

RANCANG BANGUN ALAT UKUR GAYA DORONG DAN MOMEN UNTUK PROPELER UAV KECIL: KAJIAN SUBSISTEM

Singgih Satrio Wibowo^{1*}, Mochammad Luthfi¹, Citra Asti Rosalia¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia, 40559

*Correspondence: singgih.wibowo@polban.ac.id

Abstrak

Thrust and Moment Meter (TMM) adalah instrumen untuk mengukur gaya dorong (*thrust*) dan momen gaya (*moment*) atau torsi (*torque*) yang dihasilkan suatu sistem propulsi listrik ukuran kecil, yang biasanya digunakan pada pesawat *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* dan/atau pesawat *Radio Control (RC)* ukuran kecil. Alat ini dirancang dengan bahan-bahan yang berbiaya murah dan proses yang mudah, yaitu dengan bahan plastik *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)* menggunakan teknologi pencetakan printer 3D. Komponen utama dari perangkat ini adalah sebuah mikrokontroler *Arduino Nano*, dilengkapi dengan tiga buah sensor Sel Beban (*Load Cell*) dan sebuah layar LCD. Hasil dari penelitian ini adalah alat TMM telah berhasil dibuat dan diuji akurasinya untuk beberapa kasus, dan didapatkan hasil yang sangat baik dimana diperoleh ketelitian pengukuran gaya adalah lebih dari 99% (kesalahan < 1%).

Kata Kunci: Gaya Dorong; Momen; Propeller; Arduino; Load Cell

Abstract

Thrust and Moment Meter (TMM) is an instrument for measuring thrust and moment or torque produced by a small electric propulsion system, which is usually used on *Unmanned Aerial Vehicles (UAV)* and/or small size *Radio Control (RC)* aircraft. This tool is designed with low-cost materials and simple process, namely *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)* plastic using 3D printing technology. The main component of this device is an *Arduino Nano* microcontroller, equipped with three *Load Cell* sensors and one LCD screen. The results of this research are that the TMM tool has been successfully created and tested for accuracy in several cases, and very good results were obtained where the force measurement accuracy was more than 99% (error < 1%).

Keywords: Thrust; Moment; Propeller; Arduino; Load Cell

Received: 29 October 2024

Revised: 09 February 2025

Accepted: 09 February 2025

Published: 26 March 2025

DOI : 10.31884/jtt.v11i1.712



Copyright: © 2025 by JTT

1. PENDAHULUAN

Istilah pesawat terbang dalam bahasa Indonesia, atau *flying craft* dalam bahasa Inggris adalah istilah umum untuk semua peralatan yang dapat terbang, baik di lingkungan udara (*atmosphere*), air (*water*), maupun antariksa atau luar angkasa (*outer space*). Itu sebabnya, pesawat terbang yang terbang dalam lingkungan udara, disebut sebagai pesawat udara (*aircraft, airplane*), sementara pesawat yang terbang dalam lingkungan air (*water*) disebut pesawat dalam air (*underwater-craft*) atau sering disebut kapal selam (*submarine, submersible vessel*), sedangkan pesawat yang terbang di luar angkasa disebut pesawat antariksa atau pesawat luar angkasa (*space shuttle*).

Pesawat Udara Nir Awak (PUNA), atau dalam istilah Inggrisnya *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) merupakan pesawat udara dimana tidak ada awak manusia di dalam pesawat tersebut. Pada pengoperasiannya, PUNA dapat dikendalikan manual oleh pilot manusia dari jarak jauh, atau dikendalikan secara otomatis menggunakan sistem autopilot, atau gabungan antara manual dan otomatis. Istilah lain yang sering digunakan di Indonesia untuk PUNA adalah Pesawat Udara Tanpa Awak (PUTA), atau Pesawat Terbang Tanpa Awak (PTTA).

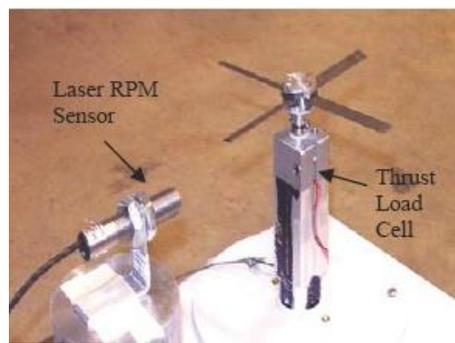
Penguasaan teknologi PUNA, telah menjadi topik yang menarik minat negaranegara di dunia karena peluang manfaat yang dapat diperoleh, sehingga banyak pusat-pusat penelitian robotik, dinamika, kendali dan aerodinamika di banyak negara melakukan riset ini sejak tiga dekade lalu sampai saat ini, baik berupa fixed-wing, rotary wing, atau kombinasinya (Wang, Lu, Liu, Chen, & Zhao, 2023; Achtelek & Bachrach, 2009; Pounds & Mahony, 2006; Ellington, 1999).

Salah satu aspek kunci untuk teknologi UAV adalah sistem propulsi. Sistem propulsi UAV yang saat ini sering digunakan adalah propulsi listrik, yaitu sistem propulsi dengan penggerak berupa motor listrik, yang kemudian digunakan untuk memutar propeler (balong-balong). Kesesuaian antara jenis propeler dan kemampuan motor merupakan hal penting yang menentukan kinerja sistem propulsi ini. Ketersediaan data performa motor dan juga data propeler yang digunakan mutlak diperlukan untuk dapat melakukan kajian kinerja sistem propulsi secara menyeluruh yang pada gilirannya menentukan kinerja penerbangan UAV tersebut.

Beberapa permasalahan mungkin terjadi pada tahap penentuan kombinasi sistem propulsi, terutama pemilihan propeler yang tepat, sebab kedua data tersebut tidak selalu tersedia. Biasanya, pabrikan motor akan memberikan rekomendasi kombinasi balong-balong untuk motor tertentu. Namun, tidak tersedianya data karakteristik propeler akan menimbulkan masalah. Atau sebaliknya, data propeler tersedia namun data kinerja motor tidak tersedia, maka hal ini juga menimbulkan masalah. Terlebih lagi, jika kedua data utama ini tidak tersedia, tentu upaya menentukan kinerja sistem propulsi menjadi sangat bermasalah, jika bukan mustahil.

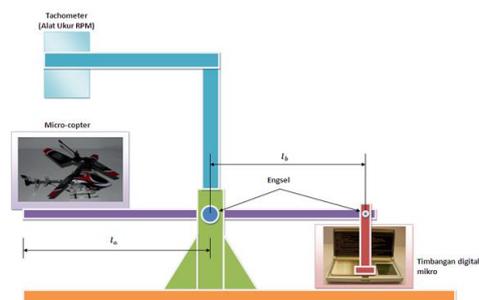
Karakteristik gaya dorong yang dihasilkan oleh suatu propeler dapat diketahui dengan perhitungan aerodinamika menggunakan perangkat lunak khusus yaitu *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hal ini dapat dilakukan dengan hasil akurat jika geometri airfoil dan dimensi parametrik baling-baling lainnya tersedia. Namun, untuk memperoleh data tersebut dari pabrikan propeler seringkali sulit. Cara lain yang lebih praktis adalah dengan melakukan pengukuran langsung kinerja sistem propulsi pada alat ukur gaya dorong.

Perangkat alat ukur gaya dorong ini bukanlah hal baru. Telah banyak riset dilakukan untuk rancang-bangun alat ini, dan juga telah banyak tersedia di pasaran. Contoh alat ukur gaya dorong sistem propulsi pesawat mikro adalah seperti pada Gambar 1 yang dibuat oleh profesor Koratkar di Rensselaer Polytechnic Institute, Amerika Serikat (Koratkar, 2004).

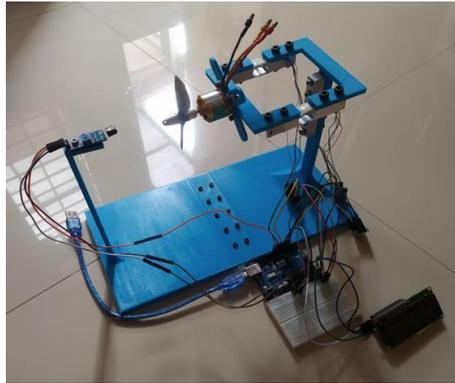


Gambar 1. Alat ukur gaya angkat PUNA Mikro (Koratkar, 2004).

Contoh lainnya adalah sebagaimana disajikan dalam Gambar 2, dibuat penulis di Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) pada tahun 2010 (Wibowo, Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Angkat Pesawat Micro-Copter, 2010). Alat ini digunakan sebagai alat ukur gaya dorong yang dihasilkan sebuah helikopter mikro. Peralatan lain yang lebih canggih, dikembangkan oleh salah satu mahasiswa penulis, di POLBAN, adalah alat ukur gaya dorong dan torsi, yang dilengkapi sensor kecepatan putar, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.

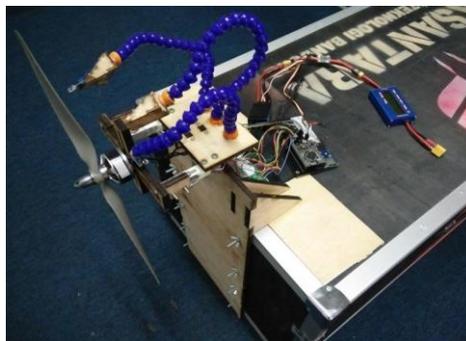


Gambar 2. Alat Ukur Gaya Angkat Micro-Copter (Wibowo, Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Angkat Pesawat Micro-Copter, 2010).

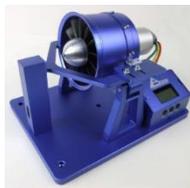


Gambar 3. Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen, Hasil Tugas Akhir Mahasiswa POLBAN (Rosita, 2021).

Perangkat alat ukur lainnya adalah *Thrust Benchmarking System* (TBS) (Virginio & Fuad, 2018; Ramadhani & Fernandez, 2020), Gambar 4, adalah alat atau instrumen untuk pengukuran kinerja sistem propulsi UAV listrik yang dibuat di Institut Teknologi Bandung (ITB). Contoh lain alat ukur yang sama yang tersedia di pasaran adalah sebagaimana disajikan pada Gambar 5.



Gambar 4. Thrust Benchmarking System (TBS) (Virginio & Fuad, 2018).



(a) perangkat untuk EDF (Electric Ducted Fan) produk RC Lander]



(b) Tengah dan Kanan: perangkat untuk propeler produk Tyto robotics

Gambar 5. Alat Ukur Gaya Dorong Sistem Propulsi PTTA (Wibowo, Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen Puntir Sistem Propulsi, 2023).

Perangkat *Thrust and Moment Meter* (TMM) adalah alat atau instrumen untuk pengukuran kinerja sistem propulsi listrik UAV yang berbiaya murah dan mudah dibuat. Kinerja sistem propulsi yang dimaksud adalah mengukur gaya dorong statis suatu

baling-baling dan momen (torsi) yang ditimbulkan oleh propeler ini. TMM dirancang sebagai alat ukur kinerja sistem propulsi listrik ukuran kecil, dengan diameter propeler yang dapat diukur adalah maksimum 40 cm. Alat ini dikembangkan sebagai bagian dari peta-jalan penelitian UAV yang dilakukan oleh penulis di Program Studi Teknik Aeronautika (PSTA), Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) pada tahun 2023.

Makalah ini membahas tentang perancangan dan pembuatan TMM untuk sistem propulsi UAV listrik (Gambar 6). TMM dilengkapi dengan berbagai sensor untuk melakukan akuisisi data yang diperlukan untuk menentukan kinerja sistem propulsi listrik UAV. Sensor dan metode pengukuran gaya dorong dan torsi telah diimplementasikan dalam alat ini.



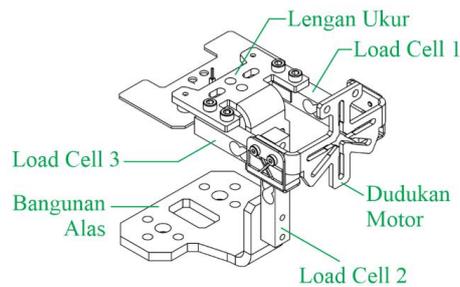
Gambar 6. Perangkat alat ukur TMM yang telah dibuat, tampak kanan belakang.

Instrumen ini memiliki kemampuan dan potensi pengembangan yang luas sebagai instrumen pengujian sistem propulsi, baik statis maupun dinamis. Kemampuan lain yang dapat ditambahkan di masa mendatang adalah pengukuran tegangan baterai, keluaran arus baterai, suhu motor, pengontrol kecepatan motor, pengukur kecepatan putaran baling-baling (RPM), dan pengukur getaran.

2. METODE

Struktur Bangunan

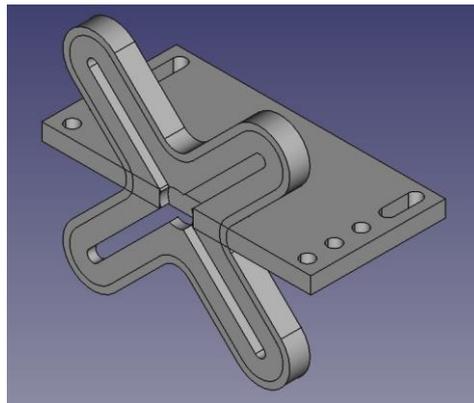
TMM, sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 7, terdiri dari 6 bagian utama yaitu sel beban 1 (*load cell 1*, LC1), sel beban 2 (*load cell 2*, LC2), sel beban 3 (*load cell 3*, LC3),udukan motor, lengan ukur (sebagaiudukan LC1, LC2 dan LC3), dan bangunan alas. Bahan (material) yang direncanakan untukudukan motor, lengan ukur dan bangunan alas ada 2, yaitu (1) aluminium, atau (2) plastik ABS.



Gambar 7. Sketsa bentuk TMM, dengan berbagai bagiannya. Sketsa dibuat dengan merujuk pada (Tyto Robotics, 2021; Tyto Robotics, 2023).

Bahan aluminium dan/atau plastik ABS dipilih karena tersedia banyak di pasaran sedemikian harganya murah dan mudah didapatkan, dan alasan kekuatan struktur yang memadai untuk digunakan dalam perangkat ini. Selain itu, kemampuan alat dan metode manufaktur yang tersedia juga menjadi pertimbangan dalam pemilihan material ini.

Dudukan motor seperti terlihat pada Gambar 8 berfungsi sebagai platform untuk memasang sistem propulsi yang akan diuji. Bagian dasar dudukan motor didesain menyerupai huruf X, dengan rongga sebagai tempat pemasangan baut untuk mengunci sistem propulsi pada dudukan ini. Bagian dasar dudukan motor berperan dalam mendistribusikan tekanan dari gaya dorong yang dihasilkan motor ke load cell vertikal (LC2) dan juga torsi ke dua buah load cell yang posisinya horizontal (yaitu LC1 dan LC3). Masing-masing ujung LC1 dan LC3 terpasang pada bagian ini.

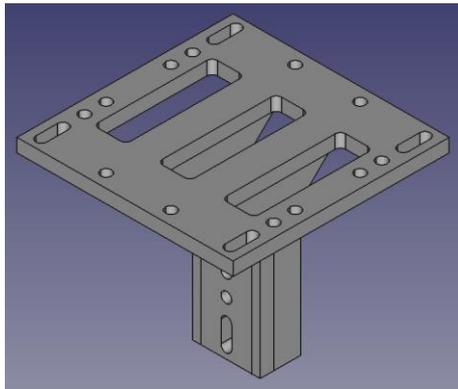


Gambar 8. Dudukan motor TMM.

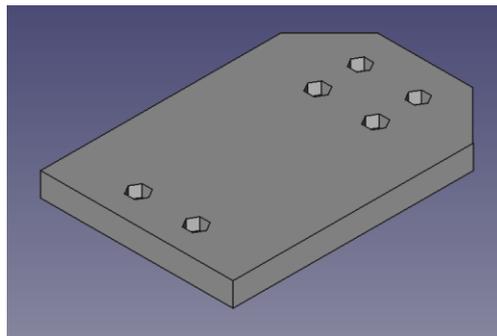
Ujung lainnya untuk LC1 dan LC3 terpasang pada lengan ukur bagian pelat datar (Gambar 9). Bagian vertikal dari lengan ukur ini digunakan sebagai tempat terpasangnya load-cell vertikal (LC2) yang digunakan sebagai sensor gaya dorong. Lengan ukur dibuat 2 buah dengan bentuk dan ukuran yang sama, dimana satu buah terpsang di sisi atas, dan satu lagi terpasang di sisi bawah. Bagian di sisi bawah dipasang dengan pelat bangunan alas.

Bagian bawah dari TMM adalah bangunan alas, terdiri atas 2 pelat bawah (Gambar 10) yang dipasang pada lengan ukur sisi bawah. Bangunan alas ini merupakan penopang bagi struktur TMM keseluruhan, dan juga tempat dipasangnya perangkat PCB

utama, dimana terpasang Arduino Nano dan peralatan lainnya. Bangunan lengkap TMM yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 9. Struktur lengan ukur TMM, untuk bagian atas dan bawah.



Gambar 10. Struktur pelat bawah TMM, untuk bangunan alas.

Kelistrikan

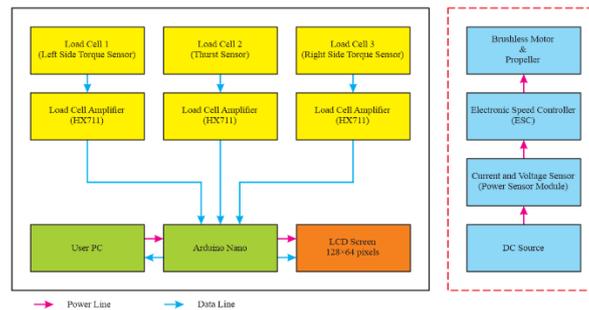
Diagram Blok

Komponen kelistrikan TMM berikut interaksi antar komponen ini disajikan dalam Gambar 11. Pasal berikut akan menjelaskan tentang alur kerja, jalur komunikasi, dan fungsi masing-masing sensor.

Pertama, sel beban (*load cell*) pengukur regangan (*strain gauge*) digunakan sebagai sensor gaya dorong dan torsi untuk baling-baling yang berputar. Sel beban ini bekerja berdasar *strain gauge* yang terpasang pada satu sisi badannya. *Strain gauge* pada dasarnya adalah hambatan listrik yang dibuat sebagai pola kabel paralel atau lembaran logam tipis yang tertanam pada dasar insulasi dari bahan plastik. Lembaran tipis *strain gauge* ini terpasang kuat pada satu sisi permukaan sel beban, dan akan berubah memanjang atau memendek sesuai perubahan (regangan) permukaan sisi sel beban akibat adanya gaya yang bekerja, sehingga hambatan (resistansi) listriknya berubah. Perubahan resistansi listrik inilah, yang sebanding dengan gaya yang diterapkan pada badan *load cell*, yang diukur dengan sangat tepat (Norden, 1998).

Regangan yang terjadi umumnya sangat kecil sehingga perubahan hambatan listrik *strain gauge* juga sangat kecil. Perubahan hambatan ini terlalu kecil untuk diukur secara

langsung dengan ohmmeter biasa. Untuk mengatasinya, rangkaian penguat sinyal HX711 digunakan untuk memperkuat perubahan resistensi yang sangat kecil ini.



Gambar 11. Diagram blok sistem listrik TMM.

Prinsip kerja HX711 mirip dengan jembatan Wheatstone dimana hambatan berasal dari kompresi dan tegangan pada kabel di dalam load cell. Gaya dorong diperoleh dari hubungan yang diketahui antara tegangan keluaran tertentu dan gaya yang diterapkan (Yoon, 2015). HX711 berkomunikasi ke Arduino Nano tentang pembacaan gaya yang bekerja pada sel beban melalui saluran data dan pewaktu (*timer*) (AVIA Semiconductor, 2009).

Papan PCB Utama

Fungsi papan PCB (*Printed Circuit Board*) utama adalah untuk tempat terpasangnya seluruh pin fungsi I/O dari Arduino Nano, serta modularisasi komponen dan mencegah kerusakan fisik langsung pada mikrokontroler. Papan PCB utama ini juga menjadi tempat terpasangnya layar LCD dan modul penguat sinyal HX711.

Firmware

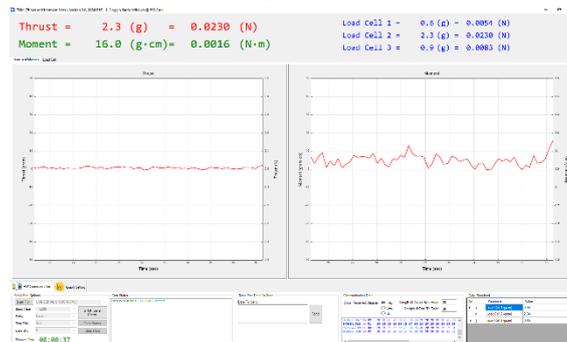
Mikrokontroler Arduino Nano dipilih sebagai otak pemroses alat ini karena kemampuan proses data yang cepat, faktor bentuk yang kecil, dan jumlah pin (input dan output) yang memadai. Arduino nano yang ada di pasaran terdiri atas 2 jenis: berbasis pada mikrokontroler Atmega168 dan/atau ATmega328.

Arduino Nano berbasis mikrokontroler 168 memiliki memori flash 16 kilobyte, SRAM 1 kilobyte, dan EEPROM 0.512 kilobyte. Arduino nano berbasis mikrokontroler 328 memiliki memori flash 32 kilobyte, SRAM 2 kilobyte, dan EEPROM 1 kilobyte. Kedua jenis Arduino nano ini memiliki ukuran 18 × 45 mm, dan bobot 7 gram (Arduino Team, 2024).

Agar dapat melakukan tugasnya sebagai otak pemroses data sensor, Arduino Nano yang dipilih harus diisi (ditanami) suatu program khusus yang dibuat menggunakan bahasa C, dengan memanfaatkan aplikasi Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Program khusus ini, yang bekerja serupa dengan sistem operasi pada komputer, disebut dengan **firmware**. Pada firmware ini diterapkan komunikasi serial RS-232 antara Arduino dengan Komputer dengan kekerapan 5 Hz, yang mana nilai 5 Hz ini dipilih karena memberikan waktu pembacaan sensor load cell yang cukup baik.

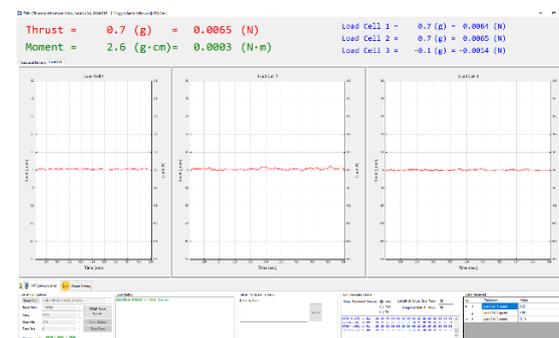
Jika digunakan kekerapan 10 Hz atau lebih diperoleh hasil bacaan load cell yang sangat fluktuatif.

Perangkat TMM dilengkapi dengan fitur software aplikasi TNM (*Thrust aNd Moment*), sebagai antarmuka pengguna, yang terhubung melalui kabel USB (lihat skema pada Gambar 11) ke komputer pengguna, dengan komunikasi serial RS-232. Pada software aplikasi ini, pengguna dapat langsung mengetahui, secara *real-time*, nilai-nilai yang terukur dari alat TMM ini, dalam bentuk angka dan grafik. Software antarmuka TNM dibangun dengan bahasa C# menggunakan perangkat lunak Microsoft Visual Studio Community Edition 2015.



Gambar 12. Jendela TNM Software, Tab 1.

Hasil pengukuran TMM dapat dilihat langsung pada layar LCD yang disediakan, yang menampilkan pengukuran gaya pada setiap load-cell yang digunakan. Hasil pengukuran ini juga langsung dikirim ke komputer pengguna, yang pada saat bersamaan dibaca dan disajikan oleh software TNM, dalam bentuk angka dan grafik. Software TNM akan mengolah data bacaan setiap load cell menjadi gaya dorong dan torsi yang dihasilkan sistem propulsi yang diukur.



Gambar 13. Jendela TNM Software, Tab 2.

Nilai-nilai bacaan load cell, besar gaya dorong, dan momen (torsi) yang disajikan oleh software TNM akan tersimpan di dalam memori TNM, yang dapat disimpan dalam bentuk file teks berjenis *Comma Separated Values* (CSV). File teks dengan format ini dipilih sebagai file penyimpanan dengan maksud agar dapat diolah dengan mudah menggunakan software MS-Excel atau yang sejenisnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

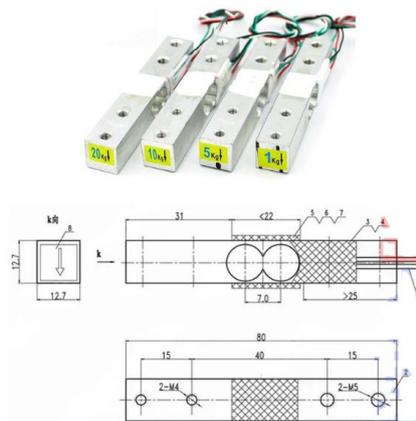
Karakteristik Load Cell

Sel beban (*load cell*) yang digunakan memiliki karakteristik seperti pada Tabel 1, dan bentuknya seperti disajikan dalam Gambar 14 dan Gambar 15.

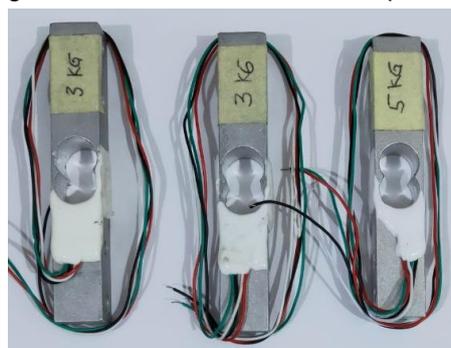
Tabel 1. Karakteristik Load Cell (Wibowo, Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen Puntir Sistem Propulsi, 2023).

No.	Karakteristik	Simbol	Nilai	Satuan
1.	Output sensitivity		1.0 ± 0.1	mV/V
2.	Zero output		± 0.1	mV/V
3.	Repeatability		0.05%	F.S
4.	Creep		0.05%	F.S/3min
5.	Nonlinear		0.05%	F.S
6.	Lag		0.05%	F.S
7.	Output impedance		$1000 \pm 5\%$	ohms
8.	Zero temperature drift		0.05%	F.S/10°C
9.	Temperature sensitivity drift		0.05%	F.S/10°C

Note: F.S = Full Scale



Gambar 14. Ukuran load cell yang digunakan (Wibowo, Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen Puntir Sistem Propulsi, 2023).



Gambar 15. Foto jenis load cell yang digunakan (Wibowo, Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen Puntir Sistem Propulsi, 2023).

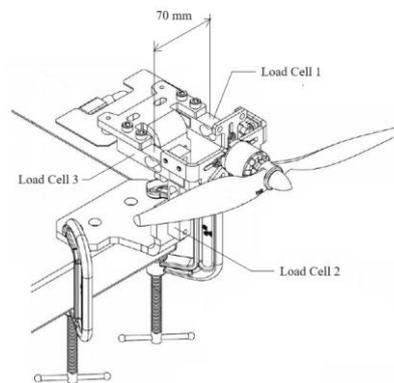
Pada alat TMM yang telah dibuat, dipilih LC1, LC2 dan LC3 dengan kapasitas pengukuran yang sama, yaitu maksimum 3 kg. Ukuran fisik sel beban ini berupa balok, dengan panjang 80 mm, dan penampang persegi berukuran 12.7 × 12.7 mm.

Desain Alat Ukur

Perancangan Bentuk Alat Ukur

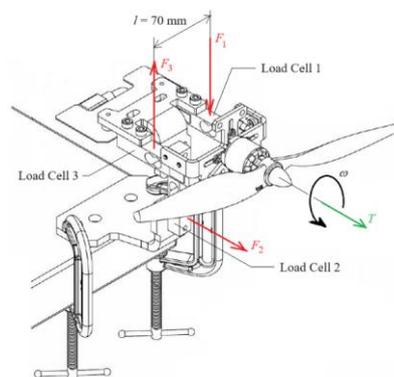
Pada awal penelitian, alat uji yang akan dibuat dirancang menurut sketsa yang disajikan pada Gambar 16. Dengan memperhatikan Gambar 16 dan Gambar 17, maka hubungan antara gaya dorong (*thrust*) T yang diberikan propeler kepada alat ukur adalah sesuai gaya yang dibaca oleh load-cell 2 (F_2). Oleh karena itu, diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$T = F_2 \quad (1)$$



Gambar 16. Sketsa Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen, Sketsa Dibuat dengan Merujuk Pada (Tyto Robotics, 2021; Tyto Robotics, 2023).

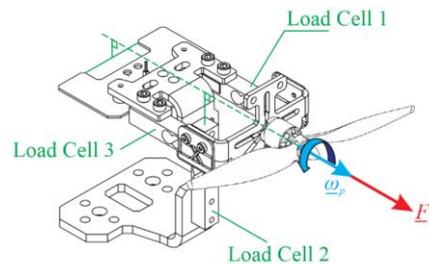
Gaya-gaya yang bekerja pada alat ini, yang selanjutnya diterima oleh setiap *load-cell* disajikan dalam Gambar 17, Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 17. Diagram Gaya dan Momen yang Bekerja. Sketsa dibuat dengan Merujuk Pada (Tyto Robotics, 2021; Tyto Robotics, 2023).

Gambar 18 dan Gambar 19 merupakan penyajian ulang yang lebih rinci dari Gambar 17. Sebagaimana terlihat pada Gambar 18, propeler berputar dengan vektor

kecepatan putar ω_p dan gaya dorong yang dihasilkan adalah F_p . Vektor gaya dorong ini selanjutnya diteruskan ke LC2, sehingga gaya yang diterima LC2 adalah $F_2 = F_p$.



Gambar 18. Diagram Gaya Dorong yang Bekerja. Sketsa dibuat dengan Merujuk Pada (Tyto Robotics, 2021; Tyto Robotics, 2023).

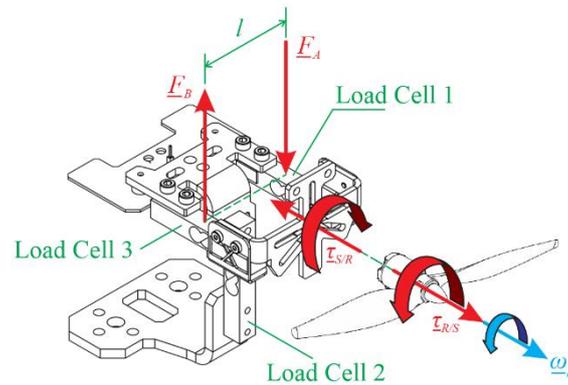
Gambar 19 menampilkan rincian torsi gaya dorong yang bekerja pada propeler. Ketika propeler berputar dengan kecepatan ω_p konstan, maka udara akan memberikan hambatan kepada propeler sedemikian propeler mendapatkan momen yang besarnya tertentu untuk menahan putaran pada kecepatan konstan ini, dengan arah berlawanan putaran propeler. Besarnya momen aerodinamika ini adalah sama dengan momen torsi yang diberikan sistem propulsi kepada rotor dan propeler yang berputar yang arahnya searah putaran propeler. Torsi ini dinyatakan dengan $\underline{\tau}_{R/S}$ yang bermakna vektor torsi yang bekerja pada rotor (berikut baling-baling) yang diberikan oleh bagian stator (bagian diam sistem propulsi, yang melekat pada dudukan motor).

Pada saat yang sama, dengan menerapkan prinsip aksi-reaksi (hukum Newton ketiga), pada bagian stator bekerja torsi yang berlawanan yaitu $\underline{\tau}_{S/R}$ yang bermakna vektor torsi yang bekerja pada stator (bagian diam sistem propulsi, yang melekat pada dudukan motor) yang diberikan oleh bagian rotor (berikut baling-baling). Torsi $\underline{\tau}_{S/R}$ selanjutnya diteruskan ke LC1 dan LC3 yang akan dirasakan sebagai beban (gaya) $F_A = F_1$ dan $F_B = F_3$.

Torsi $\underline{\tau}_{S/R}$ inilah momen terukur oleh perangkat TMM. Ini adalah momen puntir yang diberikan sistem propulsi kepada bangunan alat ukur, yang akan diindera oleh LC1 (F_1) dan LC3 (F_3), sehingga besarnya momen ini adalah sebagai berikut.

$$M = |\underline{\tau}_{S/R}| = \frac{(F_1 + F_3)l}{2} \quad (2)$$

Dimana M adalah momen puntir yang diberikan oleh sistem propulsi kepada struktur alat ukur (berlawanan arah dengan putaran propeler), sedangkan l adalah jarak antara LC1 dan LC3.



Gambar 19. Diagram Gaya dan Momen yang Bekerja. Sketsa dibuat dengan Merujuk Pada (Tyto Robotics, 2021; Tyto Robotics, 2023).

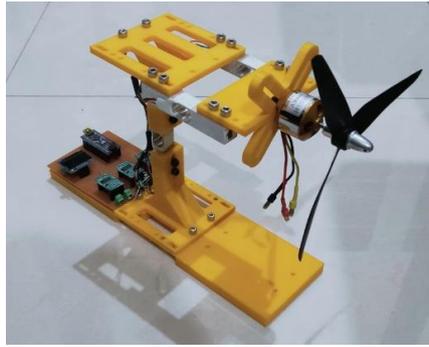
Sketsa alat ukur ini kemudian dikembangkan menjadi gambar teknik yang kemudian dijadikan rujukan saat proses pembuatan. Pada pengembangan desain gambar teknik, lengan pengukuran (jarak antara dua *load-cell* pada bagian depan) dipilih sebagai berikut.

$$l = 70 \text{ mm} = 0.7 \text{ cm}$$

Peralatan yang didesain ini kemudian dibuat dengan bahan plastik ABS menggunakan metode pencetakan (*printing*) 3D. Produk yang dihasilkan disajikan dalam Gambar 20 dan Gambar 21.



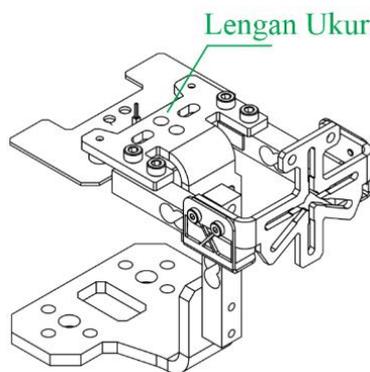
Gambar 20. Perangkat alat ukur yang telah dibuat, tampak kanan depan.



Gambar 21. Perangkat alat ukur yang telah dibuat, tampak kiri depan.

Perhitungan Kekuatan Struktur

Pada tahap perancangan, kajian kekuatan struktur juga dilakukan, yaitu berkaitan dengan kekuatan lengan pengukuran. Ini dilakukan agar dapat dipastikan bahwa lengan ukur yang digunakan dapat menahan beban akibat momen gaya dari propeler yang berputar. Pada awal perancangan, bahan yang dipilih ada 2 jenis: (1) aluminium, dan (2) plastik ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). Oleh karena itu, perhitungan kekuatan struktur dilakukan pada kedua jenis bahan ini.



Gambar 22. Bagian Lengan Ukur. Sketsa dibuat dengan Merujuk Pada (Tyto Robotics, 2021; Tyto Robotics, 2023).

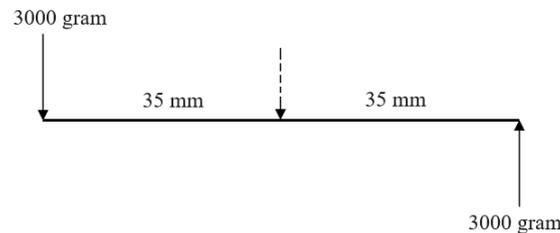
Kekuatan Struktur Lengan dengan Bahan Aluminium

Untuk keperluan perhitungan awal keamanan/kekuatan struktur, digunakan anggapan bahwa material yang digunakan adalah aluminium 6061-T6. Pilihan ini dilakukan karena data jenis bahan awal yang direncanakan adalah aluminium, sementara jenis aluminium 6061-T6 banyak dipasarkan (digunakan untuk struktur pesawat, komponen, dan lain sebagainya), sehingga anggapan ini digunakan. Aluminium memiliki sifat-sifat sebagaimana disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Sifat-Sifat Aluminium 6061-T6 (ASM International Handbook Committee, 1990).

No.	Sifat	Simbol	Nilai	Satuan
1.	Modulus elastisitas (modulus Young)	E	69	GPa
2.	Yield Strength	σ_y	255.1	MPa
3.	Shear Strength	τ_y	131	MPa

Dengan menggunakan *safety factor (factor of safety)*, $FS = 1.2$, maka diperoleh nilai tekanan yang diperbolehkan, yaitu: $\sigma_{all} = \sigma_y/1.2 = 255.1/1.2 = 212.6$ MPa, dan $\tau_{all} = 131/1.2 = \tau_y/1.2 = 109.2$ MPa. Selanjutnya untuk mengetahui karakteristik pipa yang dapat digunakan, maka perlu dibuat diagram gaya sebagai berikut,



Gambar 23. Diagram Gaya Pada Lengan Ukur.

Pada Gambar 23 di atas, gaya sebesar 3000 gram pada setiap lengan merupakan batas maksimum yang dipersyaratkan untuk peralatan ini. Dengan dasar ini, maka momen maksimum yang terjadi pada satu ujung adalah,

$$\begin{aligned} M_{\max} &= 1 \times 3000 \times 70 \\ &= 210\,000 \text{ gram} \cdot \text{mm} \\ &= 2.1407 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Pelat yang digunakan dianggap berongga (serupa dengan pipa), dengan ketebalan 2 mm. Dengan anggapan bahwa pelat ini serupa pipa, dengan jejari pipa yang digunakan adalah: jari-jari luar $r_o = 5$ mm, jari-jari dalam $r_i = 4$ mm, maka untuk memeriksa apakah ukuran pipa tersebut memenuhi syarat kekuatan, maka dilakukan perhitungan berikut (Lissenden & Salamon, 1999),

$$\begin{aligned} \sigma_{all} &= \frac{M_{\max} r_o}{\pi(r_o^4 - r_i^4)/4} \\ r_i &= \left[r_o^4 - \frac{4M_{\max} r_o}{\pi \sigma_{all}} \right]^{1/4} \\ &= \left[0.005^4 - \frac{4 \cdot 2.1407 \cdot 0.005}{\pi \cdot 212.6 \times 10^6} \right]^{1/4} \\ &= 0.00487 \end{aligned}$$

Dari rumus di atas, selanjutnya diperoleh nilai $r_i = 0.00487$ m, atau $r_i = 4.87$ mm. dengan demikian, berdasarkan perhitungan, ketebalan minimum pipa yang digunakan adalah

$$t_{\min} = r_o - r_i = 5 - 4.87 = 0.13 \text{ mm}$$

Ini berarti dengan ketebalan plat adalah lebih besar ($t = 2$ mm) dari persyaratan minimum di atas, maka kekuatan struktur menjadi lebih baik. Kesimpulannya adalah struktur berbahan aluminium 6061-T6 yang dipilih telah memenuhi syarat kekuatan.

Kekuatan Struktur Lengan dengan Bahan Plastik ABS

Plastik ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) memiliki sifat-sifat sebagaimana disajikan dalam Tabel 3 berikut.

Dengan menggunakan *safety factor* (*factor of safety*), $FS = 1.2$, maka diperoleh nilai tekanan yang diperbolehkan, yaitu: $\sigma_{all} = \sigma_y/1.2 = 38/1.2 = 31.6$ MPa, dan $\tau_{all} = \tau_y/1.2 = 25/1.2 = 20.8$ MPa.

Tabel 3. Sifat-Sifat Plastik ABS (Peters, 2002; Cantrell & Rohde, 2017).

No.	Sifat	Simbol	Nilai	Satuan
1.	Modulus elastisitas (modulus Young)	E	2.6	GPa
2.	Yield Strength (Tensile Strength)	σ_y	38	MPa
3.	Shear Strength	τ_y	25	MPa

Pelat yang digunakan dianggap berongga (serupa dengan pipa), dengan ketebalan 2 mm. Dengan anggapan bahwa pelat ini serupa pipa, dengan jari pipa yang digunakan adalah: jari-jari luar $r_o = 5$ mm, jari-jari dalam $r_i = 4$ mm, maka untuk memeriksa apakah ukuran pipa tersebut memenuhi syarat kekuatan, maka dilakukan perhitungan berikut (Lissenden & Salamon, 1999)

$$\begin{aligned}\sigma_{all} &= \frac{M_{max}r_o}{\pi(r_o^4 - r_i^4)/4} \\ r_i &= \left[r_o^4 - \frac{4M_{max}r_o}{\pi\sigma_{all}} \right]^{1/4} \\ &= \left[0.005^4 - \frac{4 \cdot 2.1407 \cdot 0.005}{\pi \cdot 31.6 \times 10^6} \right]^{1/4} \\ &= 0.00373\end{aligned}$$

Dari rumus di atas, selanjutnya diperoleh nilai $r_i = 0.00373$ m, atau $r_i = 3.73$ mm. dengan demikian, berdasarkan perhitungan, ketebalan minimum pipa yang digunakan adalah

$$t_{min} = r_o - r_i = 5 - 3.73 = 1.27 \text{ mm}$$

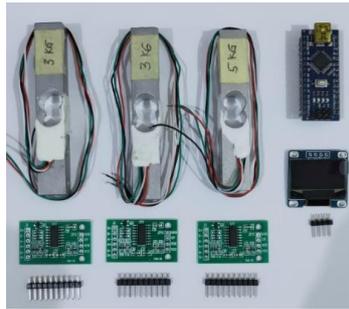
Ini berarti dengan ketebalan plat adalah lebih besar ($t = 2$ mm) dari persyaratan minimum di atas, maka kekuatan struktur menjadi lebih baik. Kesimpulannya adalah struktur berbahan plastik ABS yang dipilih telah memenuhi syarat kekuatan.

Perancangan Sistem Elektronik

Alat ukur ini dibuat menggunakan berbagai perangkat elektronika, antara lain:

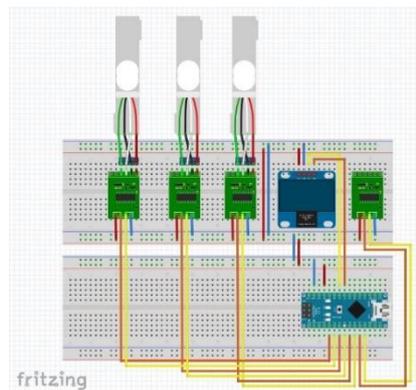
1. Arduino Nano, yang berbasis pada mikrokontroler ATmega 168 (versi 16 bit) atau ATmega328 (versi 32 bit).
2. Sensor Load Cell, dengan kemampuan ukur maksimum 3 kg.
3. Modul penguat sinyal HX711.
4. Layar Penampil 128×64 piksel

Berbagai perangkat yang digunakan disajikan dalam Gambar 24.



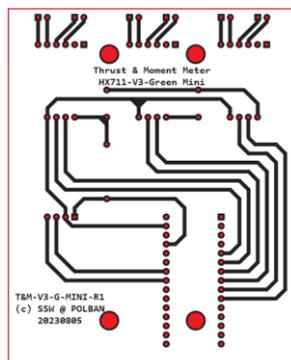
Gambar 24. Foto Komponen Elektronika yang Digunakan.

Desain alur pengkabelan dibuat menggunakan software Fritzing dan hasilnya disajikan dalam Gambar 25.

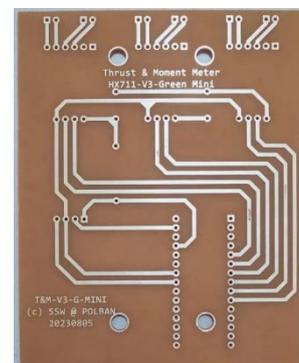


Gambar 25. Desain Alur Pengkabelan Komponen Elektronika.

Setelah desain dilakukan, proses pembuatan PCB (*Printed Circuit Board*) dilakukan dan hasilnya disajikan dalam Gambar 26.



PCB hasil desain



PCB sesungguhnya hasil produksi

Gambar 26. PCB Hasil Perancangan dan Pembuatan.

Hasil Pengujian Alat

Hasil Pengukuran Beban Load Cell

Pengukuran beban pada load cell telah dilakukan dengan waktu yang cukup, dan dengan data yang sangat banyak, dengan tujuan agar mendapatkan data yang akurat.

Proses pengukuran dilakukan dengan beberapa anak timbangan standar, yaitu 10 gram, 20 gram, 50 gram dan 100 gram. Pengukuran dilakukan pada ketiga load cell, dan hasil-hasilnya disajikan dalam tabel-tabel berikut.

Pengukuran Load-Cell 1

Hasil-hasil pengukuran load-cell 1 disajikan dalam Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Load-Cell 1.

Input (g)	Bacaan Load Cell	Keterangan
100	-35136.94	Kuning: Beban arah sesuai terhadap arah panah pada LC, Pengukuran: Senin, 11 September 2023, Jam 16:01, sampai selesai
50	-58001.47	
20	-71646.19	
0	-80384.42	
0	-86455.02	Nilai rata-rata antara kuning dan hijau
0	-92525.62	Hijau: Beban arah terbalik terhadap arah panah pada LC, Pengukuran: Senin, 11 September 2023, Jam 16:01, sampai selesai
-20	-101747.12	
-50	-115692.53	
-100	-138030.37	

Data di atas selanjutnya disajikan dalam grafik sebagai mana ditunjukkan dalam Gambar 27 di bawah.



Gambar 27. Kurva Hasil Pengujian Load-Cell 1

Pengukuran Load-Cell 2

Hasil-hasil pengukuran load-cell 2 disajikan dalam Tabel 5. Data pada Tabel 5 selanjutnya disajikan dalam grafik sebagai mana ditunjukkan dalam Gambar 28 di bawah.



Gambar 28. Kurva Hasil Pengujian Load-Cell 2

Tabel 5. Hasil Pengukuran Load-Cell 2.

Input (g)	Bacaan Load Cell	Keterangan
100	5456.59	Kuning: Beban arah sesuai terhadap arah panah pada LC, Pengukuran: Senin, 11 September 2023, Jam 16:01, sampai selesai
50	-15783.13	
20	-28195.61	
0	-36712.00	
0	-42298.99	Nilai rata-rata antara kuning dan hijau
0	-47885.99	Hijau: Beban arah terbalik terhadap arah panah pada LC, Pengukuran: Senin, 11 September 2023, Jam 16:01, sampai selesai
-20	-56345.94	
-50	-69080.50	
-100	-90064.00	

Pengukuran Load-Cell 3

Hasil-hasil pengukuran load-cell 3 disajikan dalam Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Hasil Pengukuran Load-Cell 3.

Input (g)	Bacaan Load Cell	Keterangan
-100	52663.81	Kuning: Beban arah sesuai terhadap arah panah pada LC, Pengukuran: Senin, 11 September 2023, Jam 16:01, sampai selesai
-50	75004.95	
-20	88393.90	
0	97356.72	
0	103375.61	Nilai rata-rata antara kuning dan hijau
0	109394.51	Hijau: Beban arah terbalik terhadap arah panah pada LC, Pengukuran: Senin, 11 September 2023, Jam 16:01, sampai selesai
20	118346.09	
50	131742.85	
100	154092.20	

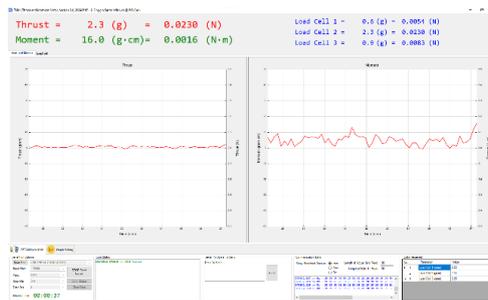
Data di atas selanjutnya disajikan dalam grafik sebagai mana ditunjukkan dalam Gambar 29 di bawah.

**Gambar 29.** Kurva Hasil Pengujian Load-Cell 3.

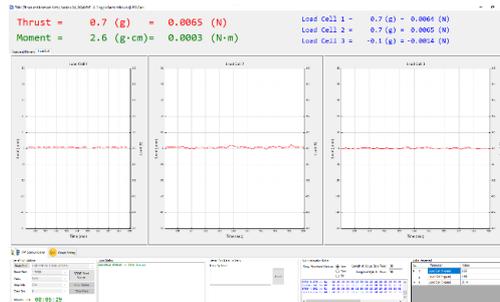
Hasil Pengujian Software

Selain software *firmware* yang ditanamkan pada Arduino Nano, software antar muka juga telah dibuat sebagai alat bantu bagi pengguna alat saat melakukan pengukuran. Software ini dibuat menggunakan Visual Studio Community Edition 2015, dengan

bahasa pemrograman C#. Tampilan software ini disajikan dalam Gambar 30 dan Gambar 31.



Gambar 30. Tampilan Software TNM, Tab 1.



Gambar 31. Tampilan Software TNM, Tab 2.

Hasil Pengujian Gaya Dorong TMM

Pengujian akurasi pembacaan gaya dorong TMM dilakukan dengan mengukur bobot anak timbangan standar, yaitu 10 gram, 20 gram, 50 gram dan 100 gram. Hal ini dilakukan dengan cara memposisikan TMM secara tegak dan meletakkan anak timbangan ini pada dudukan motor (Gambar 32). Pengukuran dilakukan dengan 2 cara, yaitu (a) beban statis dan (b) beban dinamis.



Gambar 32. Metode pengujian bacaan gaya dorong dengan anak timbangan.

Pengukuran Gaya Dorong dengan Beban Statis

Pengukuran dengan beban statis adalah pengukuran dimana setiap 1 beban diukur dalam rentang waktu tertentu yang pendek selama sekira 10 detik, tanpa perubahan, dan kemudian nilai rata-rata selama rentang waktu ini diambil sebagai satu nilai pengukuran. Pada setiap bobot anak timbangan dilakukan 5 kali pengambilan data,

masing-masing selama 10 detik, dimana setiap awal pengambilan data ini dilakukan porses reset (kalibrasi) sehingga dipastikan bahwa bacaan sensor selalu nol sebelum dibebani.

Hasil pengukuran disajikan dalam Tabel 7, yang menunjukkan bahwa prosentase selisih (tingkat kesalahan) adalah $< 1\%$, atau dengan kata lain tingkat ketelitian (akurasi) adalah $> 99\%$.

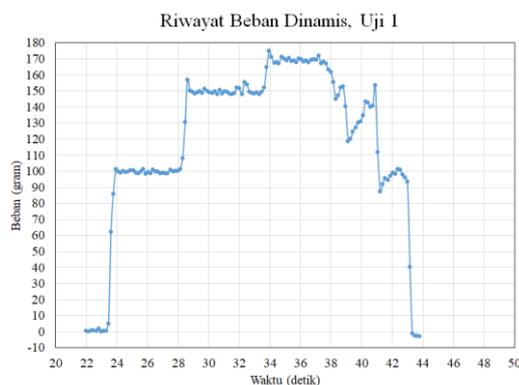
Tabel 7. Hasil Pengukuran Anak Timbangan.

Bobot Timbangan (gram)	Anak	Hasil (gram), Pengukuran ke					Rataan Hasil (gram)	Selisih Mutlak (gram)	Prosentase Selisih (%)
		1	2	3	4	5			
10		10.10	9.80	9.90	10.05	9.85	9.94	0.06	0.60
20		19.50	20.60	19.95	20.50	20.20	20.15	0.15	0.75
50		49.50	50.60	50.00	49.70	50.10	49.98	0.02	0.04
100		99.50	101.50	99.30	100.50	99.90	100.14	0.14	0.14

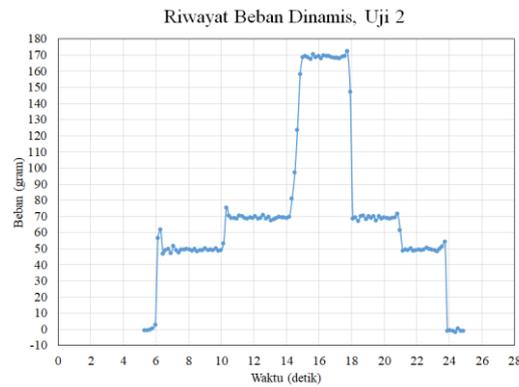
Pengukuran Gaya Dorong dengan Beban Dinamis

Pengukuran dengan beban dinamis adalah pengukuran dimana dalam rentang waktu tertentu, misalnya 30 detik, diberikan 3 jenis beban berbeda, dimulai dengan beban nol, kemudian ditambahkan satu demi satu secara bertahap, dan kemudian diambil secara bertahap dengan urutan mundur hingga beban kembali menjadi nol. Proses pembacaan sensor direkam selama waktu tersebut dan ditampilkan dalam bentuk grafik riwayat waktu (*time-history*).

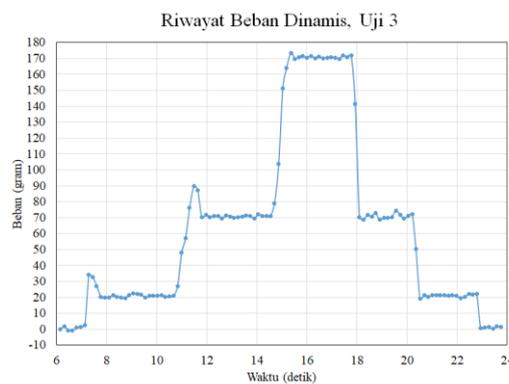
Pada pengujian dinamis ini, dilakukan 3 kali pengukuran: (1) dengan urutan beban 100 gram, 50 gram, dan 20 gram, (2) dengan urutan beban 50 gram, 20 gram, dan 100 gram, dan (3) dengan urutan beban 20 gram, 50 gram, dan 100 gram. Hasil pengujian disajikan dalam Gambar 33, Gambar 34 dan Gambar 35.



Gambar 33. Riwayat Beban Dinamis, Pengujian 1.



Gambar 34. Riwayat Beban Dinamis, Pengujian 2.



Gambar 35. Riwayat Beban Dinamis, Pengujian 3.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 33, Gambar 34 dan Gambar 35, bacaan sensor sangat bagus dan stabil sesuai dengan bobot total beban. Pengecualian terjadi pada Uji 1, yaitu bacaan sensor berfluktuasi pada detik 14 sd 43 ketika beban mulai diambil kembali, yang mana ini disebabkan proses pengambilan yang tidak baik sehingga alat bergoyang sehingga bacaan sensor terganggu. Hal menarik yang dapat dilihat adalah bahwa pada saat terjadi perubahan beban, terjadi lampuan (*overshoot*) dalam waktu kurang dari 0.5 detik, dan selanjutnya pembacaan beban menjadi stabil.

4. PENUTUP

Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang dilakukan tampak bahwa hasil-hasil pengukuran menunjukkan hasil-hasil akurat, yaitu bahwa beban terukur oleh alat ukur ini sesuai dengan beban standar yang diuji. Hasil dari pengujian yang dilakukan, ketelitian alat ini adalah lebih dari 99%, atau dengan kata lain tingkat kesalahan < 1%. Sebagai contoh, saat mengukur beban standar anak timbangan 100 gram, nilai yang ditampilkan adalah 100 ± 1 gram. Secara rinci, kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Alat ukur gaya dorong dan momen propulsi telah dibuat, dan dapat bekerja sesuai yang direncanakan. (2) Ketelitian alat ukur adalah 1%, untuk beban statis. (3) Pada pembebanan dinamis, terjadi lampuan (*overshoot*) dalam selang waktu kurang dari 0.5 detik setelah terjadi perubahan beban, dan selanjutnya bacaan menjadi stabil.

(4) Batas maksimum gaya dorong yang dapat diukur, sesuai batas kemampuan load-cell yang digunakan adalah 3 kg. (5) Batas maksimum momen puntir, sesuai batas kemampuan load-cell yang digunakan adalah 2.1407 N·m. (6) Sistem elektronik, dengan firmware yang tertanam telah bekerja dengan benar dan baik, demikian juga software antar-muka sebagai alat bantu pengguna telah bekerja dengan benar dan baik.

Saran

Meskipun alat ini telah bekerja dengan benar dan baik, namun ada beberapa saran dapat diberikan untuk pengembangan alat ini, yang mana ini terkait fitur lain yang perlu ditambahkan, yaitu: (1) Penambahan sensor kecepatan putar propeler (sensor RPM). (2) Penambahan sensor arus listrik dan tegangan, untuk pengukuran daya listrik yang diserap oleh sistem propulsi. (3) Penambahan perangkat pengendali kecepatan putar propeler. Saran-saran yang disajikan di atas, terkait langsung dengan penyempurnaan software, baik software tertanam, maupun software antar-muka.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (PPPM, P3M) Politeknik Negeri Bandung (POLBAN), atas dukungan finansial yang telah diberikan kepada penulis dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Achtelik, M. W., & Bachrach, A. (2009). *Autonomous Navigation and Exploration of a Quadrotor Helicopter in GPS-denied Indoor Environments*. Munchen: Technische Universität München. Retrieved from <https://groups.csail.mit.edu/rrg/papers/auvsi09.pdf>
- Arduino Team. (2024, June 16). *Arduino Nano*. (Arduino Official Website) Retrieved June 17, 2024, from <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/#tech-specs>
- ASM International Handbook Committee. (1990). *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Geauga County, Ohio: ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (ASM).
- AVIA Semiconductor. (2009). *HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*. Xiamen, China: AVIA Semiconductor.
- Cantrell, J., & Rohde, S. (2017). Chapter 11. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. In S. Yoshida, L. Lamberti, & C. Sciammarella (Eds.), *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Volume 3: Proceedings of the 2016 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics* (pp. 89-105). Switzerland: Springer & The Society for Experimental Mechanics, Inc.
- Ellington, C. P. (1999). The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Application to Micro-Air Vehicles. *Journal of Experimental Biology*, 202(23), 3439–3448.
- Koratkar, N. A. (2004). *Micro Air Vehicle Research*. Troy, New York, USA: Rensselaer Polytechnic Institute (RPI).

- Lissenden, C. J., & Salamon, N. J. (1999). *Design in Strength of Materials*. University Park, Pennsylvania: Pennsylvania State University.
- Norden, K. E. (1998). *Handbook of Electronic Weighing*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Peters, E. N. (2002). Chapter 11. Plastics: Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers. In M. Kutz (Ed.), *Handbook of Materials Selection* (pp. 335-355). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Pounds, P. E., & Mahony, R. E. (2006). Modelling and Control of a Quad-Rotor Robot. Canberra, Australia: Australian National University. Retrieved from <https://eprints.qut.edu.au/33767/>
- Ramadhani, M. J., & Fernandez, E. O. (2020). Further Development of Low Cost Thrust Benchmarking System (TBS) for Dynamic Thrust Measurement. *7th International Seminar on Aerospace Science and Technology*. 2226, pp. 1-14. Jakarta: American Institute of Physics (AIP). doi:10.1088/1742-6596/1130/1/012022
- Rosita, I. (2021). *Rancang Bangun Perangkat Pengukur Gaya Dorong, Kecepatan Putaran, dan Torsi Propeller Pesawat Model*. Bandung: Program Studi Teknik Aeronautika, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung.
- Tyto Robotics. (2021). Series 1580/1585 User Manual. Gatineau, Quebec, Canada: Tyto Robotics.
- Tyto Robotics. (2023). Series 1585 Thrust Stand Datasheet. Gatineau, Quebec, Canada: Tyto Robotics.
- Virginio, R., & Fuad, F. A. (2018). Design and Implementation of Low Cost Thrust Benchmarking System (TBS) in Application for Small Scale Electric UAV Propeller Characterization. *Journal of Physics: Conference Series*, 1130, 1-14. doi:10.1088/1742-6596/1130/1/012022
- Wang, X., Lu, W., Liu, W., Chen, C., & Zhao, L. (2023). Aerodynamic Analysis of a Logistics UAV with Foldable Bi-wing Configuration. *International Journal of Aerospace Engineering*, 1-25. doi:10.1155/2023/3304048
- Wibowo, S. S. (2010). *Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Angkat Pesawat Micro-Copter*. Bandung (POLBAN): Politeknik Negeri Bandung (POLBAN).
- Wibowo, S. S. (2023). *Rancang Bangun Alat Ukur Gaya Dorong dan Momen Puntir Sistem Propulsi*. Bandung: Politeknik Negeri Bandung.
- Yoon, M. (2015). Experimental Identification of Thrust Dynamics for a Multi-Rotor Helicopter. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(11), 206-209.