



Al Jazari Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Journal homepage:
<https://ojs.uniska-bjm.ac.id/index.php/IJR/index>
p-ISSN 2502-4922, e-ISSN 2615-0867



Analisis Potensi Energi Angin dan Kinerja Aerodinamika Turbin Angin Sumbu Horizontal (HAWT) Skala Mikro Berbasis Airfoil NACA 4412 di Wilayah Pesisir Perkotaan

Mukhtar Sinaga

Teknik Mesin, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta
mukhtar.sinaga@uta45jakarta.ac.id

Info Artikel

Riwayat Artikel:
Diterima: 23 Februari 2026
Diterima dalam bentuk revisi: 29 April 2026
Diteima/publis: 7 Mei 2026

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi angin sebagai dasar pengembangan Turbin Angin Sumbu Horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine/HAWT) skala mikro pada wilayah dengan karakteristik angin rendah. Data kecepatan angin diperoleh melalui pengukuran lapangan yang menunjukkan kisaran kecepatan antara 3–8 m/s dengan nilai rata-rata sekitar 5,4 m/s. Analisis potensi energi dilakukan menggunakan pendekatan statistik kecepatan angin dan perhitungan densitas daya angin untuk menentukan kelayakan pemanfaatan energi angin pada skala kecil. Hasil analisis menunjukkan bahwa densitas daya angin berada pada kisaran 45–110 W/m² pada kondisi angin rendah hingga sedang. Berdasarkan potensi tersebut, estimasi daya teoritis yang dapat dihasilkan oleh turbin angin skala mikro dengan diameter rotor sekitar 1,5 m berada pada rentang 80–150 W pada kecepatan angin rata-rata. Evaluasi parameter aerodinamika menunjukkan bahwa konfigurasi turbin yang dirancang mampu mencapai nilai koefisien daya (C_p) dalam kisaran 0,34–0,37, yang menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi pada kondisi angin rendah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa potensi energi angin pada lokasi studi cukup memadai untuk pengembangan sistem turbin angin HAWT skala mikro sebagai sumber energi terbarukan alternatif di daerah dengan karakteristik angin rendah hingga menengah.

Kata Kunci

Turbin Angin HAWT; Optimasi Aerodinamika; Computer Aided Design (CAD); Rasio Kecepatan Sudut (TSR)

Abstract

This study aims to analyze wind energy potential as a basis for the development of a micro-scale Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) in areas characterized by low wind speeds. Wind speed data were obtained through field measurements showing a range of 3–8 m/s with an average wind speed of approximately 5.4 m/s. The wind energy potential was evaluated using statistical analysis of wind speed and wind power density calculations to determine the feasibility of small-scale wind energy utilization. The results indicate that the wind power density ranges from approximately 45 to 110 W/m² under low to moderate wind conditions. Based on this potential, the theoretical power output of a micro-scale wind turbine with a rotor diameter of about 1.5 m is estimated to be between 80 and 150 W at moderate wind speeds. Aerodynamic performance evaluation shows that the proposed turbine configuration can achieve a power coefficient (C_p) in the range of 0.34–0.37, indicating improved energy conversion efficiency under low wind speed conditions. The findings suggest that the wind energy potential at the study site is adequate to support the development of micro-scale HAWT systems as an alternative renewable energy source in regions with low to moderate wind characteristics.

<http://dx.doi.org/10.31602/al-jazari.v11i1.22833>



@UNISKA 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

Jurnal Al Jazari is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

PENDAHULUAN

Dengan meningkatnya permintaan energi global dan kesadaran akan pentingnya transisi ke sumber energi

yang lebih bersih dan berkelanjutan, pengembangan energi terbarukan menjadi tak terhindarkan. Energi angin, sebagai salah satu bentuk energi terbarukan yang

paling banyak digunakan, memiliki potensi yang sangat besar (Ir Andi Saidah & Muktar Sinaga, 2023). Di Indonesia, potensi energi angin diperkirakan melebihi 150 GW, menjadikannya salah satu negara dengan potensi energi angin terbesar di dunia (Council, 2020). Namun, terlepas dari potensi yang luar biasa ini, pengembangan energi angin di Indonesia masih sangat terbatas dan kurang dimanfaatkan. Beberapa tantangan termasuk kecepatan angin yang rendah di sebagian besar wilayah Indonesia, khususnya di daerah perkotaan.

Kecepatan angin yang dibutuhkan untuk pengoperasian turbin angin yang efisien umumnya berada dalam kisaran 6 m/s ke atas, sementara sebagian besar daerah perkotaan di Indonesia, termasuk Jakarta, mengalami kecepatan angin yang lebih rendah, berkisar antara 1,3 hingga 6,3 m/s (Rahman et al., 2022). Hal ini membuat implementasi turbin angin skala besar kurang ekonomis, kecuali jika dilakukan optimasi desain yang lebih tepat. Oleh karena itu, pengembangan turbin angin skala kecil dengan desain yang lebih adaptif terhadap kondisi lokal sangat penting, terutama untuk daerah perkotaan yang mengalami fluktuasi aliran angin dan turbulensi tinggi karena keberadaan gedung-gedung tinggi. Daerah pesisir Jakarta Utara, khususnya Pademangan Timur, merupakan contoh daerah perkotaan dengan potensi energi angin yang belum dimanfaatkan (Dida et al., 2016). Karakteristik geografis daerah pesisir ini memberikan keuntungan dalam hal kecepatan angin, tetapi fluktuasi kecepatan angin yang sering terjadi dan adanya hambatan dari gedung-gedung tinggi menyebabkan banyak turbin angin beroperasi secara tidak efisien. Selain itu, ruang terbuka untuk pemasangan turbin angin juga terbatas, yang semakin memperburuk kesulitan dalam pengembangannya.

Dalam konteks ini, desain turbin angin berdasarkan teknologi modern, seperti Computer Aided Design (CAD), dapat menjadi solusi untuk mendesain turbin angin yang sesuai dengan kondisi lokal di daerah perkotaan. Dengan menggunakan CAD, desain turbin dapat dilakukan dengan lebih tepat, memungkinkan analisis geometri bilah, sudut kemiringan bilah, dan evaluasi kinerja turbin sebelum konstruksi fisik. Teknologi CAD juga memungkinkan simulasi aliran udara dan aerodinamika turbin, yang sangat berguna dalam mengoptimalkan desain turbin angin agar berkinerja baik pada kecepatan angin rendah dan kondisi turbulen (Van Grieken & Dower, 2023).

Sebagai contoh, CAD telah terbukti efektif dalam desain turbin sumbu horizontal (HAWT), yang memiliki potensi tinggi untuk mengubah energi angin menjadi listrik. HAWT adalah jenis turbin yang paling banyak digunakan di seluruh dunia karena kemampuannya mencapai efisiensi tinggi, terutama di lokasi dengan kecepatan angin yang stabil (Johari et al., 2018). Namun, di daerah perkotaan dengan kecepatan angin rendah dan bergejolak, HAWT membutuhkan pendekatan desain

yang lebih fleksibel dan adaptif agar dapat berfungsi secara optimal (Adams et al., 2011).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi angin di wilayah Pademangan Timur, Jakarta Utara, dan mendesain turbin angin skala mikro berbasis CAD yang disesuaikan dengan kondisi angin lokal. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh desain turbin angin yang efisien dan efektif, serta memberikan solusi yang lebih realistis untuk pengembangan energi angin di daerah perkotaan pesisir. Penggunaan teknologi CAD dalam desain turbin angin skala kecil ini diharapkan tidak hanya meningkatkan efisiensi turbin dalam mengkonversi energi angin, tetapi juga memperluas penggunaan energi terbarukan di daerah perkotaan, yang selama ini kurang mendapat perhatian dalam pengembangan energi angin di Indonesia (Sinaga et al., 2024).

Sejalan dengan hal tersebut, pengembangan turbin angin dengan desain yang lebih adaptif terhadap kondisi lokal juga sangat penting untuk mempercepat transisi energi di daerah perkotaan, yang menghadapi tantangan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Potensi energi angin yang belum dimanfaatkan dapat menjadi alternatif energi bersih dan berkelanjutan, mendukung pengurangan emisi karbon dan berkontribusi pada pencapaian target pengurangan emisi nasional. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya relevan secara ilmiah tetapi juga memberikan kontribusi signifikan untuk mendukung kebijakan energi terbarukan di Indonesia (Fikako et al., 2023).

Prinsip-prinsip Dasar Energi Angin

Energi angin berasal dari energi kinetik yang terkandung dalam arus udara yang bergerak. Saat angin bergerak, ia membawa energi yang dapat dimanfaatkan untuk memutar rotor turbin angin, yang kemudian menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik, hukum konservasi massa dan energi digunakan dalam analisis aliran udara (Corke & Nelson, 2025).

Persamaan konservasi massa dalam aliran fluida, yang menggambarkan massa udara yang melewati area tetap, dapat ditulis sebagai (Manwell et al., 2010):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Di mana:

- ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3),
- $\mathbf{v}$ adalah kecepatan aliran udara (m/s),
- $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$ adalah divergensi aliran massa, yang menggambarkan laju perubahan massa dalam volume kontrol.

Persamaan ini memastikan bahwa massa udara yang masuk dan keluar dari volume kontrol tetap konstan (konservasi massa). Sementara itu, persamaan konservasi energi dengan asumsi steady flow untuk aliran fluida dapat ditulis sebagai:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} e + \mathbf{q}) = \rho \mathbf{v} \cdot \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \Phi \quad (1)$$

Sehingga menjadi:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} e) = \rho \vec{v} \cdot \nabla p \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho V v^2 \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 \quad (4)$$

Di mana:

- e adalah energi per satuan massa (J/kg),
- q adalah aliran energi termal (W/m²),
- p adalah tekanan (Pa),
- μ adalah viskositas dinamis
- Φ adalah hilangnya energi akibat gesekan internal.

Persamaan ini menggambarkan bagaimana energi (baik kinetik maupun termal) didistribusikan dan diubah dalam aliran angin yang mengenai turbin. Konservasi energi sangat penting untuk memahami sejauh mana energi angin dapat diubah menjadi energi mekanik melalui turbin angin.

Jenis-jenis Turbin Angin

Turbin angin dapat dibagi menjadi dua kategori utama berdasarkan sumbu rotasinya: turbin sumbu horizontal (HAWT) dan turbin sumbu vertikal (VAWT). Kedua jenis turbin ini memiliki karakteristik berbeda yang memengaruhi kinerja dan aplikasinya.

1. Turbin Sumbu Horizontal (HAWT): Memiliki rotor yang berputar pada sumbu horizontal. HAWT sangat efisien dalam mengubah energi angin yang datang dari satu arah dan sering digunakan di lokasi terbuka dengan kecepatan angin yang lebih stabil. HAWT sering beroperasi pada TSR (Tip Speed Ratio) antara 6 dan 8, yang berhubungan langsung dengan efisiensi konversi energi angin menjadi listrik (Manwell, McGowan, & Rogers, 2010).

2. Turbin Sumbu Vertikal (VAWT): Memiliki rotor yang berputar pada sumbu vertikal, yang memungkinkan turbin ini menangkap angin dari berbagai arah tanpa memerlukan sistem yaw. VAWT lebih cocok untuk lingkungan perkotaan dengan turbulensi tinggi dan angin yang berubah-ubah (Dialimulati et al., 2018).

Desain dan Optimasi Turbin Angin

Desain turbin angin melibatkan beberapa faktor teknis, seperti geometri bilah, rasio kecepatan ujung (TSR), serta material dan kekuatan struktural turbin. Salah satu elemen kunci dalam desain turbin angin adalah rasio kecepatan ujung (TSR), yaitu rasio kecepatan ujung bilah turbin terhadap kecepatan angin (Burton et al., 2011).

Rumus untuk Tip Speed Ratio (TSR) adalah:

$$TSR = \frac{\omega R}{v} \quad (5)$$

Di mana:

- ω adalah kecepatan sudut rotor (rad/s),
- R adalah panjang jari-jari rotor (m),
- v adalah kecepatan angin (m/s) (Manwell et al., 2010).

Turbin angin beroperasi paling efisien pada TSR tertentu, yang bergantung pada desain bilah turbin.

Turbin biasanya beroperasi pada TSR antara 6 dan 8 untuk turbin angin sumbu horizontal (HAWT), dan lebih rendah untuk turbin angin sumbu vertikal (VAWT).

Selain itu, profil bilah juga memainkan peran penting dalam optimasi desain. Profil aerodinamis seperti NACA 4412 sering digunakan untuk bilah turbin, karena memberikan keseimbangan yang baik antara gaya angkat dan gaya hambat. Modifikasi profil bilah, seperti penggunaan NACA 2412, dapat meningkatkan efisiensi dalam kondisi angin lemah, yang umum terjadi di daerah perkotaan (Hansen, 2008).

Desain Sudu Turbin Angin

Teknologi Computer-Aided Design (CAD) digunakan untuk mendesain turbin angin dengan presisi tinggi. CAD memungkinkan desain digital geometri bilah turbin dan pemodelan aliran udara di sekitar turbin menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD). Hal ini sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja turbin dengan memvisualisasikan desain bilah dan rotor serta menguji desain sebelum konstruksi fisik (Salisbury, Johnson, & McAllister, 2019).

Rumus untuk menghitung daya angin yang dipengaruhi oleh distribusi tekanan dan aliran udara adalah:

$$P = \int_A \frac{1}{2} \rho v^3 dA \quad (6)$$

Di mana:

- P adalah daya yang dihasilkan,
- ρ adalah kepadatan udara,
- v adalah kecepatan angin di titik tertentu,
- A adalah luas sapuan rotor (Hansen, 2020).

Simulasi CFD di CAD memungkinkan analisis distribusi tekanan dan aliran udara untuk berbagai desain bilah turbin. Hal ini membantu dalam memilih profil bilah yang memberikan C_p (koefisien daya) optimal. Simulasi ini sangat berguna dalam mengoptimalkan desain turbin, terutama untuk kondisi angin yang bervariasi dan turbulen, seperti yang ditemukan di daerah perkotaan (Ishugah et al., 2014).

Tip Speed Ratio (TSR)

Rasio Kecepatan Ujung (Tip Speed Ratio/TSR) adalah rasio kecepatan ujung bilah turbin (kecepatan linier di ujung rotor) terhadap kecepatan angin yang masuk. TSR digunakan untuk mengukur efisiensi operasional turbin angin. Nilai TSR yang optimal memastikan turbin berputar pada kecepatan yang tepat untuk menangkap energi angin secara efisien, baik dalam hal daya angkat maupun daya hambat (Hosseini et al., 2022).

$$TSR = \frac{\omega R}{v} \quad (7)$$

Di mana:

- ω adalah kecepatan sudut rotor (rad/s),
- R adalah panjang jari-jari rotor (m),

- v adalah kecepatan angin (m/s).

Fungsi dan Pengaruh TSR terhadap Kinerja Turbin Angin

1. Efisiensi Turbin: Nilai TSR optimal bervariasi tergantung pada jenis turbin angin (HAWT vs. VAWT). Turbin Angin Sumbu Horizontal (HAWT) biasanya beroperasi paling efisien pada TSR sekitar 6 hingga 8, sedangkan Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) beroperasi pada TSR yang lebih rendah, antara 2 dan 4 (Hosseini et al., 2025).

2. Kecepatan Rotor dan Kecepatan Angin: Kecepatan rotor harus disesuaikan dengan kecepatan angin agar turbin dapat beroperasi pada TSR optimal. Jika TSR terlalu rendah, turbin akan berputar terlalu lambat untuk menangkap energi angin maksimum, sedangkan TSR yang terlalu tinggi dapat menyebabkan peningkatan hambatan dan penurunan efisiensi (Hansen, 2020).

3. Kesesuaian dengan Kondisi Angin: Dalam kondisi angin yang lebih rendah, nilai TSR yang lebih rendah juga lebih efisien, karena turbin dengan TSR rendah lebih adaptif terhadap perubahan kecepatan angin yang berfluktuasi, terutama di daerah perkotaan atau daerah dengan turbulensi tinggi;

Optimasi TSR dalam Desain Turbin Angin

HAWT (Turbin Angin Sumbu Horizontal): Untuk mencapai efisiensi maksimum, HAWT beroperasi pada TSR antara 6 dan 8. Dalam kisaran ini, turbin memiliki keseimbangan yang baik antara gaya angkat dan gaya hambat, memaksimalkan konversi energi angin menjadi energi mekanik (Manwell, McGowan, & Rogers, 2010). Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT): Untuk turbin vertikal, nilai TSR yang lebih rendah lebih umum digunakan. Nilai TSR VAWT biasanya di bawah 4 karena dirancang untuk menangkap angin dari berbagai arah tanpa memerlukan sistem yaw (Bayron et al., 2024). VAWT lebih cocok untuk lingkungan perkotaan di mana angin cenderung lebih turbulen dan berubah arah.

Hubungan dengan C_p : Koefisien daya (C_p) adalah parameter yang menunjukkan efisiensi turbin dalam mengubah energi angin menjadi energi mekanik. Nilai C_p sangat bergantung pada TSR, dan setiap turbin memiliki nilai C_p optimal pada TSR tertentu (Henriksen et al., 2012). Misalnya, pada TSR = 6, C_p untuk HAWT biasanya berada dalam kisaran 0,4 hingga 0,45, yang menunjukkan efisiensi tinggi dalam kondisi angin stabil. Efisiensi dan Efek Hambatan: Ketika TSR terlalu tinggi, nilai C_p dapat menurun karena peningkatan hambatan pada bilah turbin, yang mengurangi efisiensi konversi energi angin. Oleh karena itu, pemilihan TSR yang tepat sangat penting dalam desain turbin angin untuk memastikan kinerja optimal (Yazıcı & Yaylacı, 2018).

Tabel 1. Rasio Kecepatan Ujung (TSR) dan Koefisien Daya (C_p)

TSR (λ)	C_p (Koefisien Daya)	Informasi	Sumber
0,94	0,242	Turbin angin sumbu vertikal (VAWT) 3 bilah, kecepatan angin rendah	Hasil eksperimen pada -turbin VAWT 3 bilah
0,88	0,228	VAWT 4 bilah	Hasil eksperimen pada -turbin angin sumbu vertikal 4 bilah
0,80	0,222	VAWT 6 bilah	Hasil eksperimen pada -turbin angin sumbu vertikal 6 bilah
0,45	~0,306	Optimal untuk desain Savonius/VAWT.	Ringkasan tinjauan kinerja turbin

Nilai C_p bervariasi tergantung pada jenis turbin (VAWT vs. SWT), konfigurasi bilah, dan kecepatan angin. Data di atas diperoleh dari studi eksperimental dan tinjauan kinerja turbin yang didokumentasikan dalam literatur ilmiah yang relevan (Rhakasywi, n.d.). TSR rendah (<1) merupakan karakteristik turbin sumbu vertikal /VAWT, yang umumnya digunakan dalam aplikasi kecepatan angin rendah. Nilai C_p relatif lebih rendah daripada turbin sumbu horizontal, tetapi tetap berguna untuk aplikasi mikro (Martínez-Márquez et al., 2019).

Tabel 2. Perbandingan TSR dan Koefisien Daya (C_p) untuk HAWT dan VAWT

TSR (λ)	C_p (Koefisien Daya)	Jenis Turbin	Tipe Turbin
6.00	0,42	HAWT	Kisaran optimal untuk turbin HAWT dalam kondisi angin stabil.
7.00	0,45	HAWT	Efisiensi maksimum pada kecepatan angin stabil dan desain aerodinamis.
1.00	0,22	VAWT	Pengurangan C_p pada turbin sumbu vertikal, biasanya untuk angin multiarah.
0,80	0,19	VAWT	Efisiensi lebih rendah dalam kondisi angin tidak stabil
0,90	0,20	Savonius VAWT	Turbin tipe Savonius dengan TSR rendah, digunakan untuk aplikasi mikro.

TSR tinggi (6-7) umumnya digunakan untuk HAWT, yang lebih efisien di lokasi dengan angin stabil dan dapat beroperasi lebih optimal dalam kondisi angin kencang

dan konstan. TSR rendah (0,2-1,0) lebih sering digunakan untuk VAWT, di mana turbin dapat menangkap angin dari berbagai arah, tetapi dengan efisiensi yang lebih rendah.

METODE PENELITIAN

Studi ini bertujuan untuk mendesain turbin angin HAWT 3 bilah skala mikro dengan TSR = 6 menggunakan Desain Berbantuan Komputer (CAD), tanpa melakukan simulasi aerodinamis lebih lanjut (seperti CFD).

Pengumpulan data

1. Data Kecepatan Angin: Data kecepatan angin diperoleh dari stasiun pengamatan cuaca dan sensor anemometer yang dipasang di lokasi penelitian. Kecepatan angin rata-rata di Pademangan Timur sekitar 6,47 m/s.

Tabel 3. Kecepatan Angin Maksimum

Bulan	Maksimum (m/s)	Rata-rata (m/s)
Januari	5.0	6.3
Februari	3.9	6.6
Berbaris	4.2	7.0
April	3.7	7.0
Mungkin	4.4	7.2
Juni	4.0	7.1
Juli	4.8	7.1
Agustus	4.3	8.5
September	4.6	7.5
Oktober	3.8	6.4
November	3.7	7.0
Desember	3.4	8.4



Gambar 1. Karakteristik kecepatan angin

2. Lokasi: Data lokasi seperti arah angin dominan, tinggi bangunan, dan topografi digunakan untuk menentukan kondisi aliran angin di area tersebut.

3. Spesifikasi Turbin:

Diameter rotor yang digunakan adalah 1,5 m dengan 3 bilah, kecepatan angin rata-rata yang dipertimbangkan adalah 6,47 m/s.

Desain Turbin Menggunakan CAD

Desain Turbin Menggunakan CAD dilakukan dengan menggunakan simulasi untuk mendesain turbin angin HAWT 3 bilah skala mikro dengan diameter rotor 1,5 m dan kecepatan angin rata-rata 6,47 m/s. Desain ini melibatkan pemilihan profil bilah NACA 4412, yang dipilih karena keseimbangannya antara gaya angkat dan gaya hambat. Bilah turbin dirancang untuk beroperasi pada TSR 6, dengan penyesuaian sudut pitch untuk memberikan kinerja optimal pada kecepatan angin yang berlaku. Kecepatan ujung rotor dihitung sekitar 38,82 m/s dengan kecepatan sudut rotor 51,76 rad/s untuk memastikan turbin berputar pada kecepatan yang tepat agar dapat secara efisien mengubah energi angin menjadi energi mekanik.

Optimasi Desain Bilah Turbin

Setelah desain awal, optimasi desain bilah dilakukan berdasarkan TSR yang diinginkan, yaitu TSR = 6. Langkah-langkah optimasi yang dilakukan meliputi:

1. Penyesuaian Geometri Bilah:

Mengubah dimensi dan bentuk bilah untuk mencapai kinerja yang lebih baik, mengurangi hambatan, dan memaksimalkan daya angkat pada kecepatan angin 6,47 m/s.

2. Evaluasi Koefisien Daya (C_p):

Hitung C_p berdasarkan desain bilah yang dihasilkan untuk memastikan bahwa C_p berada dalam kisaran optimal (sekitar 0,4 hingga 0,45 pada TSR = 6).

3. Pemilihan Material:

Pemilihan material bilah turbin (seperti fiberglass atau komposit karbon) yang ringan namun kuat untuk menahan beban angin yang bervariasi dan memastikan ketahanan bilah terhadap tekanan angin.

Analisis Potensi Energi Angin

Setelah desain turbin dan pengujian kekuatan struktural selesai, analisis potensi energi angin dilakukan di Pademangan Timur. Data kecepatan angin digunakan untuk menghitung potensi energi angin yang dapat dihasilkan oleh turbin yang dirancang menggunakan rumus daya berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (7)$$

Di mana:

- P adalah daya yang dihasilkan (W),
- ρ adalah massa jenis udara ($1,225 \text{ kg/m}^3$),
- A adalah luas area sapuan rotor $A = \pi R^2$,
- v adalah kecepatan angin (m/s), dan
- C_p adalah koefisien daya yang dihitung berdasarkan desain bilah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan $TSR = 6$, kecepatan ujung rotor dihitung sebagai hasil perkalian TSR dengan kecepatan angin:

$$v_{tip} = TSR \times v = 6 \times 6,47 = 38,82 \text{ m/s}$$

Kecepatan sudut rotor ω yang dibutuhkan untuk mencapai TSR optimal dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\omega = v_{tip}/R = \frac{38,82}{0,75} = 51,76 \text{ rad/s}$$

Dengan nilai-nilai $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ untuk kerapatan udara, $A = 1,767 \text{ m}^2$ luas sapuan rotor, $v = 6,47 \text{ m/s}$ kecepatan angin, dan $C_p = 0,4$ koefisien daya, hasil perhitungan daya yang dihasilkan adalah

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

Dengan demikian, daya yang dihasilkan oleh turbin angin pada kecepatan angin $6,47 \text{ m/s}$ adalah $131,5 \text{ W}$. Energi yang dihasilkan oleh turbin dalam satu bulan dihitung dengan mengalikan daya yang dihasilkan dengan jumlah jam dalam sehari dan jumlah hari dalam sebulan. Dengan asumsi turbin beroperasi 24 jam sehari dan 30 hari per bulan, energi yang dihasilkan per bulan adalah:

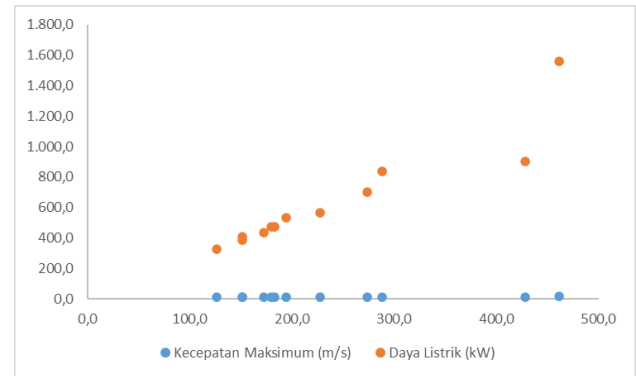
$$\text{Konsumsi energi per bulan} = 131,5 \text{ W} \times 24 \text{ jam} \times 30 \text{ hari} \\ = 94,920 \text{ Wh} = 94,92 \text{ kWh}$$

Energi yang dihasilkan per tahun dihitung dengan mengalikan daya yang dihasilkan dengan jumlah jam dalam setahun. Dengan asumsi turbin beroperasi 24 jam sehari, 365 hari setahun, energi yang dihasilkan per tahun adalah:

$$\text{Energi per tahun} = 131,5 \text{ W} \times 24 \text{ jam} \times 365 \text{ hari} \\ = 1.149.540 \text{ Wh} = 1.149.544 \text{ kWh}$$

Berdasarkan perhitungan ini, turbin angin dengan diameter rotor $1,5 \text{ m}$ dan $TSR = 6$ dapat menghasilkan $94,92 \text{ kWh}$ per bulan dan $1.149,54 \text{ kWh}$ per tahun dengan kecepatan angin rata-rata $6,47 \text{ m/s}$. Kinerja turbin ini sangat bergantung pada kecepatan angin di lokasi penelitian. TSR yang digunakan dalam penelitian ini adalah 6, yang merupakan nilai optimal untuk turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dalam kondisi angin yang relatif stabil. Nilai TSR yang lebih rendah atau lebih tinggi dapat mengurangi koefisien daya (C_p), yang memengaruhi efisiensi turbin.

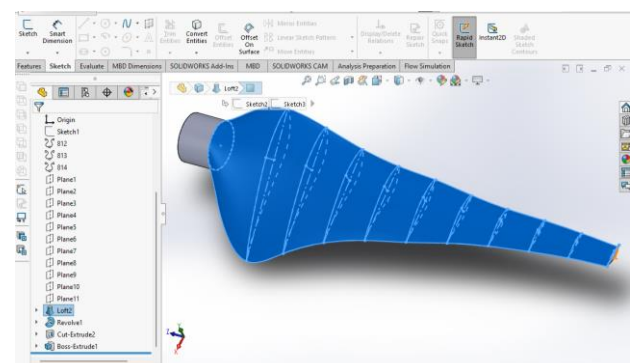
Efisiensi turbin angin ini, yang diukur dengan koefisien daya (C_p), diperkirakan sekitar 0,4 pada $TSR = 6$, sesuai dengan nilai C_p optimal yang ditemukan dalam desain HAWT untuk kondisi angin stabil.



Gambar 2. Daya listrik tahunan

Tabel 4. Geometri turbin

Kategori	Tipe Turbin	Geometri
HAWT	HAWT 3 bilah	Rotor 3 bilah, rotor di bagian depan menara, menghadap angin.
HAWT	HAWT 2 bilah	Rotor 2 bilah, putaran lebih cepat
HAWT	HAWT searah angin	Rotor di belakang menara (angin melewati menara terlebih dahulu)
HAWT	Turbin angin sumbu horizontal skala kecil (atap)	Diameter kecil, dipasang di atap/tiang pendek.
VAWT	Savonius (tipe seret)	Pisau melengkung berbentuk S, seret
VAWT	Darrieus "pengocok telur"	Bilah yang melengkung membentuk lingkaran seperti telur.
VAWT	Rotor H Darrieus (Giomill)	Garis lurus membentuk huruf H
VAWT	Heliks (VAWT heliks)	Bilah-bilah tersebut diputar secara heliks di sepanjang porosnya.
VAWT	VAWT Hibrida (Savonius–Darrieus)	Kombinasi batang penarik + pengangkat



Gambar 3. Desain bilah



Gambar 4. Desain 3 bilah

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian diatas maka dapat diambil kesimpulan antara lain sebagai berikut ini:

1. Turbin angin HAWT 3 bilah dengan diameter rotor 1,5 m dan TSR 6 dapat menghasilkan daya 131,5 W pada kecepatan angin rata-rata 6,47 m/s. Hal ini menunjukkan potensi energi yang signifikan dalam kondisi angin di Pademangan Timur.
2. Dengan asumsi turbin beroperasi 24 jam sehari, 30 hari sebulan, energi yang dihasilkan per bulan adalah 94,92 kWh dan per tahun adalah 1.149,54 kWh. Hal ini menunjukkan bahwa turbin ini dapat digunakan untuk aplikasi skala kecil dengan potensi pasokan energi yang memadai.
3. Penggunaan TSR sebesar 6 menunjukkan efisiensi daya optimal dengan koefisien daya (C_p) sekitar 0,4. Nilai TSR yang tepat memastikan turbin beroperasi pada efisiensi maksimum, yang secara signifikan memengaruhi konversi energi angin menjadi energi mekanik

REFERENSI

- Adams, D., White, J., Rumsey, M., & Farrar, C. (2011). Structural health monitoring of wind turbines: method and application to a HAWT. *Wind Energy*, 14(4), 603–623.
- Bayron, P., Kelso, R., & Chin, R. (2024). Experimental investigation of tip-speed-ratio influence on horizontal-axis wind turbine wake dynamics. *Renewable Energy*, 225, 120201.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- Corke, T. C., & Nelson, R. C. (2025). *Wind energy design*. CRC Press.
- Council, G. W. E. (2020). Global offshore wind report 2020. *GWEC: Brussels, Belgium*, 19, 10–12.
- Dida, H. P., Suparman, S., & Widhiyanuriyawan, D. (2016). Pemetaan potensi energi angin di perairan Indonesia berdasarkan data satelit QuikScat dan WindSat. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(2), 95–101.
- Fikako, M. D., Bukhori, M. L., Setiawan, F., Azizzurrahman, M., & Adam, M. K. (2023). PEMBUATAN DESAIN TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL (VAWT) DAN PANEL SURYA UNTUK PEMANFAATAN ENERGI LISTRIK. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 9(2), 349–358.
- Henriksen, L. C., Hansen, M. H., & Poulsen, N. K. (2012). Beyond the cp-curve in model-based control of wind turbines. *EWEC 2012-European Wind Energy Conference & Exhibition*, 147–152.
- Hosseini, A., Cannon, D. T., & Vassel-Be-Hagh, A. (2022). Tip speed ratio optimization: More energy production with reduced rotor speed. *Wind*, 2(4), 691–711.
- Hosseini, A., Cannon, D. T., & Vassel-Be-Hagh, A. (2025). Wind farm active wake control via concurrent yaw and tip-speed ratio optimization. *Applied Energy*, 377, 124625.
- Ir Andi Saidah, M. T., & Muktar Sinaga, S. T. (2023). *Power Plant dan Aplikasinya*. CV. Bintang Semesta Media.
- Ishugah, T. F., Li, Y., Wang, R. Z., & Kiplagat, J. K. (2014). Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 613–626.
- Johari, M. K., Jalil, M., & Shariff, M. F. M. (2018). Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.13), 74–80.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- Martínez-Márquez, C. I., Twizere-Bakunda, J. D., Lundback-Mompó, D., Orts-Grau, S., Gimeno-Sales, F. J., & Seguí-Chilet, S. (2019). Small wind turbine emulator based on lambda- C_p curves obtained under real operating conditions. *Energies*, 12(13), 2456.
- Rahman, A., Sugiyarto, I., Faddillah, U., & Sudarsono, B. (2022). Prediksi kecepatan angin untuk mengetahui sumber energi alternatif menggunakan regresi ANN (Studi kasus Provinsi Aceh tahun 2022). *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, 5(2).
- Rhakasywi, D. (n.d.). Increasing The Performance Of A 500 W Small Scale Wind Turbine Through Blade Optimization With Low Wind Speed Computational Simulation Studies. *ROTASI*, 27(2), 37–48.
- Sinaga, M., Romadoni, A. M., Hidayat, F., & Saputra, A. A. (2024). Analisis dan Simulasi Container Chasis Menggunakan Software Solidworks 2019. *Jurnal Teknik & Teknologi Terapan*, 2(1), 21–25.
- Van Grieken, M., & Dower, B. (2023). Wind turbines and landscape. In *Wind energy engineering* (pp. 443–462). Elsevier.

Yazıcı, İ., & Yaylacı, E. K. (2018). Improving efficiency of the tip speed ratio-MPPT method for wind energy systems by using an integral sliding mode voltage regulator. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(5), 051203.