

Analisis Potensi Energi Angin Menggunakan Turbin Horizontal di Kawasan Wisata Mangrove Desa Tanjung Rejo, Kecamatan Percut Sei Tuan

Analysis of Wind Energy Potential Using Horizontal Turbines in the Mangrove Tourism Area of Tanjung Rejo Village, Percut Sei Tuan District

Muhammad Idris^{1*}, Achmad Jusuf Zulfikar¹, Darianto¹, Iswandi¹, Jufrizal¹, Tino Hermanto¹, Haniza² dan Uun Novalia Harahap³

¹Teknik Mesin, Universitas Medan Area, Alamat, Jl. Kolam No. 1 Medan Estate, Indonesia

²Teknik Industri, Universitas Medan Area, Alamat, Jl. Kolam No. 1 Medan Estate, Indonesia

³Teknik Industri, Universitas Harapan Medan, Alamat, Jl. HM. Joni No. 70C Medan, Indonesia

*Corresponding author: muhammad_idris@staff.uma.ac.id

Diterima: 17-07-2024

Disetujui: 30-07-2024

Dipublikasikan: 08-08-2024

IRAJPKM is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Tridharma perguruan tinggi merupakan tugas pokok dan fungsi bagi setiap dosen yang harus dilaksanakan setiap semester. Salah satu kegiatan tridharma perguruan tinggi ialah pengabdian kepada masyarakat yang bertujuan untuk memberikan kontribusi keilmuan yang dimiliki oleh setiap dosen. Dalam kesempatan ini program studi teknik mesin UMA berkesempatan melaksanakannya di desa Tanjung Rejo Kecamatan Percut Sei. Tuan yang memiliki objek wisata hutan mangrove. Objek wisata tersebut terletak di pesisir pantai selat Melaka, dimana secara geografisnya memiliki potensi energi terbarukan, yaitu energi angin. Berdasarkan data pengukuran kecepatan angin rata-rata diperoleh 2 m/s. Dari potensi daya yang dapat dibangkitkan melalui turbin angin jenis horizontal secara teoritis 59,8 W. Secara aktual turbin ini memiliki daya rata-rata 20,9 W. Perbedaan ini terjadi disebabkan oleh faktor efisiensi sebesar 35%. Potensi energi angin Desa Wisata Tanjung Rejo sangat menjanjikan untuk pengembangan. Upaya ini tidak hanya akan meningkatkan kemandirian energi desa tersebut, tetapi juga mengurangi emisi karbon dan melestarikan lingkungan

Kata Kunci: Daya, Energi terbarukan, Energi angin, Turbin angin sumbu horizontal.

Abstract

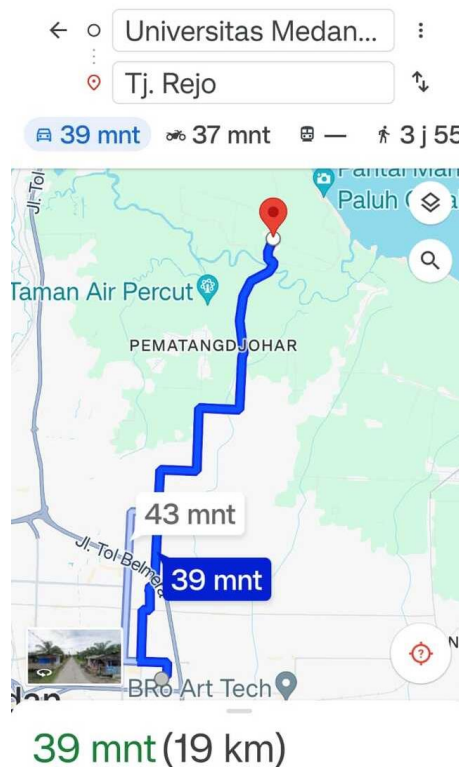
The tridharma of higher education is the main task and function for every lecturer that must be carried out every semester. One of the activities of the tridharma of higher education is community service which aims to make a scientific contribution owned by each lecturer. On this occasion, the UMA mechanical engineering study program had the opportunity to carry it out in Tanjung Rejo village, Percut Sei District. The master who owns the mangrove forest tourist attraction. The tourist attraction is located on the coast of the Strait of Malacca, where geographically it has the potential for renewable energy, namely wind energy. Based on the measurement data, the average wind speed was obtained 2 m/s. From the potential power that can be generated through a horizontal type wind turbine theoretically 59.8 W. Actually, this turbine has an average power of 20.9 W. This difference occurs due to an efficiency factor of 35%. The potential of wind energy in Tanjung Rejo Tourism Village is very promising for development. This effort will not only increase the energy independence of the village, but also reduce carbon emissions and preserve the environment.

Keywords: Horizontal axis wind turbine, Power, Renewable energy, Wind energy.

1. Pendahuluan

Pengabdian kepada Masyarakat (PkM) merupakan salah satu dari tiga misi pendidikan tinggi yang bertujuan untuk memberikan manfaat nyata bagi lingkungan sekitar. Salah satunya saat terlibat di Desa Wisata Mangrove Tanjung Rejo, Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang Sumatra Utara. Secara geografis, Desa Tanjung Rejo terletak di sebelah Utara Kampus Universitas Area dan berjarak 19 km (Gambar 1). Desa Tanjung Rejo merupakan salah satu desa yang memiliki objek wisata mangrove, dengan pantai yang terletak di pesisir Selat Malaka. Karena letaknya di pesisir pantai, Desa Tanjung Rejo memiliki kawasan hutan mangrove, selain hutan mangrove, desa ini memiliki potensi energi terbarukan, yaitu energi matahari energi, energi gelombang laut, energi angin dan lain-lain (Ghassemi et al., n.d.; International Energy Agency 2022; Dinçer 2022).

Sumber - sumber energi terbarukan tersebut belum satupun yang dieksplorasi potensinya untuk dimanfaatkan sebagai salah satu penyedia energi khususnya energi listrik. Dalam kesempatan ini, Program Studi Teknik Mesin (PSTM) Fakultas Teknik Universitas Medan Area, berkunjung dan melaksanakan PkM, untuk meninjau potensi energi angin untuk menggerakkan turbin angin sumbu horizontal, di mana salah satu variabel yang diamati dalam laporan ini adalah pengukuran kecepatan angin (Rahman et al. 2023). Pemilihan Turbin Angin jenis horizontal, didasarkan pada faktor ketersediaan alat ukur yang dimiliki oleh PSTM dan kemudahan serta kesederhanaan dalam proses pembuatannya.



Gambar 1. Letak grafis Desa Tanjung Rejo Kecamatan Percut Sei. Tuan

Pengukuran kecepatan angin dilakukan untuk mengevaluasi potensi energi angin yang dapat digunakan (Ligeza 2023). Kecepatan angin juga merupakan parameter kunci dalam penelitian energi terbarukan, terutama energi angin (Predin et al. 2023). Menurut Predin et al., dalam jurnal Renewable Energy, kecepatan angin diukur dalam meter per detik (m/s) dan merupakan salah satu faktor penentu dalam memperkirakan potensi daya yang akan dihasilkan oleh turbin angin (Predin et al. 2023). Ini mengikuti hukum kuadrat kecepatan angin, yaitu daya angin berbanding lurus dengan kecepatan angin.

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

$$A = \pi r^2 \quad (2)$$

Salah satu kabupaten tersebut memiliki luas ekosistem mangrove yang dimiliki bersama di desa wisata Tanjung Rejo, Percut Sei Tuan. Selain berfungsi sebagai penghalang erosi, ia menyediakan habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna. Lingkungan yang luar biasa sangat bergantung pada sumber daya alam yang dihasilkan dari masyarakat setempat itu sendiri, dengan penggunaan sumber energi terbarukan seperti angin.

Pengukuran kecepatan angin yang dilakukan untuk desa ini diperoleh dengan menggunakan anemometer di ketinggian untuk mendapatkan data yang akurat. Hasilnya, dikumpulkan dan dibandingkan antara daya teoritis dan daya nyata yang dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada grafik di bawah ini.

Daya Teoretis Versus Aktual Grafik yang disediakan di bawah ini menunjukkan Perbandingan daya teoritis yang dihitung dan daya aktual terhadap kecepatan angin yang berbeda. Daya teoritis dihitung menggunakan rumus dasar fisika, sedangkan daya sebenarnya diperoleh dari pengukuran langsung di lokasi dari turbin angin. Hasil yang diperoleh adalah bahwa daya aktual lebih rendah dibandingkan dengan daya teoritis dalam semua kasus, sehingga membuktikan adanya beberapa faktor penghambat baik sebagai efisiensi turbin yang kurang optimal atau kondisi yang tidak ideal untuk operasi lingkungan (Totokoja et al. 2023).

Tujuan utama dari kegiatan pengabdian masyarakat ini adalah untuk meningkatkan kapasitas dan kemampuan masyarakat setempat dalam memanfaatkan potensi energi terbarukan, khususnya energi angin horizontal. Selain itu, kegiatan ini bertujuan untuk memberikan pendidikan dan pelatihan tentang pentingnya pelestarian lingkungan dan pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Tujuan utama laporan ini juga untuk menilai kecepatan angin di Desa Wisata Mangrove Tanjung Rejo, Percut Sei. Tuan Deli Serdang Sumatera Utara. Laporan ini menggunakan metode pengamatan eksperimental untuk mengumpulkan dan menganalisis data kecepatan angin. Pendekatan ini sangat penting untuk memahami potensi pembangkit energi angin dengan jenis tubin angin horizontal di daerah tersebut.

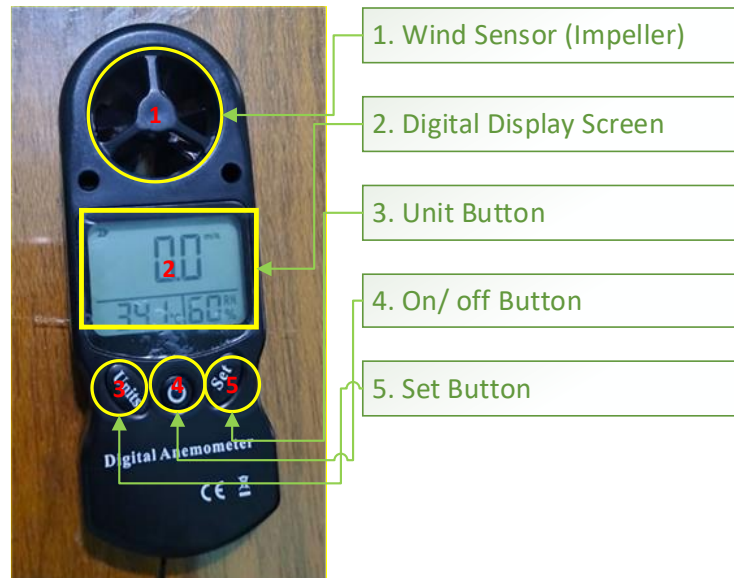
2. Metodologi

Pengukuran data sampel yang menarik dalam laporan ini adalah kecepatan angin di Desa Wisata Mangrove (<https://maps.app.goo.gl/f2CywmFL1C7HMB9C7>). Sebanyak 17 sampel pengukuran kecepatan angin diambil untuk memastikan representasi komprehensif dari kondisi angin di daerah tersebut. Sampel ini memberikan titik data penting untuk mengevaluasi kemampuan pembangkit listrik tenaga angin teoretis dan aktual. Pengukuran kecepatan angin dilakukan dengan menggunakan anemometer (Gambar 2), instrumen yang tepat dan andal untuk tujuan ini. Anemometer diposisikan pada ketinggian tertentu untuk menangkap data kecepatan angin yang akurat di berbagai tingkatan. Instrumen ini sangat dihormati di bidang studi energi terbarukan karena akurasi dan konsistensinya.

Proses pengumpulan data direncanakan dan dilaksanakan dengan cermat untuk memastikan keandalan dan validitas hasil. Pengukuran dilakukan secara berulang dengan waktu yang berbeda untuk menangkap variasi kecepatan angin. Anemometer dikalibrasi sebelum setiap sesi pengukuran untuk menjaga akurasi. Data yang terkumpul kemudian dicatat dan diatur untuk analisis lebih lanjut. Data kecepatan angin yang dikumpulkan dianalisis untuk membandingkan tenaga angin teoritis dengan pengukuran daya aktual. Daya teoritis dihitung menggunakan

rumus fisika yang ditetapkan pada Persamaan 1, sedangkan daya aktual diukur langsung dari turbin angin di lokasi.

Metode statistik digunakan untuk menganalisis data dan mengidentifikasi perbedaan antara output daya teoritis dan aktual.



Gambar 2. Alat ukur kecepatan angin (anemometer)

Tabel 1. Spesifikasi teknis: Anemometer Model S/N 202111890

<i>Instrument named</i>	<i>Instrument designed</i>
a. Wind Speed Measurement	
Range	0.1 to 40 m/s (meters per second)
Accuracy	± 0.1 m/s or $\pm 2\%$ of reading (whichever is greater)
Resolution	0.01 m/s
Threshold	0.1 m/s
Response	Time: Less than 1 second
Measurement Principle	Cup anemometer / ultrasonic (specify if applicable)
b. Wind Direction Measurement	
Range	0 to 360 degrees
Accuracy	± 2 degrees
Resolution	1 degree
Threshold	0.1 m/s wind speed required for direction detection
c. Environmental Conditions	
Operating Temperature	-40°C to $+60^{\circ}\text{C}$
Humidity	0% to 100% RH (condensing)
Protection Class	IP65 (dust-tight and protected against water jets)
d. Power Requirements	
Power Supply	5V to 24V DC
Power Consumption	Less than 2 watts

Semua prosedur yang dilakukan dalam laporan ini mematuhi pedoman dan standar etika. Laporan ini dirancang untuk meminimalkan dampak potensial terhadap lingkungan dan masyarakat setempat. Persetujuan diperoleh dari otoritas dan pemangku kepentingan terkait sebelum memulai proses pengumpulan data. Penting untuk dicatat keterbatasan laporan ini. Ukuran sampel, meskipun representatif, mungkin tidak menangkap semua kemungkinan variasi kecepatan angin dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain itu, faktor eksternal seperti kondisi

cuaca dan efisiensi turbin dapat memengaruhi hasil. Studi di masa depan harus mempertimbangkan faktor-faktor ini untuk meningkatkan akurasi dan penerapan temuan.

Sebagai kesimpulan, bagian metodologi ini menguraikan pendekatan ketat yang diambil untuk mengukur dan menganalisis kecepatan angin di Desa Wisata Mangrove Tanjung Rejo. Penggunaan pengamatan eksperimental, ditambah dengan instrumen pengukuran yang tepat dan analisis data menyeluruh, memberikan dasar yang kuat untuk mengevaluasi potensi energi angin di daerah tersebut.

3. Hasil dan Diskusi

Desa Wisata Mangrove Tanjung Rejo yang terletak di Kecamatan Percut Sei Tuan, terkenal dengan ekosistem mangrovenya yang luas dan beragam. Ekosistem ini tidak hanya penting untuk menjaga keseimbangan lingkungan, tetapi juga memiliki potensi yang signifikan dalam mendukung perekonomian lokal melalui pariwisata dan sumber daya alam. Namun, pemanfaatan potensi ini seringkali terhambat oleh kurangnya pengetahuan dan teknologi yang memadai di kalangan masyarakat setempat.

Pengabdian masyarakat dilakukan dalam beberapa tahapan yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk dosen, mahasiswa, dan warga desa. Salah satu fokus utamanya adalah mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer untuk mengevaluasi potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan di desa ini. Pada foto terlampir, ditunjukkan pada Gambar 3, kerja sama yang erat antara staf pengajar tetap Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area dengan Kepala Desa dan warga setempat terbukti. Hal ini menunjukkan sinergi yang kuat dalam menjalankan program pengabdian masyarakat ini. Selain itu, diskusi dan sesi pelatihan yang dilakukan telah memberikan wawasan baru kepada masyarakat tentang teknologi energi terbarukan. Pengabdian kepada masyarakat merupakan salah satu pilar mendasar pendidikan tinggi, yang bertujuan untuk memberikan kontribusi nyata bagi pembangunan masyarakat dan lingkungan. Kegiatan pengabdian masyarakat yang dilaksanakan di Desa Wisata Mangrove Tanjung Rejo oleh staf pengajar tetap Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area bekerja sama dengan Kepala Desa dan warga setempat ini mencontohkan upaya nyata untuk mewujudkan pilar tersebut.



Gambar 3. Foto bersama Kepala Desa di objek Wisata Hutan Mangrove Desa Tanjung Rejo dan Masyarakat setempat dalam kegiatan PkM

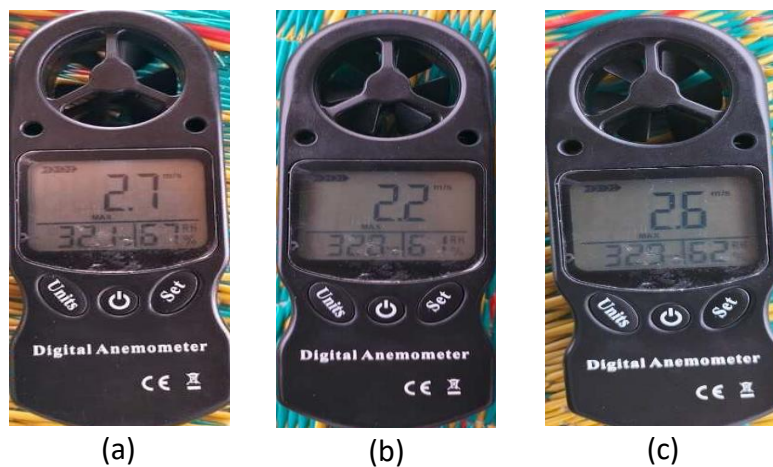
Salah satu kemampuan pembaruan ramah lingkungan yang terlihat sedang meningkat dalam pengembangan adalah energi angin. Potensi angin yang cukup besar ditemukan di Desa Wisata Tanjung Rejo, Kecamatan Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara.

Pengukuran kecepatan angin telah dilakukan di desa ini memproyeksikan potensi yang dapat dieksploitasi menjadi energi angin.

Pengukuran dilakukan dengan mencatat kecepatan angin di beberapa titik di Desa Tanjung Rejo. Kecepatan angin yang tercatat kemudian digunakan untuk menghitung daya teoritis dan daya aktual yang dihasilkan. Grafik "Daya Teoritis versus Daya Aktual" di atas menggambarkan perbandingan antara daya teoritis dan daya aktual pada berbagai kecepatan angin yang diukur.

3.1. Hasil

Hasil kegiatan ini menunjukkan bahwa Desa Wisata Mangrove Tanjung Rejo memiliki potensi yang cukup besar untuk pengembangan energi angin. Gambar 4 dan Tabel 2 merupakan hasil sampel pengukuran dengan menggunakan anemometer. Berdasarkan kecepatan angin diperoleh daya teoritis menggunakan persamaan (1) untuk mendapatkan daya actual dan daya teoritis.



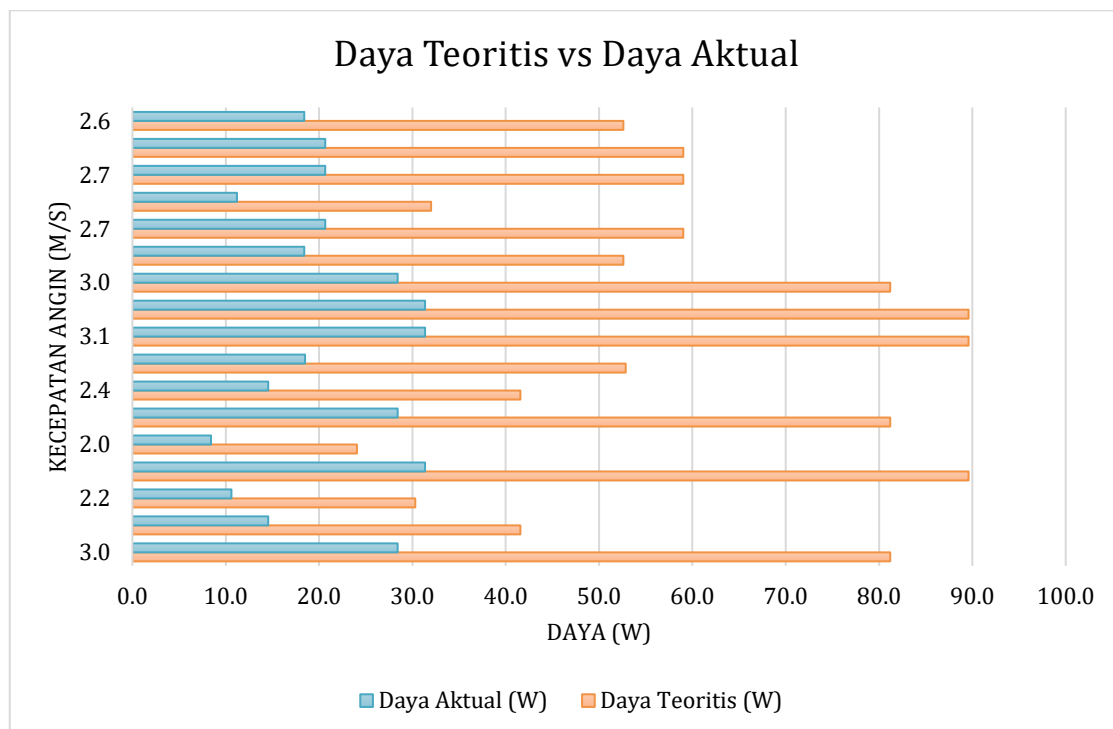
Gambar 4. Hasil sampel pengukuran kecepatan angin

Tabel 2. Hasil sampel pengukuran kecepatan angin

Kecepatan angin(m/s)	Daya Teoritis (W)	Daya Aktual (W)
3.0	81.2	28.4
2.4	41.6	14.6
2.2	30.3	10.6
3.1	89.6	31.4
2.0	24.1	8.4
3.0	81.2	28.4
2.4	41.6	14.6
2.6	52.9	18.5
3.1	89.6	31.4
3.1	89.6	31.4
3.0	81.2	28.4
2.6	52.6	18.4
2.7	59.0	20.7
2.2	32.0	11.2
2.7	59.0	20.7
2.7	59.0	20.7
2.6	52.6	18.4

Pengukuran yang dilakukan menggunakan anemometer mengungkapkan kecepatan angin yang cukup untuk mengoperasikan turbin angin skala kecil. Temuan ini menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dan perencanaan pemasangan turbin angin horizontal di desa. Selain hasil teknis, pengabdian masyarakat ini juga berhasil meningkatkan kesadaran warga tentang pentingnya energi terbarukan dan pelestarian lingkungan. Melalui pelatihan dan diskusi, masyarakat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana memanfaatkan sumber daya alam secara bijak dan berkelanjutan. Dengan demikian, pengabdian kepada masyarakat ini tidak hanya memberikan manfaat jangka pendek berupa pengetahuan dan keterampilan baru bagi masyarakat, tetapi juga membuka peluang pembangunan berkelanjutan yang dapat memberikan dampak positif jangka panjang.

Trend daya teoritis berbanding dengan daya actual dapat dilihat pada Gambar 5, Dimana garis merah merupakan daya teoritis dan garis biru merupakan daya actual yang merupakan daya terbangkit pada turbin angin jenis horizontal.



Gambar 5. Komparasi daya teoritis dan daya aktual pada pembangkit energi angin horizontal

Kegiatan pengabdian masyarakat di Desa Wisata Mangrove Tanjung Rejo menandai langkah awal yang penting dalam upaya pengembangan potensi energi terbarukan dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Kolaborasi antara akademisi dan warga setempat membuahkan hasil yang positif, baik secara teknis maupun pendidikan. Diharapkan hasil dari kegiatan ini dapat menjadi model pengabdian masyarakat serupa di daerah lain dan mendorong implementasi teknologi energi terbarukan yang lebih luas di Indonesia.

3.2. Diskusi

3.2.1. Hasil pengukuran kecepatan angin

Pengukuran kecepatan angin di Desa Wisata Tanjung Rejo, Kecamatan Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara, memiliki kesenjangan yang sangat besar terkait kecepatan angin. Seperti yang ditunjukkan di bawah ini pada grafik berjudul "Daya Teoritis vs Daya Aktual", kecepatan angin yang diukur berada dalam kisaran 2,0 m/s hingga 3,0 m/s. Setelah itu, pemrosesan lebih lanjut pada data dilakukan untuk mendapatkan daya teoritis dan daya aktual untuk setiap kecepatan angin yang diukur.

Grafik dari dua variabel utama dalam percobaan adalah di bawah ini: Daya teoritis dalam Watt dan daya aktual dalam Watt yang dihasilkan terhadap kecepatan angin yang berbeda. Seseorang bisa memperoleh teoritis dengan persamaan (1). Hasil pengukuran diperoleh peningkatan daya teoritis karena peningkatan kecepatan angin. Namun, sebagai perbandingan, daya aktual yang dihasilkan sangat berbeda dari kekuatan teoretisnya. Oleh karena itu, mengingat jurang kesenjangan yang besar ini, tidak ada efektivitas energi yang optimal dalam konversi. Pembahasan bagaimana daya teoritis berbeda dari kekuatan actual sebagai berikut:

1. Efisiensi dalam turbin angin

Alasan utama variasi daya teoritis ke daya aktual adalah karena efisiensi turbin angin. Semua energi kinetik yang dimiliki angin tidak mudah diubah menjadi energi listrik karena faktor teknis dan desain yang mempengaruhi kinerja turbin (Safa, Ezziyyani, and Cherrat 2024).

2. Kehilangan energi mekanik

Karena ada gesekan pada bagian mekanis, turbulensi udara, dan banyak faktor yang menghambat aliran energi, hilangnya energi mekanik tidak dapat dihindari selama proses konversi energi angin menjadi energi Listrik.

3. Variabilitas kecepatan angin

Aspek lain yang sangat penting adalah variabilitas kecepatan angin, yang memang berpengaruh pada keluaran energi dari sumber ini. Turbin tidak dapat bekerja dalam kondisi optimal sementara angin di lokasi berfluktuasi sehingga menurunkan tingkat produksi aktual lebih rendah dari yang diperkirakan secara teoritis.

4. Kondisi sekitar

Kondisi iklim seperti fluktuasi suhu, tekanan udara, dan kelembaban juga memengaruhi kepadatan udara, yang pada akhirnya memengaruhi produksi tenaga angin.

3.2.2. Tren potensi energi angin

Demonstrasi konstruktif pengembangan energi angin yang bermakna potensi besar di Desa Tanjung Rejo. Kekuatan teoritis mungkin kontras dengan yang sebenarnya, tetapi kecepatan angin yang stabil lebih dari 2,0 m/s menunjukkan bahwa area ini mengandung sumber daya energi angin yang dapat dimanfaatkan secara optimal. Beberapa strategi dapat digunakan untuk memaksimalkan potensi tersebut:

1. Pilihan turbin yang benar

Turbin angin yang sesuai dengan kisaran kecepatan angin yang diukur di sini akan meningkatkan efisiensi konversi energi lebih baik daripada yang lain (Gavgani et al. 2022; Shoaib et al. 2019; Saulescu et al. 2021).

2. Pemasangan di lokasi strategis

Banyak energi yang dapat diperoleh dari memasang turbin angin di tempat-tempat dengan kecepatan angin maksimum dan fluktuasi yang lebih sedikit di dalamnya (Saulescu et al. 2021; C. P. Chioncel, Spunei, and Tirian 2024; Tang et al. 2024; C.-P. Chioncel, Spunei, and Tirian 2023).

3. Pemeliharaan dan aftercare

Pemeliharaan rutin pada turbin agar tetap pada tingkat operasi yang optimal, sehingga mengurangi kehilangan energi (C.-P. Chioncel, Spunei, and Tirian 2023; EDDOUH et al. 2024; Singh, Saraygord Afshari, and Liang 2023; Vusmuzi Mashego and Laseinde 2023).

4. Mengadopsi teknologi canggih

Memasang turbin angin teknologi baru dengan efisiensi yang lebih tinggi dan mampu beroperasi dalam kondisi lingkungan yang berbeda (Douvi and Douvi 2023; Ozturkoglu, Ozcelik, and Günel 2024; Cali et al. 2022; Razi, Mehreganian, and Soleiman Fallah 2024).

4. Kesimpulan

Potensi energi angin Desa Wisata Tanjung Rejo sangat menjanjikan untuk pengembangan. Dilengkapi dengan strategi yang relevan kunci pemilihan turbin angin yang sesuai, lokasi pemasangan yang optimal, pemeliharaan rutin ada potensi besar untuk memiliki energi angin sebagai sumber energi terbarukan yang berkelanjutan di sini, yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Upaya ini tidak hanya akan meningkatkan kemandirian energi desa tersebut, tetapi juga mengurangi emisi karbon dan melestarikan lingkungan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Yayasan Haji Agus Salim dan Kepala Desa Tanjung Rejo beserta jajarannya atas dukungan dan kontribusinya dalam kegiatan ini. Ucapan terima kasih yang tulus juga disampaikan kepada seluruh sponsor yang telah memberikan bantuan dan dukungan finansial, serta kepada semua pihak yang terlibat dalam kegiatan Pengabdian Kepada Masyarakat ini. Partisipasi dan kerja keras semua pihak yang terlibat, kecuali penulis, telah memungkinkan terlaksananya kegiatan ini dengan sukses.

Daftar Pustaka

- Cali, Michele, Giorgio Cacopardo, Giuliana Baiamonte, Giuseppe Laudani, and Rita Ambu. 2022. "Efficiency Optimization in Medium Power Wind Turbines: An Innovative Mechanical Pitch Control System." *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)* 15 (6): 367. <https://doi.org/10.15866/iremos.v15i6.23237>.
- Chioncel, Cristian Paul, Elisabeta Spunei, and Gelu-Ovidiu Tirian. 2024. "Visualizing the Maximum Energy Zone of Wind Turbines Operating at Time-Varying Wind Speeds." *Sustainability* 16 (7): 2659. <https://doi.org/10.3390/su16072659>.
- Chioncel, Cristian-Paul, Elisabeta Spunei, and Ovidiu-Gelu Tirian. 2023. "Optimizing Energy Production for Wind Turbines Operating in Variable Wind Speed Conditions." In *2023 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN59038.2023.10290143>.
- Dinçer, İbrahim. 2022. "Renewable Energy Resources." In *Energy: Concepts and Applications*, 185–286. Turkish Academy of Sciences. <https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-00-9.ch04>.
- Douvi, Eleni, and Dimitra Douvi. 2023. "Aerodynamic Characteristics of Wind Turbines Operating under Hazard Environmental Conditions: A Review." *Energies* 16 (22): 7681. <https://doi.org/10.3390/en16227681>.
- EDDOUH, Yassine, Abdelmajid DAYA, Rabie EL OTMANI, and Abdelhamid TOUACHE. 2024. "Maximizing Wind Turbine Efficiency: Monte Carlo Simulation Based on Cost and Energy Loss Analysis for Optimal Preventive Maintenance." *Management and Production Engineering Review*, March. <https://doi.org/10.24425/mper.2024.149994>.
- Gavvani, Babak Mehdizadeh, Arash Farnam, Jeroen D. M. De Kooning, and Guillaume Crevecoeur. 2022. "Efficiency Enhancements of Wind Energy Conversion Systems Using Soft Switching Multiple Model Predictive Control." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 37 (2): 1187–99. <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3119722>.

- Ghassemi, Abbas, Bikash Pandey, Ajoy Karki, David R Boden, Vaughn Nelson, and Kenneth Starcher. n.d. "HYDROELECTRIC ENERGY Renewable Energy and the Environment ENERGY AND THE ENVIRONMENT SERIES EDITOR Hydroelectric Energy: Renewable Energy and the Environment Introduction to Renewable Energy, Second Edition." www.TechnicalBooksPdf.com.
- International Energy Agency, IEA. 2022. "Renewables 2022 Analysis and Forecast to 2027." www.iea.org.
- Ligeza, Paweł, ed. 2023. *Advances in Wind Energy and Wind Turbines*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-7307-6>.
- Ozturkoglu, Onur, Ozgur Ozcelik, and Serkan Günel. 2024. "Effects of Operational and Environmental Conditions on Estimated Dynamic Characteristics of a Large In-Service Wind Turbine." *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, June. <https://doi.org/10.1007/s42417-024-01447-4>.
- Predin, Andrej, Matej Fike, Marko Pezdevšek, and Gorazd Hren. 2023. "Alternative Wind Energy Turbines." In *Wind and Solar Energy Applications*, 323–32. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003321897-24>.
- Rahman, Fathur, Ika Nurjannah, Handini Novita Sari, Alexander Christian, and Muhammad Khoirul Hidayat. 2023. "OPTIMALISASI METODE BLADE TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL." *Otopro*, May, 59–64. <https://doi.org/10.26740/otopro.v18n2.p59-64>.
- Razi, Shayan, Navid Mehreganian, and Arash Soleiman Fallah. 2024. "Multiphysics of Wind Turbines in Extreme Loading Conditions." In *Multiphysics of Wind Turbines in Extreme Loading Conditions*, 33–64. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91852-7.00003-9>.
- Safa, Nadine, Mostafa Ezziyyani, and Loubna Cherrat. 2024. "Efficiency of Wind Turbines for Power Energy Generation Towards Forecasting Weather." In , 244–52. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54288-6_23.
- Saulescu, Radu, Mircea Neagoe, Codruta Jaliu, and Olimpiu Munteanu. 2021. "A Comparative Performance Analysis of Counter-Rotating Dual-Rotor Wind Turbines with Speed-Adding Increasers." *Energies* 14 (9): 2594. <https://doi.org/10.3390/en14092594>.
- Shoaib, Muhammad, Imran Siddiqui, Shafiqur Rehman, Shamim Khan, and Luai M. Alhems. 2019. "Assessment of Wind Energy Potential Using Wind Energy Conversion System." *Journal of Cleaner Production* 216 (April):346–60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.128>.
- Singh, Ekamdeep, Sajad Saraygord Afshari, and Xihui Liang. 2023. "Wind Turbine Optimal Preventive Maintenance Scheduling Using Fibonacci Search and Genetic Algorithm." *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*, April. <https://doi.org/10.37965/jdmd.2023.158>.
- Tang, Minan, Wenjuan Wang, Xiaofei Zhen, Bo An, Yaqi Zhang, and Yaguang Yan. 2024. "Robust Control of Wind Turbines to Reduce Wind Power Fluctuation." *Energy Science & Engineering* 12 (5): 1818–34. <https://doi.org/10.1002/ese3.1680>.
- Totokoja, Joweria, Samson Rwahwire (PhD), Joseph Lwanyaga Ddumba (PhD), Ayub Nabende, and Moses Nagulama. 2023. "Optimization Of The Vertical Axis Wind Turbine For Localization In Low Wind Speed Areas." *International Journal of Progressive Sciences and Technologies* 38 (1): 566. <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v38.1.5271>.
- Vusmuzi Mashego, Steven, and Timothy Laseinde. 2023. "Optimization of Turbine Generator through Vibration Damping for Maximum Service Life in Power Plants." In . <https://doi.org/10.54941/ahfe1003783>.