

Rancang Bangun Alat Peraga Turbin Angin sebagai Media Pembelajaran Energi Terbarukan di Perguruan Tinggi

M N Setiawan^{a*}, M Wahyu Pratama^a, Ahmad Anwar^b, Heri Sutiyono^c, Munadi^d

^aDepartemen Teknik Energi Terbarukan, Sekolah STEM, Universitas Prasetiya Mulya
Kampus BSD, Tangerang, Banten, Indonesia

^bDepartemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Kampus Tembalang, Semarang, Indonesia

^cReinutech Engineering Innovation
Workshop Mangunharjo, Semarang, Indonesia

^dDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Kampus Tembalang, Semarang, Indonesia.

*E-mail: nanda.setiawan@pmbbs.ac.id

Abstract

Progress in the field of renewable energy highlights the importance of strengthening educational facilities and infrastructure that support students' practical understanding. The Renewable Energy Engineering Study Program at Prasetiya Mulya University, established in 2017, has undertaken various technological developments related to wind turbines. However, instructional tools specifically designed for classroom-based learning remain unavailable. This research aims to develop a portable wind turbine teaching aid that effectively demonstrates the structure and working principles of a wind turbine. The research activities include a literature review, 3D model design, manufacturing using both 3D printing and conventional machining techniques, component assembly, development of a monitoring interface (GUI), and performance testing. The teaching aid is designed to replicate the nacelle of a horizontal-axis wind turbine (HAWT) and is equipped with vibration sensors and an optocoupler for data acquisition. Test results show that the device functions reliably while the DC motor used to simulate the wind turbine rotor can be controlled via a LabVIEW-based interface, and sensor data is displayed in real time.

Kata kunci: Wind Energy, Wind Turbine, Teaching Aid, Design, Monitoring System

Abstrak

Kemajuan di bidang energi terbarukan menekankan pentingnya penguatan sarana dan prasarana pendidikan yang mendukung pemahaman praktis mahasiswa. Program Studi Teknik Energi Terbarukan Universitas Prasetiya Mulya, yang telah beroperasi sejak tahun 2017, telah melakukan berbagai pengembangan teknologi terkait turbin angin. Namun, hingga saat ini belum tersedia alat pembelajaran yang dirancang secara khusus untuk memenuhi kebutuhan dalam konteks perkuliahan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan alat peraga turbin angin portabel yang mampu merepresentasikan bentuk dan prinsip kerja turbin angin secara efektif. Kegiatan penelitian mencakup studi literatur, perancangan model 3D, proses manufaktur menggunakan 3D print dan permesinan konvensional, perakitan komponen, pembuatan antarmuka pemantauan (GUI), hingga tahap pengujian. Alat peraga ini dirancang untuk menyerupai bentuk *nacelle* pada turbin angin sumbu horizontal, serta dilengkapi dengan satu sensor getaran dan satu sensor *optocoupler* untuk proses akuisisi data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat peraga dapat berfungsi dengan baik, di mana motor DC yang digunakan sebagai pengganti rotor turbin angin dapat dikendalikan melalui antarmuka berbasis LabVIEW, dan data dari sensor ditampilkan secara *real-time*.

Kata kunci: Energi Angin, Turbin Angin, Alat peraga, Desain, Sistem Pemantau

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi energi terbarukan mengalami percepatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, seiring dengan meningkatnya permintaan global akan energi bersih dan menurunnya harga teknologi terkait. Salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan di Indonesia adalah energi angin. Berdasarkan data potensi nasional, total potensi energi angin di Indonesia mencapai sekitar 155 GW. Namun, hingga saat ini, pemanfaatannya baru mencapai sekitar 0,1% dari total potensi tersebut [1]. Rendahnya tingkat pemanfaatan ini disebabkan oleh berbagai tantangan, terutama dalam hal penelitian dan pengembangan teknologi turbin angin yang sesuai dengan karakteristik angin lokal di berbagai wilayah Indonesia [2].

Salah satu kendala utama dalam pengembangan teknologi turbin angin adalah tingginya biaya investasi awal serta keterbatasan sumber daya manusia yang memiliki keahlian teknis dalam sistem energi angin [3]. Untuk mengatasi hal ini, dibutuhkan langkah strategis seperti pembentukan kelompok keahlian (*center of excellence*) di bidang teknologi turbin angin, serta pemerataan sarana dan prasarana pendidikan di institusi pendidikan tinggi [4] dan [5]. Ketersediaan fasilitas pembelajaran yang memadai di berbagai lembaga pendidikan akan mempercepat proses alih pengetahuan dan mendukung pengembangan teknologi turbin angin yang berkelanjutan di Indonesia [6].

Program Studi Teknik Energi Terbarukan di Universitas Prasetiya Mulya merupakan program studi yang relatif baru dan telah beroperasi sejak tahun 2017. Sebagai program studi yang masih dalam tahap penguatan, dibutuhkan dukungan sarana dan prasarana pembelajaran yang representatif, termasuk alat peraga dan alat uji untuk kegiatan praktikum maupun eksperimen. Ketersediaan alat peraga yang dirancang secara fungsional dan representatif sangat penting untuk membantu mahasiswa memahami prinsip kerja turbin angin secara menyeluruh [7]. Selain itu, alat pembelajaran ini juga memudahkan pengajar dalam menyampaikan materi yang kompleks secara lebih aplikatif dan kontekstual, sehingga mampu menjembatani antara konsep teoritis dan kondisi teknis di lapangan [8].

Pada tahun 2022, telah dimulai studi awal mengenai analisis performa aerodinamika bilah turbin angin. Penelitian ini berfokus pada simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh variasi profil airfoil dan sudut serang terhadap performa serta keluaran daya turbin. Hasil studi tersebut menjadi landasan penting dalam memahami karakteristik desain bilah yang sesuai dengan kondisi angin lokal. Penelitian kemudian berlanjut pada tahun 2023 dengan pengembangan prototipe *windmill water pump* yang diaplikasikan untuk membantu mengalirkan air laut ke tambak, guna mendukung proses produksi garam dan meningkatkan efisiensi kerja petani garam di wilayah pesisir [9].

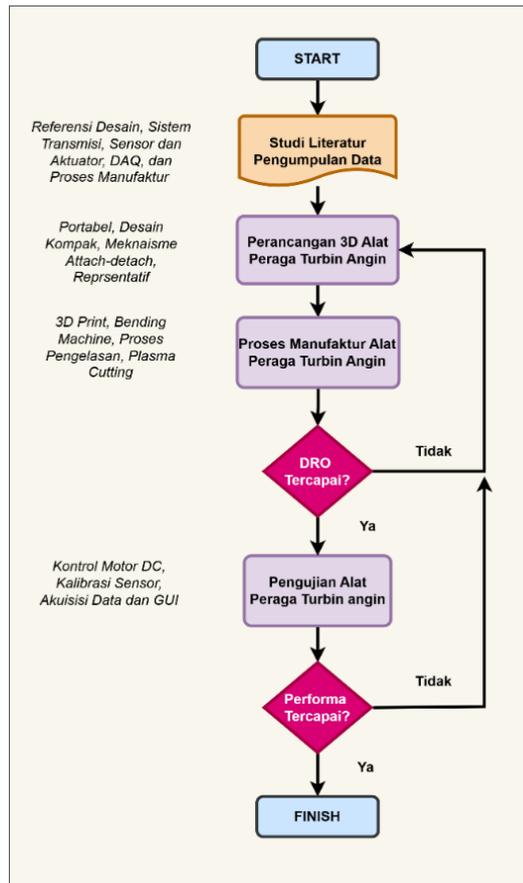
Pada tahun yang sama, dibangun pula sebuah terowongan angin berskala laboratorium sebagai sarana pengujian dan validasi eksperimen aerodinamika bilah turbin angin sumbu horizontal [10]. Memasuki tahun 2024, fokus penelitian diarahkan pada aspek kontrol dan instrumentasi. Pengembangan dilakukan pada sistem *torque-controlled DC motor* sebagai simulator turbin angin, yang bertujuan untuk mereplikasi beban dinamis turbin dalam kondisi pengujian [11]. Selain itu, dilakukan kalibrasi sistem akuisisi data untuk alat uji performa turbin angin guna memastikan keakuratan dan reliabilitas data selama proses eksperimen [12].

Meskipun berbagai pengembangan telah dilakukan, kebutuhan akan alat peraga turbin angin untuk mendukung pembelajaran di ruang kelas masih belum terpenuhi secara proporsional. Alat pembelajaran yang efektif seharusnya memiliki beberapa karakteristik penting seperti berukuran kecil dan ringan agar mudah dipindahkan, memiliki desain modular yang memungkinkan proses bongkar pasang dengan mudah untuk mendukung pemahaman konseptual mahasiswa, serta dilengkapi dengan sistem elektronik dengan tata letak kompak yang aman dan dapat dimonitor secara *real-time*. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengembangan alat peraga turbin angin yang bersifat kompak, portabel, dan aman, serta didukung oleh sistem monitoring berbasis antarmuka grafis (GUI). Kehadiran alat ini diharapkan dapat memperkuat kegiatan pembelajaran praktikum dan memperkaya pengalaman mahasiswa dalam memahami prinsip kerja turbin angin secara aplikatif dan kontekstual di lingkungan akademik.

2. Material dan Metode Penelitian

Gambar 1 di bawah ini menjelaskan alur metodologi perancangan alat peraga turbin angin secara detail. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur dan pengumpulan data guna memperoleh referensi terkait desain alat peraga, sistem transmisi, sensor dan aktuator, sistem akuisisi data (DAQ), serta proses manufaktur terkait. Studi ini menjadi dasar penting dalam merumuskan spesifikasi teknis dan desain awal alat peraga yang akan dikembangkan. Tahap selanjutnya adalah perancangan 3D alat peraga turbin angin menggunakan perangkat lunak Solidworks. Perancangan ini mempertimbangkan beberapa aspek penting, seperti ukuran yang ringkas dan ringan, kemudahan dalam proses perakitan dan pembongkaran (*attach-detach mechanism*), serta kemampuan alat dalam merepresentasikan prinsip kerja turbin angin secara fungsional.

Setelah desain diselesaikan, proses dilanjutkan dengan tahap manufaktur yang melibatkan teknik *3D printing*, pembentukan *frame* dengan *bending machine*, proses pengelasan, serta pemotongan plasma untuk menghasilkan komponen sesuai dengan desain yang ditetapkan. Komponen hasil manufaktur kemudian dievaluasi berdasarkan ketercapaian *Design Requirement Objective* (DRO) yang telah ditetapkan. Jika hasil evaluasi menunjukkan bahwa alat belum memenuhi kriteria tersebut, maka dilakukan revisi pada tahap perancangan dan manufaktur hingga persyaratan desain terpenuhi. Setelah itu, dilakukan pengujian alat peraga turbin angin yang mencakup integrasi sistem kontrol motor DC, kalibrasi sensor, sistem akuisisi data, serta pengembangan antarmuka pengguna berbasis GUI. Proses ini penting untuk memastikan bahwa seluruh komponen bekerja secara sinergis dan dapat memberikan data yang *reliable* dalam skenario praktikum. Tahap akhir dari metodologi ini adalah evaluasi performa alat peraga berdasarkan parameter teknis yang telah ditentukan sebelumnya. Jika performa alat belum memenuhi DRO, dilakukan pengembangan ulang hingga diperoleh hasil yang memenuhi persyaratan yang ditentukan. Rangkaian metodologi ini diharapkan dapat menghasilkan alat peraga turbin angin yang tidak hanya andal secara teknis, tetapi juga efektif dalam mendukung kegiatan pembelajaran praktikum secara aplikatif dan kontekstual di lingkungan akademik.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Dalam mendukung kegiatan penelitian ini, digunakan berbagai alat dan bahan yang dirancang untuk membentuk sistem alat peraga turbin angin yang kompak dan fungsional. Komponen utama dalam sistem ini meliputi sensor vibrasi (MPU 6050) yang berfungsi untuk mendeteksi getaran pada sistem, serta sensor *optocoupler* yang digunakan untuk keperluan pembacaan kecepatan rotasi rotor secara akurat. Detail dari alat dan bahan yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Alat Penelitian

No	Alat dan Bahan
1	Mesin penekuk
2	Mesin 3D printing
3	Mesin pemotong plasma
4	Mikrokontroler
5	Sensor MPU6050
6	Sensor Optocoupler
7	Catu daya 24 V
8	Filament 3D print
9	Kabel DC dan AC
10	Motor DC
11	Batang baja silinder
12	Steel Bearing
13	Pelat baja rectangular
14	Baut
15	Pipa klipsal

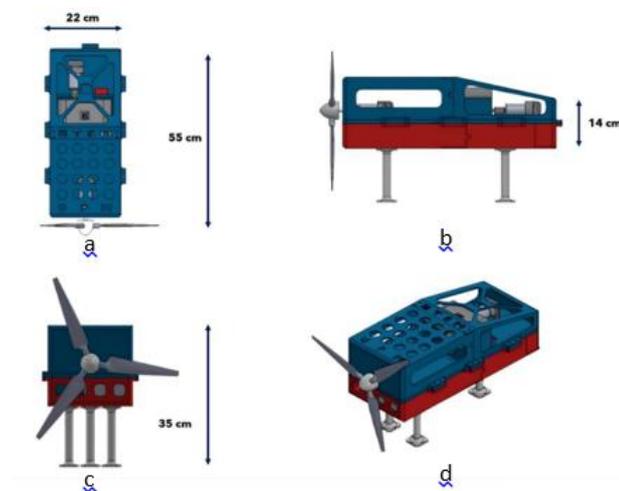
Dalam proses pembuatan komponen fisik alat peraga, digunakan filamen 3D print sebagai material utama yang dicetak menggunakan mesin 3D printing untuk merealisasikan desain komponen turbin secara presisi dan efisien. Sistem kelistrikan dirancang dengan memperhatikan kebutuhan arus dan tegangan masing-masing komponen, menggunakan kabel DC dan AC yang sesuai untuk menjamin kestabilan dan keamanan aliran listrik. Sebagai penggerak utama sistem, digunakan motor DC yang dikombinasikan dengan *steel bearing* dan batang baja silinder guna memastikan rotasi poros

berjalan secara halus, stabil, dan minim gesekan. Untuk mendukung operasional sistem secara keseluruhan, digunakan catu daya 24 volt yang menyediakan tegangan yang memadai bagi motor maupun sistem kendali. Seluruh sistem dikendalikan oleh sebuah mikrokontroler, yang memiliki fungsi utama dalam pengolahan data dari sensor, pengendalian aktuator, serta pelaksanaan proses akuisisi dan pemantauan data secara *real-time*. Integrasi dari seluruh alat dan bahan ini dirancang untuk menghasilkan prototipe alat peraga turbin angin yang tidak hanya representatif dan aman digunakan, tetapi juga mampu meningkatkan efektivitas proses pembelajaran dan eksperimen di lingkungan akademik.

3. Hasil dan Pembahasan

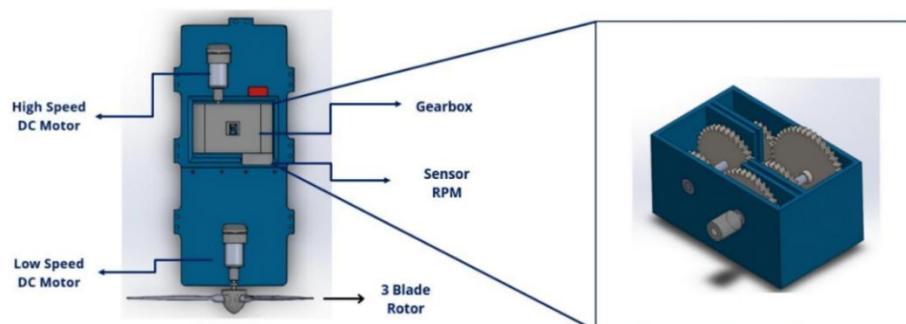
3.1 Perancangan Model Tiga Dimensi

Gambar 2 di bawah ini menunjukkan hasil akhir dari rancangan model tiga dimensi prototipe alat peraga turbin angin portabel yang telah dikembangkan sesuai dengan kriteria desain yang telah ditetapkan. Rancangan 3D ini disajikan dari empat sudut pandang yang berbeda, yaitu tampak atas, tampak samping, tampak depan, dan perspektif isometrik, guna memberikan gambaran menyeluruh terhadap struktur dan dimensi alat yang telah dirancang. Berdasarkan visualisasi tersebut, prototipe alat peraga ini memiliki dimensi panjang 55 cm, lebar 22 cm, dan tinggi total 35 cm (termasuk tinggi penyangga). Adapun tinggi bilah utama alat adalah 14 cm. Pemilihan dimensi tersebut bertujuan menjaga proporsi desain yang kompak dan efisien, sehingga alat ini dapat digunakan secara optimal di ruang terbatas, seperti pada saat demonstrasi di kelas dalam kegiatan perkuliahan.



Gambar 2. Desain Alat Peraga Turbin Angin
a. tampak atas; b. tampak samping; c. tampak depan; d. tampak isometrik

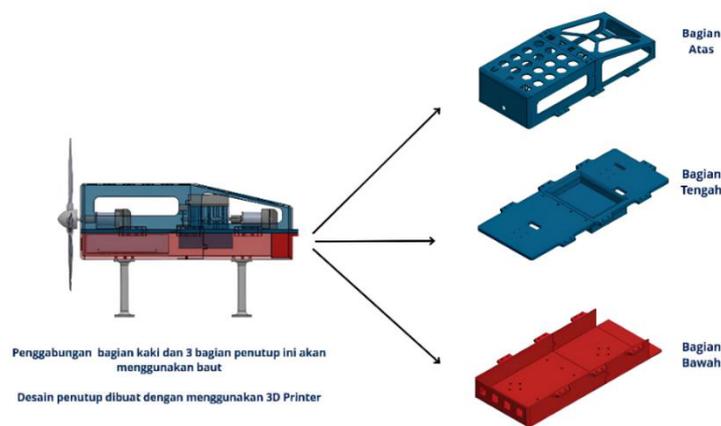
Struktur rangka prototipe dirancang dengan pembagian dua kompartemen utama yang dibedakan berdasarkan warna untuk memudahkan identifikasi fungsi. Bagian atas (berwarna biru) diperuntukkan bagi penempatan komponen mekanik, dan elektronik, sementara bagian bawah (berwarna merah) difokuskan untuk penyimpanan catu daya (*power supply*) dan sistem kontrol. Turbin tiga bilah ditempatkan di bagian depan alat dan dihubungkan dengan motor DC melalui poros dan bantalan (*bearing*) guna menjamin kestabilan rotasi serta meminimalkan gesekan selama proses pengoperasian. Desain rangka badan juga dilengkapi dengan rongga atau bukaan di beberapa sisi yang berfungsi sebagai pegangan (*grip*) untuk memudahkan proses pengangkatan dan pemindahan alat, serta memberikan akses yang lebih mudah untuk pemeliharaan dan pengamatan terhadap komponen internal. Struktur penyangga berbahan logam dirancang untuk memberikan kestabilan terhadap getaran atau guncangan selama pengujian berlangsung, sekaligus memungkinkan alat ditempatkan di berbagai jenis permukaan.



Gambar 3. Detail Komponen Alat Peraga

Pada bagian dalam prototipe alat peraga, terdapat komponen utama berupa bilah turbin yang terhubung dengan hub sebagai rotor, serta motor DC yang berfungsi sebagai penggerak utama sistem. Konfigurasi ini merepresentasikan prinsip kerja turbin angin, di mana rotor akan berputar akibat hembusan angin dan mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Dalam konteks alat peraga ini, motor DC digunakan secara terbalik sebagai pengganti angin eksternal untuk mensimulasikan putaran rotor secara terkontrol dalam lingkup pengujian. Sistem transmisi dalam alat peraga ini dilengkapi dengan susunan roda gigi (*gear train*) yang memiliki rasio 1:4. Rasio ini dipilih untuk menunjukkan bagaimana putaran lambat dari rotor dapat dikonversikan menjadi putaran lebih cepat pada generator, sebagaimana yang terjadi pada sistem transmisi pada turbin angin di lapangan.

Untuk memantau kecepatan putaran, sensor *optocoupler* (RPM sensor) dipasang pada bagian *output* dari roda gigi, sehingga memungkinkan akuisisi data rotasi secara *real-time*. Selain itu, alat ini juga dilengkapi dengan sensor vibrasi (MPU 6050) yang diletakkan pada bagian atas penutup roda gigi. Penempatan ini bertujuan untuk mendeteksi adanya getaran mekanis selama operasional sistem, yang dapat digunakan sebagai indikator kestabilan mekanik dan kondisi kerja komponen transmisi. Integrasi sistem transmisi dan sensor ini bertujuan memberikan gambaran menyeluruh mengenai dinamika mekanis pada turbin angin, sekaligus meningkatkan nilai edukatif dari alat peraga dalam simulasi dan pengamatan fenomena teknis secara langsung.



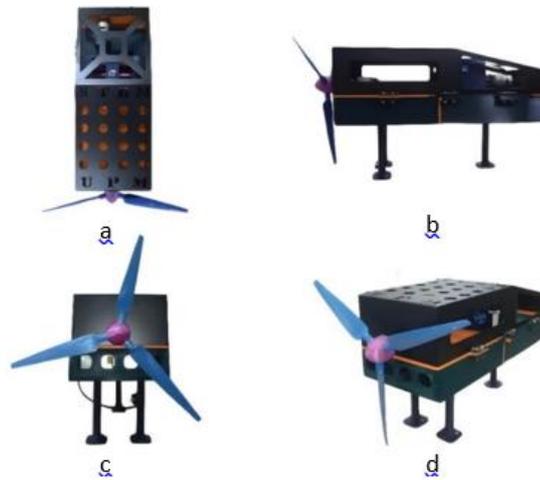
Gambar 4. Struktur Rangka Alat Peraga Turbin Angin

Struktur rangka (*frame*) pada prototipe alat peraga ini dirancang secara modular dan fungsional untuk mengakomodasi kebutuhan proteksi, kestabilan, serta kemudahan akses terhadap berbagai komponen. *Frame* bagian atas berfungsi sebagai pelindung utama bagi seluruh komponen mekanik dan elektrik dari potensi gangguan eksternal, seperti benturan atau dorongan. Selain perlindungan, bagian ini juga dirancang dengan mempertimbangkan sirkulasi udara yang cukup guna mencegah peningkatan temperatur berlebih selama alat beroperasi.

Rangka bagian tengah berperan sebagai landasan struktural untuk pemasangan berbagai komponen inti, seperti motor DC, *gearbox*, sensor, dan poros rotor. Penempatan pada level ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan distribusi massa serta memastikan keterjangkauan dan keteraturan dalam proses perakitan maupun pemeliharaan komponen. Penataan posisi yang sistematis juga memudahkan observasi visual langsung terhadap interaksi antar komponen saat alat digunakan. Sementara itu, rangka bagian bawah dirancang khusus sebagai ruang penyimpanan untuk unit mikrokontroler dan catu daya. Kedua komponen ini dikombinasikan dalam satu kompartemen tertutup yang dirancang rapi dan ergonomis untuk menjaga kerapian kabel, melindungi dari gangguan elektromagnetik, serta memudahkan akses saat dilakukan perawatan atau penggantian unit. Untuk mendukung integrasi sistem, konektivitas antar bagian dilakukan melalui jalur kabel yang telah diatur pada alur khusus di dalam rangka, dan dilengkapi dengan pelindung (*casing*) tambahan. Hal ini bertujuan untuk mencegah kabel terjepit, tergesek, atau terkena gangguan mekanik lainnya, sekaligus menjaga estetika dan keamanan penggunaan secara keseluruhan.

3.2 Prototipe Alat Peraga Turbin Angin Hasil Manufaktur

Prototipe alat peraga turbin angin ini telah direalisasikan melalui proses manufaktur yang memadukan teknologi fabrikasi konvensional dan manufaktur aditif (*additive manufacturing*), dengan tujuan untuk mencapai efisiensi dari segi waktu, biaya, dan fleksibilitas desain. Struktur rangka alat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah, yang masing-masing dirancang berdasarkan fungsi serta kriteria desain mekaniknya. Bagian atas rangka direalisasikan menggunakan pelat logam yang dibentuk melalui proses *bending*, sehingga menghasilkan struktur yang kokoh dan stabil. Pematangan serta pembuatan pola lubang dilakukan menggunakan mesin *plasma cutting*, yang memungkinkan fleksibilitas desain dan akurasi geometri sesuai kebutuhan integrasi komponen.



Gambar 5. Tampilan Alat Peraga Turbin Angin Hasil Manufaktur
a. tampak atas; b. tampak samping; c. tampak depan; d. tampak isometrik

Sementara itu, bagian tengah dan bawah rangka dimanufaktur menggunakan teknologi *3D printing* dengan material termoplastik berdensitas tinggi. Pemilihan material ini ditujukan untuk menjaga rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*), sehingga struktur tetap ringan namun memiliki ketahanan mekanik yang memadai. Adapun Komponen mekanik utama, seperti *gearbox* dan rotor, juga diproduksi melalui proses *3D printing*. Hal ini memberikan keunggulan dalam hal kustomisasi desain dan modularitas sistem. Perakitan antar komponen struktural menggunakan sistem sambungan mekanis berupa baut, sedangkan untuk pemasangan motor DC dan sensor digunakan perekat khusus yang tahan terhadap beban dinamis, khususnya getaran mekanik. Poros utama dan *coupling* rotor diperoleh dari komponen komersial yang tersedia di pasaran. Oleh karena itu, diameter lubang pada rotor disesuaikan dengan dimensi poros dan *coupling* yang dibeli, guna menjamin kesesuaian dan kekuatan sambungan antara rotor dan sistem transmisi. Untuk sistem kendali, digunakan mikrokontroler *Arduino Uno* yang berperan sebagai pusat pengendali motor DC. *Arduino Uno* mengelola proses pembacaan data dari sensor kecepatan rotasi (RPM) dan sensor getaran, serta bertindak sebagai antarmuka dengan sistem monitoring melalui perangkat lunak yang telah dikembangkan. Pendekatan ini memberikan kemudahan dalam pemrograman serta integrasi sistem, menjadikan prototipe ini efektif untuk tujuan edukatif dan pengujian awal.

3.3 Perancangan Sistem Monitoring Berbasis LabVIEW

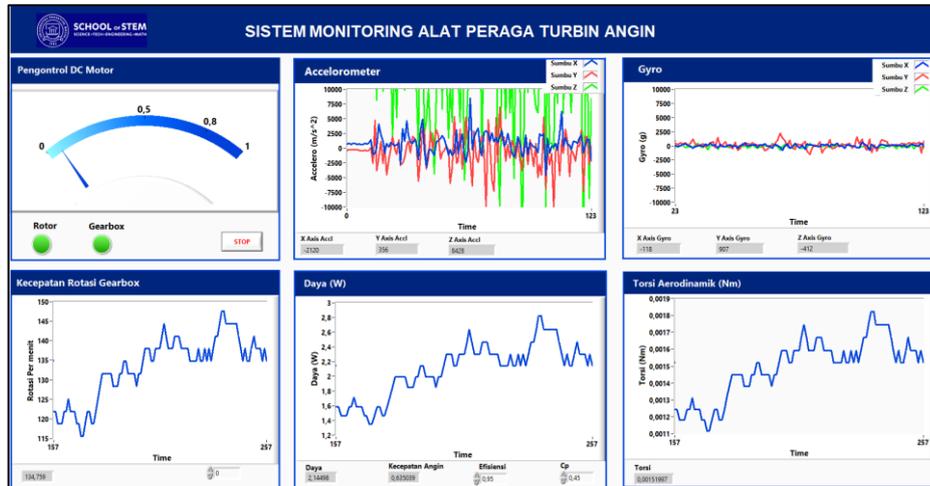
Sistem antarmuka pengguna (GUI) untuk kontrol dan *monitoring* alat peraga turbin angin dikembangkan menggunakan perangkat lunak LabVIEW untuk membangun sistem instrumentasi virtual berbasis visual. Pemanfaatan LabVIEW dalam pengembangan GUI ini memungkinkan integrasi yang efisien antara perangkat keras (seperti sensor dan aktuator) dengan sistem kontrol berbasis mikrokontroler Arduino. Pada tampilan utama GUI, disediakan *knob* digital sebagai pengontrol kecepatan motor DC yang terhubung langsung dengan rotor turbin dan sistem roda gigi (*gearbox*). Pengguna dapat mengatur putaran motor secara *real-time*, sehingga simulasi perilaku turbin angin pada berbagai kondisi kecepatan dapat dengan mudah dilakukan. Pengaturan ini secara langsung merepresentasikan perubahan kecepatan angin dalam konteks pembelajaran aerodinamika turbin angin.

Selain kontrol, antarmuka ini juga dilengkapi dengan jendela *monitoring* yang menampilkan data kecepatan putaran keluaran (RPM) dari *gearbox* dan level getaran (*vibration*) yang terdeteksi oleh sensor. Informasi ini ditampilkan secara dinamis selama alat beroperasi, memungkinkan pengguna untuk mengamati pengaruh perubahan kecepatan terhadap kestabilan sistem mekanik, serta mempelajari fenomena getaran yang mungkin terjadi dalam sistem transmisi turbin. Lebih lanjut, GUI juga menyediakan panel simulasi daya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin. Estimasi ini dihitung berdasarkan model persamaan daya turbin angin yang sederhana namun representatif, yakni:

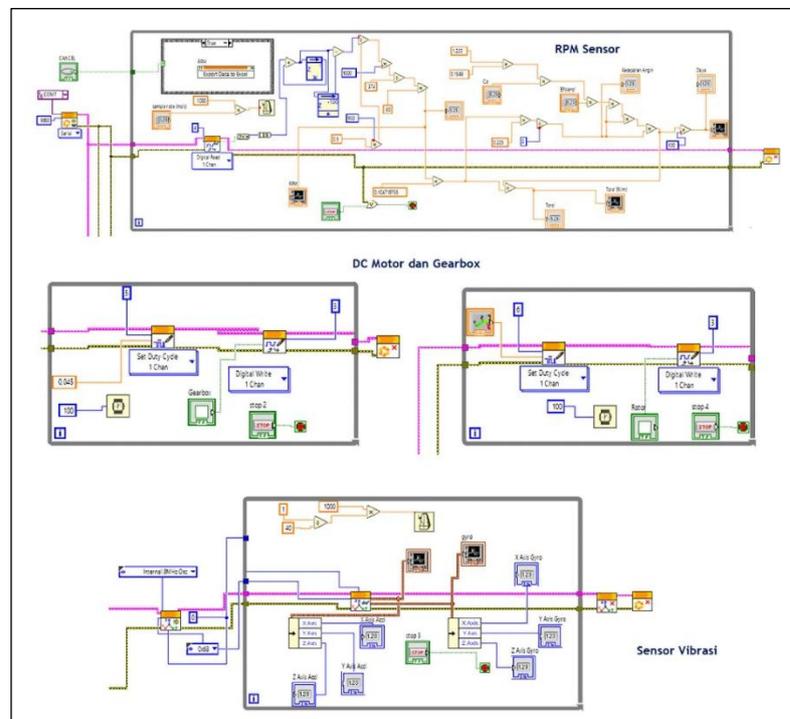
$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p \cdot v^3 \cdot \eta \quad (1)$$

$$\tau = \frac{P}{\omega} \quad (2)$$

Pengguna cukup memasukkan nilai kecepatan angin (v), efisiensi sistem (η), luas sapuan rotor (A) dan koefisien daya (C_p) sesuai dengan skenario yang ingin ditinjau. *Output* dari model tersebut memberikan estimasi daya dan torsi yang akan dihasilkan oleh sistem turbin pada kondisi tersebut, sehingga dapat digunakan sebagai acuan pembelajaran dalam memahami hubungan antara parameter desain, kondisi operasi, dan performa *output* dari turbin angin.



Gambar 6. Tampilan GUI Sistem Monitoring Alat Peraga Turbin Angin



Gambar 7. Tampilan Virtual Instrumen (VI) Sistem Monitoring Alat Peraga Turbin Angin

Sistem kontrol dan *monitoring* alat peraga turbin angin ini dikembangkan menggunakan perangkat lunak LabVIEW dengan pendekatan modular melalui 3 sub-VI utama, yang masing-masing memiliki peran spesifik dalam pengoperasian sistem. Sub-VI pertama bertanggung jawab terhadap pembacaan dan pemrosesan data dari sensor kecepatan putar (RPM sensor). Data yang diperoleh digunakan untuk menghitung kecepatan putar rotor, estimasi kecepatan angin, serta besaran daya dan torsi turbin berdasarkan model matematis sederhana. Perhitungan ini melibatkan parameter seperti koefisien daya (C_p), efisiensi sistem, dan luas sapuan rotor. Seluruh data hasil pengukuran dan estimasi ditampilkan secara *real-time* pada antarmuka pengguna (GUI) dan dapat diekspor ke dalam format *Excel* untuk keperluan analisis lebih lanjut. Sub-VI kedua dan ketiga masing-masing berfungsi sebagai pengendali untuk dua motor DC yang menggerakkan rotor utama dan sistem roda gigi (*gearbox*).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil proses perancangan, manufaktur, dan uji coba, dapat disimpulkan bahwa alat peraga turbin angin yang dikembangkan telah berfungsi dengan baik dan potensial sebagai media pembelajaran dalam lingkungan kelas. Perangkat ini menunjukkan performa yang responsif, dengan motor DC yang mampu merespons perintah kendali dari antarmuka LabVIEW secara konsisten. Integrasi sensor RPM dan vibrasi memungkinkan akuisisi data secara *real-time*, yang mendukung proses pemantauan dan analisis performa sistem secara langsung. Secara keseluruhan, alat ini telah

berhasil memenuhi spesifikasi desain dan tujuan utamanya sebagai sarana praktikum aplikatif di bidang energi terbarukan, khususnya dalam konteks pembelajaran akademik di lingkungan universitas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi kepada STEMPreneur Universitas Prasetiya Mulya atas dukungan pendanaan yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian dan pengembangan alat peraga ini.

Disklaimer

Seluruh ide, konsep, dan konten dalam penelitian ini merupakan hasil orisinal dari penulis dan tidak disadur dari karya pihak lain. Dalam proses penyusunan dokumen ini, penulis menggunakan bantuan perangkat lunak berbasis kecerdasan buatan (AI) semata-mata untuk keperluan *proofreading*, perbaikan keterbacaan, serta penyesuaian gaya bahasa agar sesuai dengan standar penulisan akademik. Bantuan perangkat lunak tersebut tidak digunakan untuk menyusun substansi atau isi ilmiah dari penelitian.

Selain itu, perangkat lunak LabVIEW yang digunakan dalam penelitian ini merupakan versi *student edition*. Penggunaan versi ini bertujuan untuk mendukung proses pembelajaran dan pengenalan perangkat lunak LabVIEW kepada mahasiswa serta lingkungan akademik secara umum, sesuai dengan prinsip pendidikan dan non-komersial.

Daftar Pustaka

- [1] Suharyati *et al.*, “Outlook Energi Indonesia 2023,” Jakarta, Dec. 2023.
- [2] M. Karjadi, “Desain Turbin Angin Modern sebagai upaya Meningkatkan Efisiensi dan Kinerja Energi Angin,” *R2J*, vol. 7, no. 1, 2024, doi: 10.38035/rrj.v7i1.
- [3] A. K. Al Huda, “Transisi Energi di Indonesia: Overview & Challenges,” 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/374417692>
- [4] D. I. Suranto, S. Annur, Ibrahim, and A. Alfianto, “Pentingnya Manajemen Sarana Dan Prasarana Dalam Meningkatkan Mutu Pendidikan,” *Jurnal Kiprah Pendidikan*, vol. 1, no. 2, pp. 59–66, Apr. 2022, doi: 10.33578/kpd.v1i2.26.
- [5] I. I. G. P. O. Wijaya, M. L. Yustika, and B. A. Kharisma, “PIMAS Pelatihan Pemodelan Instalasi Pltb Sebagai Improve Kurikulum Pengajaran di SMKN 4 Bandung,” *Jurnal Pengabdian Masyarakat (PIMAS)*, vol. 3, no. 3, 2024, doi: 10.35960/pimas.v3i3.1470.
- [6] Dinata. D, H. Yuliani, and J. Annovasho, “Pengembangan Media Kincir Angin Model Vertikal Axis Pada Pembelajaran Arus Listrik Bolak-Balik,” *Kappa Journal*, vol. 8, no. 3, p. 467, 2024, doi: 10.29408/kpj.v8i3.28059.
- [7] M. Z. Hidayat, “Rancang Bangun Miniatur Kincir Angin Sebagai Media Pembelajaran Untuk Mata Kuliah Renewable Energy,” Banda Aceh, 2025.
- [8] S. S. A. Akbar, Nurapidah, C. A. Tunny, and Nasharuddin, “Pengembangan Media Kincir Angin Berbasis Baterai sebagai Alat Peraga Pembelajaran Energi dan Perubahannya,” *Hikamitsu Journal Of Multidisiplin*, 2025.
- [9] M. N. Setiawan, H. Ramadhan, A. M. Sutopo, and Zulkan, “Aerodynamic analysis of a windmill water pump using blade element momentum theory,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Jan. 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202447503007.
- [10] M. N. Setiawan and Z. S. Saldi, “Pelatihan dan Pengembangan Alat Uji Unjuk Kerja Turbin Angin Modular Untuk Mendukung Ketercapaian Bauran Energi Nasional Tahun 2025,” 2023.
- [11] D. Setiadi, M. Mustakim, M. N. Setiawan, and A. I. Putri, “Torque-Controlled DC Motor for Wind Turbine Simulator Application,” in *2023 5th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE)*, IEEE, Dec. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICECIE58751.2024.10457438.
- [12] Y. A. Miftahulududin, M. Munadi, and M. N. Setiawan, “Kalibrasi Sensor Pada Sistem Data Akuisis Alat Uji Unjuk Kerja Turbin Angin.”