.aer23@polban.ac.id
[4]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: adrifalni.aer23@polban.ac.id
[5]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: saskiani.fatimah.aer23@polban.ac.id
[6]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: syam.husaini.aer23@polban.ac.id
[7]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
[*]*E-mail Korespondensi: singgih.wibowo@polban.ac.id*

ABSTRAK

Penggunaan mesin pemotong rumput sebagai sistem propulsi pada UAV *fixed wing* memerlukan data performa berupa *thrust* dan *torque* yang akurat. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun alat ukur kinerja mesin untuk mengukur *thrust* dan *torque*, serta menentukan propeler yang paling sesuai untuk UAV *fixed wing*. Alat ukur menggunakan tiga *load cell*, modul HX711, dan Arduino. Pengujian dilakukan pada mesin pemotong rumput Matrix BG 431 dengan variasi propeler 17×8, 18×8, dan 19×8 pada bukaan *throttle* 30%, 50%, dan 100%. Hasil kalibrasi menunjukkan seluruh sensor memiliki *error* di bawah 1%. Namun, pengujian mengalami gangguan *electromagnetic interference* (EMI) dari sistem pengapian mesin yang menyebabkan Arduino mengalami *reset*, sehingga *thrust* dan *torque* ditentukan melalui perhitungan berdasarkan data RPM yang diukur menggunakan *tachometer*. Hasil penelitian menunjukkan propeler 17×8 menghasilkan *thrust* maksimum sebesar 44,09 N dan *torque* sebesar 0,92 Nm, sehingga memiliki performa terbaik dan paling sesuai untuk diaplikasikan pada UAV *fixed wing*.

Kata Kunci:
UAV *Fixed-wing*, Mesin Pemotong Rumput, *Test Bench*, *Load Cell*,

The use of a lawn mower engine as the propulsion system for a UAV fixed wing requires accurate thrust and torque performance data. This study aims to design and develop an engine performance measurement system to determine thrust and torque, as well as to identify the most suitable propeller for a fixed-wing UAV. The measurement system consists of three load cells, an HX711 module, and an Arduino. Performance tests were conducted on a Matrix BG 431 lawn mower engine using 17×8, 18×8, and 19×8 propellers at throttle openings of 30%, 50%, and 100%. Calibration results showed that all sensors had measurement errors below 1%. However, electromagnetic interference (EMI) generated by the engine ignition system caused repeated Arduino resets, preventing direct thrust and torque measurements. Therefore, engine speed (RPM) was measured using a tachometer, and thrust and torque were calculated using the corresponding equations. The results showed that the 17×8 propeller produced the highest thrust of 44.09 N and an engine torque of 0.92 Nm, indicating the best overall performance and making it the most suitable propeller for application in a fixed-wing UAV.

Keywords:
UAV Fixed-wing, Lawn Mower Engine, Test Bench, Load Cell

1. PENDAHULUAN

Perkembangan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) mengalami peningkatan yang pesat seiring dengan tingginya kebutuhan di berbagai sector(1,2) Secara umum, UAV dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu *rotary wing dan fixed wing*, yang masing-masing memiliki karakteristik performa dan kebutuhan sistem propulsi yang berbeda(3)**.** UAV *fixed wing* memiliki keunggulan utama dalam hal efisiensi energi dan durasi terbang yang lebih tinggi dibandingkan *rotary wing.* Hal ini disebabkan oleh gaya angkat yang berasal dari sayap, sehingga sistem propulsi pada *fixed wing* berfungsi utama untuk menghasilkan *Thrust* (4,5)

Di pasaran tersedia berbagai mesin alternatif berbiaya rendah, seperti mesin pemotong rumput dengan spesifikasi putaran 2.000 - 10.000 RPM dan daya sekitar 1 HP. Salah satu sistem propulsi adalah mesin piston (6). Namun, spesifikasi yang diberikan pabrikan umumnya masih bersifat umum dan belum menjelaskan karakteristik performa mesin secara rinci, khususnya parameter *Thrust* dan *Torque* yang berperan penting dalam perancangan *UAV fixed-wing* (7)

2. Tinjauan Pustaka

Dalam penelitian *Design of a Low-Cost Fixed-Wing UAV* membahas perancangan dan pembuatan UAV *fixed-wing* berbiaya rendah, meliputi desain struktur, konfigurasi sayap, dan uji terbang. Namun, penelitian ini masih berfokus pada perancangan UAV dan belum mengkaji karakteristik sistem propulsi, khususnya pengukuran *Thrust* dan *Torque*. (8)

Dalam penelitian *Rancang Bangun Alat Uji Thrust Motor Brushless dengan Variasi Propeler* mengembangkan alat uji untuk mengukur *Thrust* motor *brushless* dengan variasi propeler. Penelitian menunjukkan bahwa ukuran dan jenis propeler memengaruhi besar *Thrust*, tetapi masih terbatas pada motor *brushless* dan belum diterapkan pada sistem propulsi UAV *fixed-wing* bermesin piston. (9)

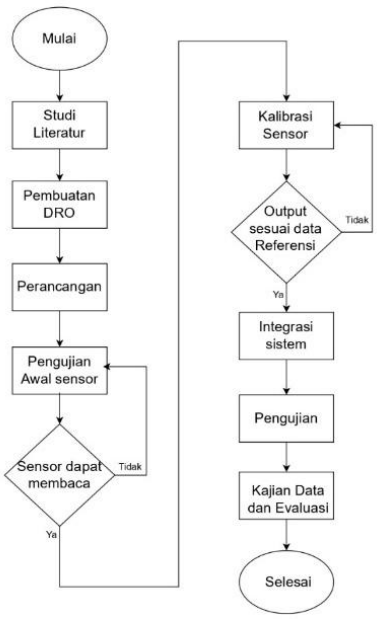
Dalam penelitian *Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen untuk Propeler UAV Kecil: Kajian Subsistem* merancang alat ukur *Thrust* dan *Torque* secara simultan menggunakan *load cell* dan mikrokontroler dengan akurasi yang baik setelah kalibrasi, namun masih diperuntukkan bagi motor listrik sehingga belum mengakomodasi karakteristik mesin pembakaran dalam. (10)

Dalam tugas akhir *Rancang Bangun Perangkat Pengukur Gaya Dorong, Kecepatan Putaran, dan Torsi Propeler Pesawat Model* mengembangkan alat ukur *Thrust*, RPM, dan *Torque* secara bersamaan dengan hasil pengukuran yang konsisten, tetapi masih menggunakan motor *brushless* sehingga belum diterapkan pada sistem propulsi UAV *fixed-wing* bermesin piston. (11)

Dalam penelitian *Prototype Station Dedicated to Aircraft Engine Propeller Profiles and Advanced Materials Testing* mengembangkan *test bench* untuk pengujian statis mesin piston dan propeler, namun belum mengkaji penggunaan mesin pemotong rumput sebagai alternatif sistem propulsi UAV *fixed-wing* maupun implementasinya dalam proses perancangan UAV. (12)

3. Metode Penyelesaian masalah

Metode penyelesaian masalah pada penelitian ini disusun dalam beberapa tahapan yang disajikan dalam bentuk diagram alir. Diagram alir metode penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 *Flowchart*

3.1 Studi Literatur

Studi Literatur dilakukan dengan cara eksplorasi materi yang berkaitan dengan UAV *fixed wing* dan juga *Test bench*. Informasi diperoleh dari berbagai macam sumber, seperti jurnal, e-*book*, website, serta bimbingan dari dosen pembimbing

3.2 Pembuatan DRO

Tahap awal perancangan dilakukan dengan menyusun *Design Requirement Objective* (DRO) sebagai acuan pengembangan *test bench* dan UAV *fixed wing*. Rincian DRO disajikan pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.**.

Tabel 1 DRO UAV *Test Bench*

No.	Parameter	Nilai
1	Kemampuan Alat ukur	Mampu mengukur *Thrust* dan *Torque* mesin potong rumput secara statis
2	Sensor Pengukuran	*Load cell*
3	Kapasitas pengukuran	20 Kg
4	Material Kerangka	AISI 1020
5	Target Pembacaan *Thrust*	4-5 kg
6	Error kalibrasi sensor	≤ 1%

Error! Reference source not found. Tabel 2 DRO *Fixed Wing*

No.	Parameter	Nilai
1	Jenis UAV	*Fixed-wing*
2	Konfigurasi Sayap	*Rectangular, High Wing*
3	Sistem Propulsi	*Single engine Piston (Pusher)*
4	Tipe *Landing Gear*	*Tricycle Landing gear*
5	Konfigurasi *Empennage*	*Twin Boom*

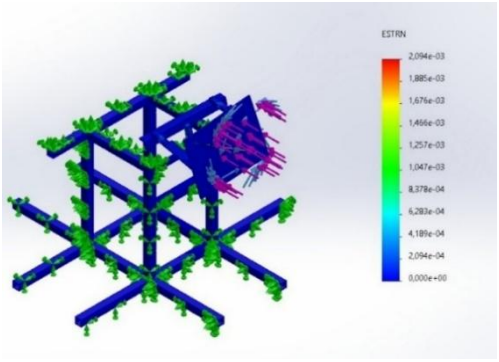
No.	Parameter	Nilai
6	Dimensi sayap	*Wingspan 2,5 m, Chord 0,3 m*
7	*MTOW* perencanaan	*10 Kg*
8	*MTOW* aktual	*15 Kg*
9	Estimasi *Thrust* yang dihasilkan mesin	*4-5* Kg (hasil perhitungan)
10	Kecepatan *Cruise*	*79 km/h* atau *22 m/s*
11	Kecepatan *Stall*	*54 km/h* atau *15 m/s*

Pada tahap awal perancangan, target MTOW UAV sebesar 10 kg. Namun, setelah proses manufaktur dan integrasi seluruh komponen selesai, berat aktual pesawat meningkat sehingga MTOW diubah menjadi 15 kg**.** Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan pada tahap analisis dan evaluasi performa UAV.

3.3 Perancangan

3.3.1 Perancangan kerangkja alat ukur

Kerangka alat ukur dirancang menggunakan SolidWorks dengan dimensi yang disesuaikan terhadap ukuran aktual komponen, kemudian dilakukan simulasi beban statis menggunakan fitur *Simulation* untuk mengevaluasi kekuatan struktur terhadap beban maksimum berupa gaya *Thrust* sebesar 5 kgf, *Torque* sebesar 1 kgf, serta beban massa mesin dan kerangka. Hasil simulasi menunjukkan tegangan maksimum sebesar 228,3 MPa, masih berada di bawah tegangan luluh AISI 1020 sebesar 351,5 MPa sehingga struktur dinyatakan aman digunakan. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Hasil Simulasi beban Statis dengan Solidworks

3.3.2 Perancangan sistem DAQ

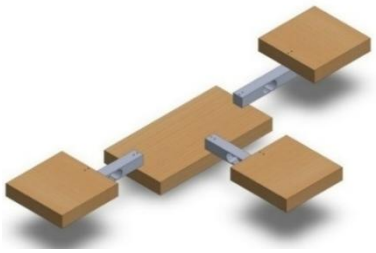
Selanjutnya dilakukan perancangan sistem elektronik. Konfigurasi pin dan *wiring* sistem elektronik disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 *Wiring* 3 Load cell

Load cell	Pin HX711	Pin Arduino
A, B & C	VCC	5V
A, B & C	GND	GND
A	DT	Pin 7
B	DT	Pin 4
C	DT	Pin 6
A	SCK	Pin 5
B	SCK	Pin 3
C	SCK	Pin 2

3.4 Pengujian Awal Sensor

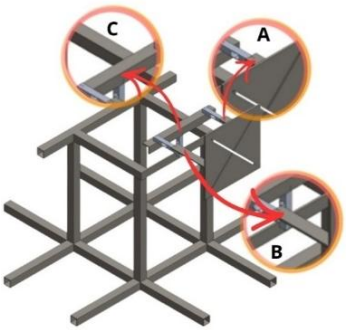
Pengujian awal dilakukan untuk memastikan *load cell* berfungsi dengan baik menggunakan beberapa beban referensi yang telah ditimbang dengan timbangan digital dan dipasang pada kerangka sederhana berbahan triplek. Ilustrasi pengujian awal ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Ilustrasi Pengujian Awal Sensor

3.5 Kalibrasi Sensor

Proses kalibrasi dilakukan pada masing-masing *load cell* untuk memastikan kesesuaian keluaran sensor dengan beban sebenarnya, yaitu dengan meletakkan beban di tengah untuk sensor *Thrust* serta pada lengan kanan dan kiri untuk sensor *Torque* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Ilustrasi Tempat Peletakan Beban untuk Kalibrasi

Kalibrasi Kalibrasi awal menggunakan anak timbangan 50 gram, 100 gram, dan 150 gram sebagai beban acuan untuk menentukan *calibration factor* masing-masing *load cell*.

3.5.1 Kalibrasi Dengan Beban Yang Lebih Besar

Selain Pengujian lanjutan dilakukan menggunakan beban barbel 2 kg dan 6 kg untuk memverifikasi respons sensor pada rentang pembebanan yang mendekati kondisi operasional *test bench.*

3.6 Integrasi Sistem

Tahap integrasi sistem dilakukan dengan menyesuaikan konfigurasi pin Arduino dan *calibration factor* setiap *load*

cell pada Arduino IDE dan aplikasi *Thrust and Moment Meter* (TMM), sehingga data pengukuran dapat ditampilkan secara *real-time*.

3.7 Pengujian

Pengujian performa mesin dilakukan menggunakan propeler berukuran 17×8, 18×8, dan 19×8 inci pada bukaan *throttle* 30%, 50%, dan 100% yang dikendalikan menggunakan *remote control* Futaba T8J melalui *receiver* dan *servo*.

Pada pengujian ini, *Thrust* dan *Torque* awalnya direncanakan diukur secara langsung menggunakan *load cell*. Namun, akibat kendala pada sistem akuisisi data, *Thrust* dihitung menggunakan Persamaan (1) , mengacu pada (7,13) , sedangkan perhitungan *Torque* menggunakan Persamaan (2) dan Persamaan (3), mengacu pada (6,14).

$$F = 1.225 \frac{\pi(0.0254 \cdot d)^2}{4} \left[\left(RPM_{prop} \cdot 0.0254 \cdot Pitch \cdot \frac{1\,min}{60sec} \right)^2 \right] - \left[\left(RPM_{prop} \cdot 0.0254 \cdot pitch \frac{1\,min}{60sec} \right) V_0 \right] \left(\frac{d}{3.29546 \cdot pitch} \right)^{1.5} \quad (1)$$

$$P = \tau \cdot \omega \quad (2)$$

$$\tau = \frac{60 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (3)$$

3.8 Kajian Data Dan Evaluasi

Tahap akhir penelitian dilakukan dengan menganalisis hasil pengujian untuk menentukan variasi propeler yang menghasilkan *Thrust* dan *Torque* terbaik. Selain itu, analisis ini digunakan untuk mengevaluasi kelayakan mesin pemotong rumput Matrix BG 431 sebagai sistem propulsi alternatif pada UAV *fixed wing*.

4. Hasil Dan Pembahasan

4.1 Pembuatan Perangkat Uji

Pembuatan perangkat uji meliputi pembuatan kerangka utama, proses pemotongan dan pengelasan material, serta pemasangan sensor pada struktur *test bench* untuk menghasilkan perangkat yang, stabil, dan mampu mengukur *Thrust* serta *Torque*.Pengujian Awal Sensor

Pengujian awal dilakukan menggunakan beban referensi yang telah divalidasi dengan timbangan digital untuk memverifikasi pembacaan *load cell*. Hasil pengujian menetapkan *calibration factor* awal sebesar 102,80 untuk *load cell* A, 101,80 untuk *load cell* B, dan 100,58 untuk *load cell* C. Rincian hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Pengujian Awal Sensor

Load Cell	Beban Acuan (gram)	Beban Terbaca (gram)	Error (%)
A	78	78	0
	97	96	1,03
	112	111	0,89
B	117	117	0
	78	78	0
	97	96	1,03
	112	112	0
	117	117	0
C	78	78	0
	97	97	0
	112	112	0
	117	116	0,85
	Error		**0,32**

4.2 Hasil Kalibrasi Load Cell

4.3.1 Hasil Kalibrasi Dengan Anak Timbangan

Kalibrasi dilakukan menggunakan beban 50 gram, 100 gram, dan 150 gram untuk menentukan *calibration factor* dan persentase *error* masing-masing *load cell*. Hasil kalibrasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Hasil Kalibrasi dengan Load Cell

Load Cell	Beban Acuan (gram)	Beban Terbaca (gram)	Error (%)
A	50	49	2
	100	100	0
	150	150	0
B	50	51	2
	100	100	0
	150	149	0,67
C	50	50	0
	100	100	0
	150	149	0,67
	Error		**0,379**

4.3.2 Hasil Kalibrasi Dengan Beban Yang Lebih Besar

Kalibrasi lanjutan dilakukan menggunakan beban 1945 gram dan 5900 gram untuk memverifikasi akurasi *load cell* pada kondisi pembebanan yang mendekati pengoperasian. Hasil kalibrasi disajikan pada Tabel 6.

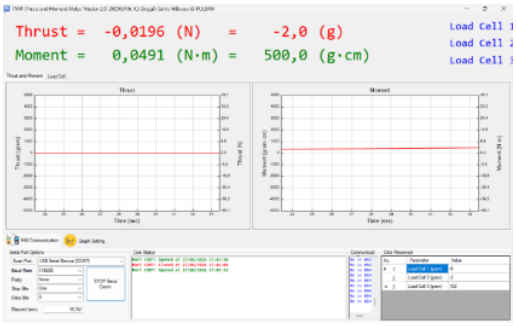
Tabel 6 Hasil kalibrasi dengan beban yang lebih besar

Load Cell	Beban Acuan (gram)	Beban Terbaca (gram)	Error (%)
A	1945	1943	0,10
	5900	5889	0,19
B	1945	1934	0,57
	5900	5874	0,44
C	1945	1943	0,72
	5900	5889	0,47
	Error		**0,415**

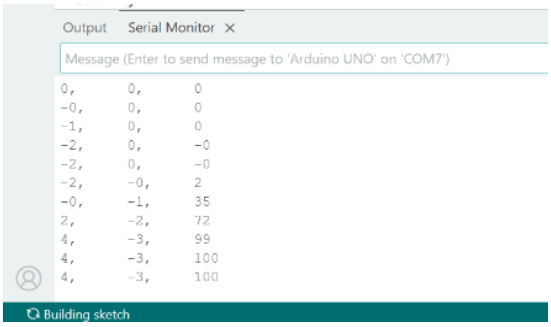
4.3 Integrasi Sistem

Setelah dilakukan penyesuaian pada kode pemrograman, pembacaan beban pada Serial Monitor Arduino IDE telah sesuai dengan beban referensi, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Pada aplikasi *Thrust* and Moment Meter (TMM), nilai yang ditampilkan masih lima kali lebih besar karena

pada *source code* masih digunakan parameter panjang lengan momen sebesar 5 cm. Oleh karena itu, dilakukan penyesuaian Kembali agar hasilnya sesuai. Tampilan hasil pembacaan pada aplikasi TMM ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5 Integrasi Sistem pada Arduino IDE

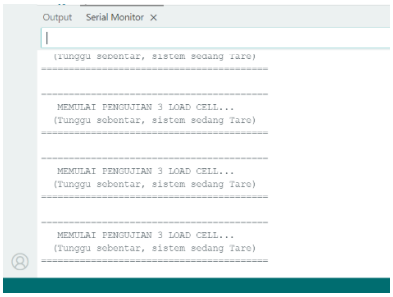


Gambar 6 Integrasi Sistem pada Aplikasi TMM

4.4 Hasil pengujian

4.5.1 Keterbatasan pengujian

Sebelum mesin dihidupkan, ketiga *load cell* dan sistem DAQ berfungsi dengan baik. Namun, saat mesin beroperasi, Arduino mengalami *reset* secara berulang sehingga proses akuisisi data terhenti akibat Electromagnetic Interference (EMI) dari sistem pengapian mesin. Kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Gangguan Saat Mesin Dihidupkan

4.5.2 Upaya penanganan kendala

Untuk mengatasi kegagalan sistem akibat interferensi tersebut, beberapa upaya mitigasi telah dilakukan dengan hasil sebagai berikut:

1. Memisahkan *wiring* dari kerangka uji untuk mengurangi pengaruh getaran. Namun, sensor masih mengalami reset saat mesin dioperasikan.
2. Menjauhkan posisi Arduino dari mesin guna meminimalkan pengaruh *electromagnetic interference* (EMI) dari sistem pengapian. Meskipun demikian, sistem tetap mengalami reset saat mesin dinyalakan.
3. Melapisi kabel sensor dengan *aluminium foil* sebagai *shielding* untuk mengurangi *noise* dan gangguan elektromagnetik. Namun, upaya ini juga belum berhasil karena sistem masih mengalami reset ketika mesin dioperasikan.

4.5.3 Metode pengujian alternatif

Akibat kendala teknis pada sensor, pengujian dilakukan dengan mengukur RPM menggunakan *tachometer*, kemudian menghitung *Thrust*, daya, dan *Torque* menggunakan persamaan empiris. Metode ini dipilih karena pengukuran langsung tidak dapat dilakukan akibat gangguan EMI dan didukung oleh penelitian Manigandan *et al.* yang melaporkan deviasi 2-12% terhadap hasil pengujian eksperimental.(15). Sebagai contoh, berikut disajikan langkah-langkah perhitungan *Thrust* (4)(5) serta *Torque* (6)(7). Perhitungan pada kondisi pengujian lainnya dilakukan dengan prosedur yang sama.

$$F = 1.225\frac{\pi(0.0254\cdot 17)^2}{4}\left[\left(4315\cdot 0.0254\cdot 8\cdot\frac{1\,min}{60sec}\right)^2\right] - \left[\left(4315\cdot 0.0254\cdot 8\cdot\frac{1\,min}{60sec}\right)V_0\right]\left(\frac{17}{3.29546\cdot 8}\right)^{1.5} \quad (4)$$

$$F = 2022.05\,(gram) = 19.84\,N \quad (5)$$

$$\omega = 6433\cdot\frac{2\pi}{60} = 673{,}6\,rad/s \quad (6)$$

$$\tau = \frac{P}{\omega} = \frac{620\,Watt}{673{,}6\,rad/s} = 0{,}92\,Nm \quad (7)$$

Selanjutnya, hasil pengukuran RPM beserta hasil perhitungan *Thrust*, daya, dan *Torque* untuk ketiga variasi propeler, yaitu 17, 18, dan 19 inci, pada tingkat bukaan throttle 30%, 50%, dan 100%, disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Hasil Perhitungan Propeler 17, 18 dan 19

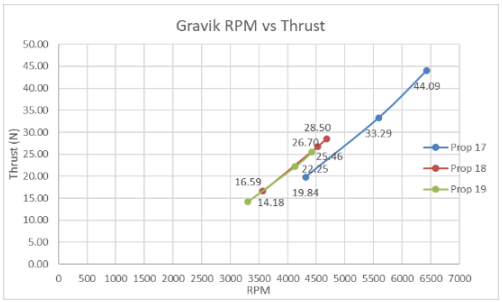
Prop	*Throttle*	RPM	*Thrust* (N)	*Torque* (Nm)
17 x 8	30%	4315	19.84	0.41
	50%	5590	33.29	0.7
	100%	6433	44.09	0.92
18 x 8	30%	3570	16.59	0.38
	50%	4530	26.70	0.61
	100%	4680	28.50	0.65
19 x 8	30%	3301	14.18	0.42
	50%	4135	22.25	0.66
	100%	4423	25.46	0.76

4.5 Kajian Data Dan Evaluasi

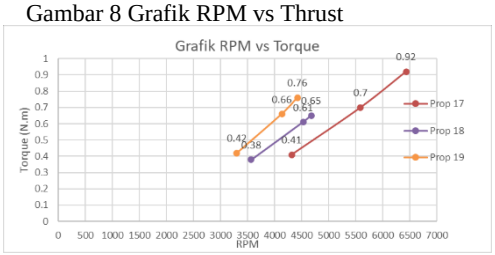
4.6.1 Kajian data

Data hasil perhitungan dianalisis untuk mengetahui pengaruh RPM terhadap *Thrust* dan *Torque* pada masing-masing propeler. Hasil perhitungan disajikan dalam bentuk grafik RPM terhadap *Thrust* dan RPM terhadap *Torque*.

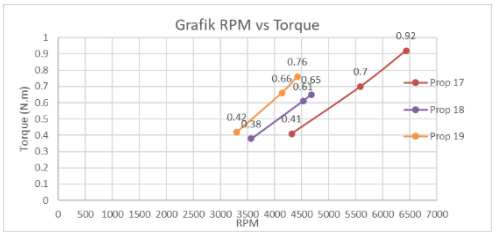
Berdasarkan Gambar 8 ,peningkatan RPM menyebabkan *Thrust* yang dihasilkan ketiga propeler ikut meningkat. Pada kondisi *full throttle*, propeler 17 menghasilkan *Thrust* maksimum.



Gambar 8 Grafik RPM vs Thrust



Berdasarkan Gambar 9, Propeler 17×8 menghasilkan putaran tertinggi sebesar 6433 RPM dengan *Torque* 0,92 Nm yang mendekati *Torque* maksimum mesin. Sebaliknya, propeler 18×8 dan 19×8 hanya mencapai 4680 RPM dan 4423 RPM dengan *Torque* masing-masing 0,65 Nm dan 0,76 Nm. Hal ini menunjukkan bahwa beban propeler yang lebih besar membatasi putaran mesin sehingga mesin mengalami mati mendadak pada *full throttle*.



Gambar 9 Grafik RPM vs Thrust

Secara perhitungan, propeler 17×8 memberikan performa terbaik karena menghasilkan *Thrust* dan *Torque* tertinggi. Dengan MTOW 15 kg, kebutuhan *Thrust* saat *cruise* diperkirakan sekitar 1,5 kg (10% MTOW) berdasarkan *rule of thumb* desain UAV *fixed-wing*, sehingga sistem propulsi masih memenuhi kebutuhan *cruise*. Namun, performa saat *take-off* belum dianalisis sehingga estimasi jarak lepas landas menjadi keterbatasan penelitian.Evaluasi

Kendala utama selama pengujian adalah *Electromagnetic Interference* (EMI) dari sistem pengapian yang menyebabkan *reset* berulang pada Arduino sehingga pengukuran langsung *Thrust* dan *Torque* tidak dapat dilakukan. Sebagai alternatif, kedua parameter dihitung berdasarkan pengukuran RPM menggunakan *tachometer*. Selain itu, mesin mengalami mati mendadak saat menggunakan propeler 18×8 dan 19×8 pada kondisi *full throttle*.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa alat ukur kinerja mesin berhasil dirancang menggunakan tiga *load cell*, modul HX711, dan Arduino, dengan hasil kalibrasi seluruh sensor menunjukkan nilai *error* di bawah 1%. Namun, pengukuran *Thrust* dan *Torque* secara langsung belum dapat dilakukan karena adanya gangguan *electromagnetic interference* (EMI) dari sistem pengapian mesin, sehingga pengujian dilakukan menggunakan metode alternatif berdasarkan pengukuran RPM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa propeler 17×8 menghasilkan performa terbaik, sehingga direkomendasikan untuk diaplikasikan pada UAV *fixed wing*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Watts AC, Ambrosia VG, Hinkley EA. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. Remote Sens (Basel). 2012 Jun;4(6):1671–92. doi:10.3390/rs4061671
2. Hassanalian M, Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences. Elsevier Ltd; 2017. p. 99–131. doi:10.1016/j.paerosci.2017.04.003
3. Garg PK. Characterisation of Fixed-Wing Versus Multirotors UAVs/Drones. Journal of Geomatics. 2022.
4. RANDAL W. BEARD TIMOTHY W. McLAIN. Small Unmanned Aircraft. Princeton; 2012.
5. Wibowo SS. Materi Kuliah Teknik Aeronautika Kinerja Terbang BAGIAN 1: KINERJA PROPULSI. 2025.
6. Federal Aviation Administration. Aviation Maintenance Technician Handbook Powerplant Chapter 7 Propellers. 2023.
7. Faishal A, Setyadewi IT, Aklis N, Harjanto F, Wibowo AM, Supriyanto A. Comparative Study of Propeller Thrust Force on Unmanned Aerial Vehicle Using Ground Testing Methods and Theoretical Calculations †. Engineering Proceedings. 2025;84(1). doi:10.3390/engproc2025084059
8. Ariyanto M, Setiawan JD, Prabowo T, Haryanto I, Munadi. Design of a Low-Cost Fixed Wing UAV. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences; 2018. doi:10.1051/matecconf/201815902045
9. Mas Intan HR, Muhammad Luqman Bukhori, Sabri Alimi. Rancang Bangun Alat Uji Thrust Motor

Brushless Dengan Variasi Propeller. Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine. 2023 Jul 30;9(1):65–75. doi:10.56521/teknika.v9i1.836
10. Wibowo SS, Luthfi M, Rosalia CA. Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Dorong Dan Momen Untuk Propeler Uav Kecil: Kajian Subsistem. JTT (Jurnal Teknologi Terapan). 2025 Mar 27;11(1):44. doi:10.31884/jtt.v11i1.712
11. Inra Rosita. Rancang Bangun Perangkat Pengukur Gaya Dorong, Kecepatan Putaran, Dan Torsi Propeller Pesawat Model. Bandung; 2021 Aug.
12. Wróblewski P, Bratkowski P, Borcuch D, Kiszkowiak Ł. Prototype station dedicated to aircraft engine propeller profiles and advanced materials testing. Combustion Engines. 2025;201(2):165–75. doi:10.19206/CE-204319
13. Gabriel Staples. Propeller Static & Dynamic Thrust Calculation - Part 1 of 2. 2014.
14. Gianino C. An MBL Experiment to Analyze the Torque on a Rigid Body. Phys Teach. 2009 Apr 1;47(4):224–5. doi:10.1119/1.3098207
15. Manigandan P, Kavitha R, Senthilkumar C. THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF PROPELLER THRUST WITH RESPECT TO FREE STREAM VELOCITY AND RPM FOR A MAV.