

Analisis Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Spiral Pada Kecepatan Angin Rendah

Nofiansah^{1*}, Herman Yani²⁾, Sudirman Yahya³⁾ Mahesa Prima Yoga⁴⁾, Muhammad Aziz Rifki⁵⁾, Adria Syuja⁶⁾, Meilianti⁷⁾

^{1,2,3,4,5,6)} Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

⁷⁾ Program Studi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia.

Email* : nofimh4@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe spiral skala kecil pada kecepatan angin rendah di Indonesia, sebagai upaya pengembangan energi terbarukan yang sesuai dengan karakteristik angin lokal. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimental, meliputi pengujian laboratorium dengan angin buatan dan pengujian lapangan menggunakan angin alami. Parameter yang diukur mencakup kecepatan angin, putaran rotor (RPM), tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan turbin dapat beroperasi pada kecepatan cut-in sekitar 2 m/s, dengan daya maksimum 17 W pada kecepatan angin 8–9 m/s. Pengujian lapangan pada lokasi Dermaga Tanjung Api-Api menghasilkan daya maksimum hanya 0,689 W dengan kecepatan angin 4–5,5 m/s. Analisis tip speed ratio (TSR) dan koefisien daya (C_p) menunjukkan nilai TSR sekitar 1,6 dan C_p hanya 0,074, jauh di bawah nilai optimal untuk turbin heliks. Faktor utama yang membatasi daya keluaran adalah luas sapuan turbin yang kecil, desain bilah yang belum optimal, torsi rotor yang rendah, serta generator yang terlalu besar untuk skala turbin. Meskipun daya listrik rendah, turbin tetap mampu menggerakkan inverter dan menghasilkan tegangan AC 220 V. Temuan ini memberikan informasi penting mengenai keterbatasan performa turbin skala kecil pada angin rendah dan menjadi dasar bagi pengembangan desain bilah, kesesuaian generator, dan sistem penyimpanan energi agar turbin angin skala kecil dapat beroperasi lebih efisien dan andal di Indonesia..

Kata kunci: Energi terbarukan, turbin angin sumbu vertikal, kecepatan angin rendah, torsi motor rendah

Performance Analysis Of Spiral Type Vertical Axis Wind Turbine At Low Wind Speed

ABSTRACT

This study aims to analyze the performance of a small-scale helical vertical-axis wind turbine (VAWT) under low wind speed conditions in Indonesia, contributing to renewable energy development adapted to local wind characteristics. An experimental approach was employed, including laboratory testing with artificial wind and field testing with natural wind. Measured parameters included wind speed, rotor RPM, voltage, current, and generated electrical power. Laboratory results showed that the turbine could operate at a cut-in speed of approximately 2 m/s, producing a maximum of 17 W at 8–9 m/s wind speed. Field testing at Tanjung Api-Api Port generated a maximum power of only 0.689 W at 4–5.5 m/s wind speed. Tip speed ratio (TSR) and power coefficient (C_p) analyses indicated $TSR \approx 1.6$ and $C_p \approx 0.074$, significantly lower than the optimal range for helical turbines. The main factors limiting power output include the small swept area, suboptimal blade design, low rotor torque, and an oversized generator relative to turbine scale. Despite the low power output, the turbine could drive an inverter and produce 220 V AC. These findings provide critical insights into the performance limitations of small-scale turbines under low wind conditions and serve as a basis for blade design optimization, generator matching, and energy storage system improvements to achieve more efficient and reliable small-scale wind energy conversion in Indonesia.

Keywords : *Renewable energy, vertical-axis wind turbine, low wind speed, low motor torque*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan sektor industri, serta percepatan pembangunan infrastruktur. Kondisi ini menyebabkan konsumsi energi nasional masih didominasi oleh sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Ketergantungan terhadap energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain keterbatasan cadangan energi, fluktuasi harga energi global, serta dampak lingkungan berupa peningkatan emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Oleh karena itu, pengembangan dan pemanfaatan energi terbarukan menjadi kebutuhan strategis untuk menjamin ketahanan energi nasional yang berkelanjutan [1].

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar karena bersifat bersih, tersedia secara alami, dan dapat dimanfaatkan pada berbagai skala, mulai dari pembangkit besar hingga sistem mikro. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa energi angin berpotensi dikembangkan sebagai pembangkit listrik skala kecil di berbagai wilayah Indonesia [2]. Namun demikian, karakteristik angin di Indonesia umumnya memiliki kecepatan relatif rendah, yaitu berkisar antara 2–5 m/s, sehingga kurang optimal untuk turbin angin sumbu horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine/HAWT) yang membutuhkan kecepatan angin tinggi untuk beroperasi secara efisien [3].

Kondisi tersebut membuka peluang pengembangan turbin angin sumbu vertikal (Vertical Axis Wind Turbine/VAWT) yang lebih adaptif terhadap kecepatan angin rendah dan arah angin yang berubah-ubah. VAWT memiliki sejumlah keunggulan, antara lain mampu menangkap angin dari segala arah tanpa sistem yaw, memiliki tingkat kebisingan yang lebih rendah, konstruksi yang relatif sederhana, serta lebih mudah diaplikasikan di lingkungan perkotaan maupun daerah dengan keterbatasan lahan [4]. Selain itu, studi eksperimental menunjukkan bahwa VAWT mampu beroperasi lebih stabil dibandingkan HAWT pada kecepatan angin rendah [5]. Salah satu jenis VAWT yang banyak dikembangkan adalah turbin angin tipe heliks atau spiral. Bentuk bilah spiral dirancang untuk mengurangi fluktuasi torsi dan meningkatkan kestabilan putaran rotor pada kecepatan angin rendah [6]. Namun, sebagian besar penelitian terkait VAWT spiral masih didominasi oleh pendekatan simulasi numerik, analisis teoritis, atau pengujian laboratorium dengan kondisi aliran buatan [7]. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa desain spiral dan heliks mampu memberikan performa aerodinamis yang lebih stabil dibandingkan VAWT konvensional, meskipun nilai koefisien daya (C_p) masih relatif rendah [8],[9]. Pengujian eksperimental terhadap prototipe VAWT heliks berdaya kecil menunjukkan bahwa kinerja turbin sangat dipengaruhi oleh karakteristik angin dan desain bilah [10].

Meskipun demikian, penelitian yang mengevaluasi sistem pembangkit secara menyeluruh—meliputi turbin, generator magnet permanen, pengontrol angin, baterai, dan inverter—sebagai satu kesatuan sistem yang siap diaplikasikan masih sangat terbatas [11], [12]. Beberapa studi terbaru menekankan pentingnya pengujian sistem PLTB skala kecil secara langsung untuk memperoleh data kinerja yang realistis dan aplikatif [13].

Berdasarkan gap penelitian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kinerja turbin angin sumbu vertikal tipe spiral berkapasitas kecil yang dioperasikan pada kondisi angin rendah. Penelitian ini mengevaluasi performa aerodinamis turbin serta kinerja sistem konversi energi listrik melalui pengukuran kecepatan angin, putaran rotor (RPM), tegangan, arus, dan daya keluaran. Selain itu, penelitian ini juga menguji kemampuan sistem dalam menyimpan energi pada baterai dan menyuplai beban listrik AC ringan menggunakan inverter.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk menganalisis kinerja turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine / VAWT*) tipe spiral pada kondisi angin rendah. Metodologi penelitian dirancang untuk mengevaluasi karakteristik aerodinamika turbin, kinerja konversi energi, serta performa sistem kelistrikan secara menyeluruh. Parameter analisis meliputi *tip speed ratio* (TSR), koefisien daya (*power coefficient*, C_p), dan efisiensi sistem, sebagaimana umum digunakan dalam kajian kinerja turbin angin skala kecil [9].

Spesifikasi Turbin dan Sistem

Turbin yang digunakan merupakan VAWT tipe spiral dengan tiga bilah [10]. Desain spiral dipilih karena mampu menghasilkan torsi yang lebih stabil, responsif pada kecepatan angin rendah, serta memiliki karakteristik putaran yang lebih halus dibandingkan desain bilah lurus. Spesifikasi geometris turbin dan sistem pembangkit ditampilkan pada Tabel 1 [11].

Tabel 1 Parameter Geometris dan Spesifikasi Sistem Turbin

Parameter	Nilai / Spesifikasi
Jenis Turbin	VAWT Spiral (3 bilah)
Material Bilah	Fiberglass reinforced polymer
Tinggi Rotor	100 cm
Diameter Rotor	55 cm
Luas Sapuan ($A = D \times H$)	$0,55 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 0,55 \text{ m}^2$
Sudut Kelengkungan Bilah	$60^\circ - 75^\circ$
Massa Rotor	$\pm 7 \text{ kg}$
Jenis Generator	Permanent Magnet Alternator (PMA)
Rating Generator	500 Watt, 12–48 V
Cut-in Speed Teoritis	2,0–2,5 m/s
Sistem Penyimpanan Energi	Baterai 12V, 7Ah
Sistem Konversi	Wind charge controller + inverter 220V

Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium bertujuan untuk memperoleh karakteristik dasar turbin pada kondisi aliran udara terkendali. Aliran udara dihasilkan menggunakan blower industri berkecepatan variabel dengan rentang 2–10 m/s. Turbin ditempatkan pada jarak 90 cm dari mulut blower untuk meminimalkan efek turbulensi.

Parameter yang diukur meliputi:

1. kecepatan angin (m/s),
2. putaran rotor (RPM),
3. tegangan keluaran (V),
4. arus keluaran (A),
5. daya keluaran (W).

Instrumen yang digunakan terdiri dari anemometer digital (akurasi $\pm 0,1 \text{ m/s}$), tachometer optik (akurasi $\pm 1 \text{ RPM}$), dan multimeter digital (akurasi $\pm 0,01 \text{ V}$ dan $\pm 0,01 \text{ A}$). Data direkam pada interval kecepatan angin setiap 1 m/s, dengan waktu pencatatan 60 detik pada setiap titik pengukuran untuk memperoleh nilai rata-rata yang stabil.

Pengujian Lapangan

Pengujian lapangan dilakukan pada kondisi angin alami dengan kecepatan berkisar antara 3–6 m/s. Turbin dipasang pada ketinggian 2,5 m dari permukaan tanah untuk mengurangi pengaruh turbulensi permukaan. Pengambilan data dilakukan setiap 10 menit selama periode satu jam.

Parameter yang dicatat meliputi kecepatan angin, RPM turbin, tegangan, arus, daya keluaran, serta kondisi cuaca secara visual. Pengujian lapangan bertujuan untuk mengevaluasi performa aktual turbin, membandingkan hasil pengujian laboratorium dan lapangan, serta mengidentifikasi faktor pembatas kinerja pada kondisi angin rendah.

Metode Analisis Data

Nilai *tip speed ratio* (TSR) dihitung menggunakan

$$TSR = \frac{\omega R}{v} \quad (1)$$

dengan ω adalah kecepatan sudut rotor (rad/s), R adalah jari-jari rotor (m), dan v adalah kecepatan angin (m/s). Rentang TSR optimal untuk VAWT spiral umumnya berada pada nilai 1–2,5.

Daya angin teoritis dihitung menggunakan

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

dengan ρ adalah massa jenis udara (1,225 kg/m³) dan A adalah luas sapuan rotor. Koefisien daya (C_p) dihitung menggunakan

$$C_p = \frac{P_{Turbin}}{P_{Angin}} \quad (3)$$

Efisiensi sistem secara keseluruhan dihitung sebagai hasil perkalian efisiensi masing-masing komponen, yaitu turbin, generator, *charge controller*, dan inverter.

Variabel dan Instrumen Pengukuran

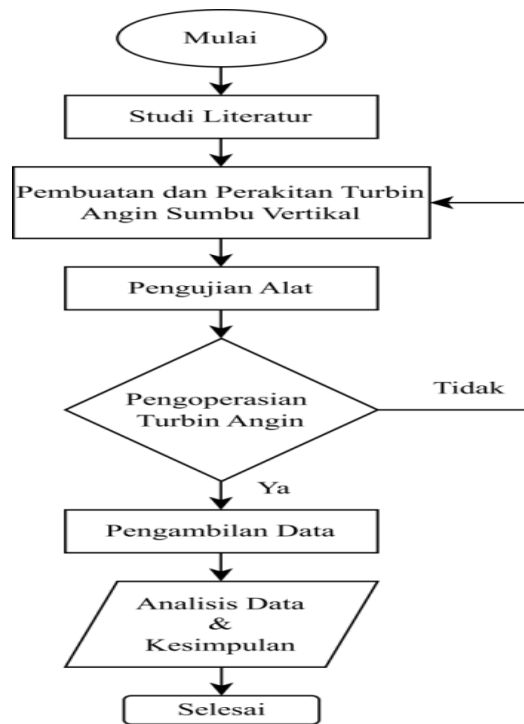
Variabel eksperimen dan instrumen pengukuran ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Variabel Eksperimen dan Instrumen Pengukuran

Variabel	Instrumen	Satuan	Akurasi
Kecepatan angin	Digital anemometer	m/s	±0.1
Putaran rotor	Tachometer	RPM	±1
Tegangan	Multimeter digital	Volt	±0.01
Arus	Multimeter digital	Ampere	±0.01
Daya	Perhitungan manual (V×I)	Watt	–
Kondisi cuaca	Observasi visual	–	–

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi analisis literatur, observasi, dan eksperimen. Diagram alir penelitian adalah sebagai berikut:





Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Prosedur Perakitan dan Pengujian

Prosedur penelitian mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1. Tahapan meliputi persiapan alat dan bahan, fabrikasi bilah spiral, perakitan rangka dan poros utama, pemasangan bilah dan generator, instalasi sistem kelistrikan (controller, baterai, dan inverter), serta pengujian fungsional menggunakan anemometer dan multimeter digital.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengevaluasi performa awal turbin angin sumbu vertikal tipe spiral menggunakan sumber angin buatan berupa blower. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kecepatan angin awal (*cut-in speed*), kestabilan putaran rotor, serta karakteristik awal keluaran generator sebelum dilakukan pengujian di lapangan. Hasil pengujian laboratorium disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Pengujian di Laboratorium

Waktu	Kecepatan Angin (m/s)	RPM Turbin	Tegangan (v)	Arus (I)	Daya (W)	Tegangan Blower
15.00	4,412	111	38	0,35	13,3	130
15.10	5,719	146	46	0,25	11,5	150
15.20	8,442	437	56,6	0,24	13,584	170
15.30	8,855	161	29,7	0,38	11,286	190
15.40	9,358	163	41,2	0,42	17,304	200

Berdasarkan Tabel 3, turbin mulai berputar secara stabil pada kecepatan angin sekitar 2 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa turbin spiral memiliki kemampuan *self-starting* yang baik pada kecepatan angin rendah, sesuai dengan karakteristik umum turbin angin sumbu vertikal tipe heliks. Peningkatan kecepatan angin menyebabkan kenaikan putaran rotor (RPM) dan tegangan keluaran generator, namun tidak diikuti oleh peningkatan daya listrik yang signifikan.

Daya keluaran maksimum yang diperoleh dari pengujian laboratorium hanya mencapai sekitar 17 W pada kecepatan angin 8–9 m/s, jauh di bawah kapasitas generator yang diklaim sebesar 500 W. Kondisi ini mengindikasikan adanya ketidaksesuaian antara kemampuan mekanik turbin dan kapasitas generator yang digunakan.

Mengacu pada Persamaan (1) pada Metode Penelitian, nilai *tip speed ratio* (TSR) pada kondisi kecepatan angin 8,44 m/s dan putaran rotor 437 RPM diperoleh sebesar 1,62. Nilai TSR ini berada di bawah rentang optimal turbin angin sumbu vertikal tipe heliks, yang umumnya berkisar antara 2,5–3,5. TSR yang rendah menunjukkan bahwa bilah turbin belum mampu mengonversi energi angin secara optimal menjadi energi mekanik.

Selanjutnya, berdasarkan Persamaan (2), daya angin teoritis yang tersedia pada kecepatan angin 8,44 m/s dengan luas sapuan turbin sebesar 0,6 m² adalah 183,6 W. Sementara itu, daya listrik yang terukur hanya sebesar 13,584 W. Dengan menggunakan Persamaan (3), nilai koefisien daya (C_p) turbin diperoleh sebesar 0,074. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan nilai C_p turbin heliks pada umumnya yang berada pada kisaran 0,15–0,25, yang menunjukkan bahwa efisiensi aerodinamika bilah masih rendah.

Hasil Uji Lapangan di Dermaga Tanjung Api-Api

Pengujian lapangan dilakukan di Dermaga Tanjung Api-Api dengan memanfaatkan angin alami yang memiliki kecepatan berkisar antara 4–5,5 m/s. Pengambilan data dilakukan setiap 10 menit untuk memperoleh gambaran kinerja turbin pada kondisi operasional nyata. Hasil pengujian lapangan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian di Pelabuhan Tanjung Api-Api

Waktu	Kecepatan Angin (m/s)	RPM Turbin	Tegangan (v)	Arus (A)	Daya (W)	Tegangan Input Battery
15.00	4.320	275	4,3	0,12	0,516	12,4
15.10	4.489	292	5,1	0,13	0,663	12,4
15.20	5.508	317	5,3	0,13	0,689	12,5
15.30	5.369	331	5,15	0,11	0,5665	12,5
15.40	5.373	325	5,22	0,12	0,6264	12,6

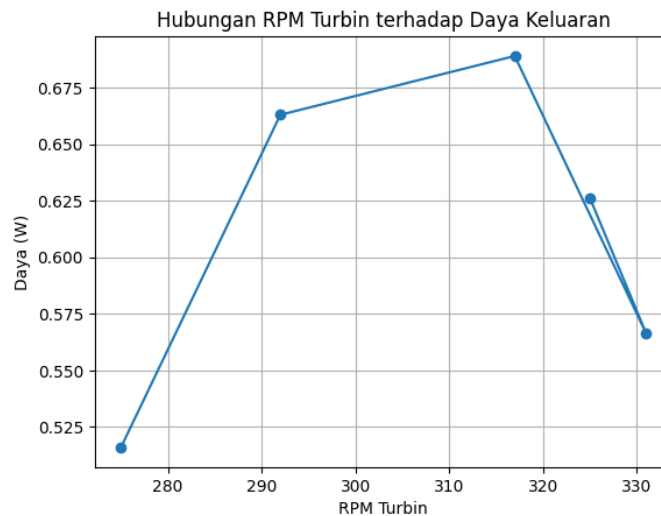
Berdasarkan Tabel 4, daya listrik maksimum yang dihasilkan turbin hanya sebesar 0,689 W dan tidak mencapai 1 W. Nilai ini sangat kecil jika dibandingkan dengan kapasitas generator yang digunakan. Namun demikian, turbin tetap mampu berputar dan menghasilkan tegangan keluaran yang relatif stabil pada kondisi angin rendah.

Jika dianalisis menggunakan Persamaan (2), potensi daya angin pada kecepatan 5,5 m/s dengan luas sapuan 0,6 m² memang sangat terbatas. Oleh karena itu, rendahnya daya listrik yang dihasilkan merupakan konsekuensi langsung dari kecilnya energi angin yang tersedia, bukan akibat kegagalan sistem.

Walaupun daya yang masuk ke baterai sangat kecil, inverter tetap mampu mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC sebesar 220 V. Fluktuasi tegangan keluaran pada kisaran 208–218 V menunjukkan bahwa inverter bekerja terutama dengan suplai energi dari baterai, bukan murni dari turbin angin. Dengan demikian, keberhasilan inverter menghasilkan tegangan AC tidak dapat



dijadikan indikator keberhasilan kinerja turbin.



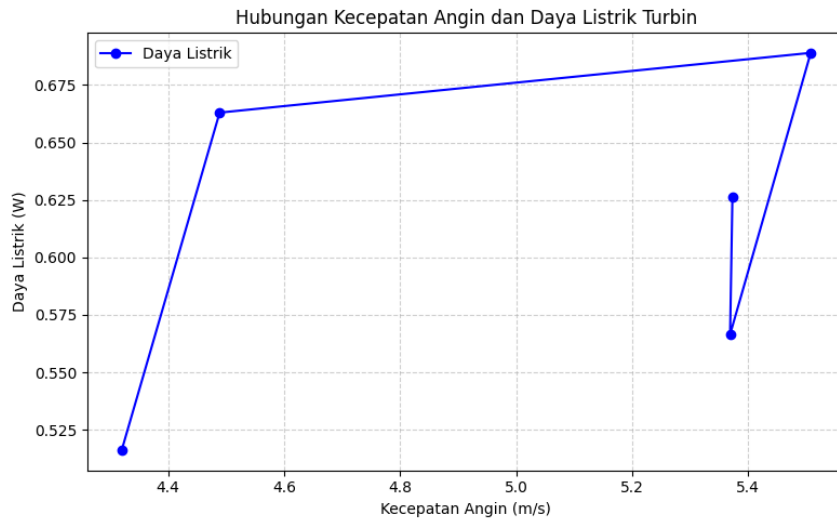
Gambar 2. Hubungan RPM Turbin terhadap Daya Keluaran pada Pengujian Lapangan

Hubungan antara kecepatan putar rotor (RPM) dan daya keluaran turbin ditunjukkan pada Gambar 2. Terlihat bahwa peningkatan RPM tidak selalu diikuti peningkatan daya listrik secara linier. Daya maksimum sebesar 0,689 W tercapai pada RPM 317, sedangkan pada RPM yang lebih tinggi atau lebih rendah, daya justru menurun. Fenomena ini menunjukkan bahwa keterbatasan torsi turbin dan efisiensi aerodinamika bilah spiral menyebabkan konversi energi mekanik menjadi energi listrik tidak optimal.

Selain itu, rendahnya daya keluaran juga terkait dengan faktor lingkungan, yaitu kecepatan angin yang terbatas (4–5,5 m/s) serta luas sapuan turbin yang relatif kecil (0,6 m²). Dengan merujuk pada Persamaan (1)–(3) di Metode Penelitian, nilai Tip Speed Ratio (TSR) turbin berada di bawah rentang optimal (1,6 dibandingkan 2,5–3,5), dan koefisien daya (C_p) yang dihasilkan hanya 0,07. Kombinasi faktor tersebut menjelaskan mengapa daya listrik yang dihasilkan sangat rendah meskipun generator memiliki kapasitas 500 W.

Gambar ini juga memperkuat temuan dari Tabel 5 dan Tabel 6, yaitu bahwa desain bilah, ukuran turbin, dan kondisi angin rendah merupakan faktor utama yang membatasi performa turbin. Dengan demikian, analisis visual dari grafik ini menjadi bukti empiris atas rendahnya efisiensi sistem turbin spiral skala kecil dalam kondisi angin rendah khas Indonesia.

Gambar 3 menunjukkan bahwa daya listrik meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan angin hingga puncaknya pada 5,508 m/s, kemudian sedikit menurun dan berfluktuasi pada kecepatan angin berikutnya. Fenomena ini menggambarkan bahwa meskipun turbin mampu menangkap energi dari angin, daya keluaran tetap rendah karena keterbatasan torsi dan efisiensi generator pada kondisi angin rendah.



Gambar 3. Grafik Hubungan Kecepatan Angin dan Daya Listrik Turbin

Perbandingan Kinerja Teoretis dan Eksperimental

Perbandingan antara kinerja teoretis dan hasil eksperimen ditunjukkan pada Tabel 5.

Parameter	Teoretis (VAWT Spiral)	Hasil Penelitian	Analisis
Kapasitas	500 W	0,689 W	Generator overrated untuk turbin
TSR optimal	2.5–3.5	1.6–1.8	Bilah tidak optimal
Cp optimal	0.2	0.07	Efisiensi rendah
Angin minimal	3 m/s	4–5 m/s	Angin rendah → daya kecil

Berdasarkan Tabel 5, nilai TSR dan koefisien daya (C_p) hasil eksperimen berada jauh di bawah nilai optimal. Hal ini menunjukkan bahwa desain bilah dan skala turbin belum sesuai untuk menghasilkan daya listrik yang besar pada kecepatan angin rendah.

Faktor-faktor utama yang menyebabkan rendahnya daya keluaran turbin dirangkum pada Tabel 6. Berdasarkan Tabel 6, penyebab utama rendahnya daya keluaran meliputi desain bilah yang kurang aerodinamis, luas sapuan turbin yang kecil, kecepatan angin lapangan yang rendah, serta ketidaksesuaian kapasitas generator terhadap kemampuan mekanik turbin. Generator dengan kapasitas 500 W pada penelitian ini dapat dikategorikan *overrated* terhadap skala turbin yang digunakan

Penyebab	Dampak
Desain bilah kurang aerodinamis	torsi rendah
Generator terlalu besar	turbin tidak mampu memutar beban
Angin lapangan rendah	energi sangat kecil
Losses mekanis & listrik	daya semakin turun

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan lapangan, beberapa fenomena aerodinamika yang memengaruhi rendahnya kinerja turbin dapat diidentifikasi sebagai berikut:

1. Peningkatan RPM tidak selalu diikuti peningkatan daya
Meskipun pada kondisi tertentu peningkatan RPM menghasilkan tegangan yang lebih tinggi, arus keluaran tetap kecil akibat torsi turbin yang rendah.
2. Torsi rotor yang tidak mencukupi
Bilah spiral menghasilkan gaya angkat yang rendah sehingga tidak mampu menyediakan torsi yang cukup untuk memutar generator dengan beban optimal.
3. Kerugian akibat drag dan turbulensi
Desain bilah spiral menimbulkan pusaran aliran udara yang meningkatkan drag, sehingga sebagian energi angin terbuang dan tidak dikonversi menjadi energi mekanik.
4. Ketidakseimbangan torsi (torque ripple)
Torsi yang tidak merata menyebabkan fluktuasi putaran rotor, terutama pada pengujian lapangan dengan kondisi angin yang berubah-ubah

Fenomena-fenomena tersebut menunjukkan bahwa rendahnya daya keluaran turbin bukan merupakan kesalahan pengujian, melainkan konsekuensi logis dari keterbatasan desain aerodinamika dan kondisi angin yang tersedia.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa turbin angin sumbu vertikal tipe spiral skala kecil mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah mulai dari 2 m/s, namun daya listrik yang dihasilkan sangat terbatas, baik pada pengujian laboratorium maupun lapangan. Nilai tip speed ratio (TSR) dan koefisien daya (C_p) berada di bawah rentang optimal, menunjukkan efisiensi konversi energi yang rendah akibat desain bilah, luas sapuan kecil, dan kecepatan angin terbatas. Hasil ini menegaskan bahwa meskipun generator memiliki kapasitas besar, performa turbin sangat dipengaruhi oleh faktor aerodinamika dan kondisi lingkungan. Temuan ini memberikan dasar penting untuk pengembangan turbin angin skala kecil yang lebih efisien dan adaptif terhadap kondisi angin rendah di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Faisal, I. Ayu, and S. Adnyani, "Analisis potensi energi angin sebagai pembangkit listrik tenaga bayu skala mikro di Kabupaten Dompu," *Dielektrika*, vol. 9, no. 1, pp. 26–32, 2022.
- [2] L. Li, I. Chopra, W. Zhu, and M. Yu, "Performance analysis and optimization of a vertical-axis wind turbine with a high tip-speed ratio," *Energies*, vol. 14, no. 4, 2021, doi: 10.3390/en14040996.
- [3] C. Sranpat, S. Unsakul, P. Choljararux, and T. Leephakpreeda, "CFD-based performance analysis on design factors of vertical axis wind turbines at low wind speeds," *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 500–505, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.235.
- [4] D. H. Didane, M. R. Behery, M. Al-Ghriybah, and B. Manshoor, "Recent progress in design and performance analysis of vertical-axis wind turbines: A comprehensive review," *Processes*, vol. 12, no. 6, 2024, doi: 10.3390/pr12061094.
- [5] A. F. Arib and A. Ansori, "Pengaruh kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin sumbu vertikal 5 kW menggunakan nozzle konvergen di Sumber Manjing Wetan Kabupaten Malang," *Prosiding Seminar Nasional*, 2025.
- [6] M. O. Moussa, "Experimental and numerical performance analysis of a small three-blade wind turbine," *Renewable Energy*, 2020.

- [7] P. H. M. Adam and M. R. Nasution, “Analisa pengaruh perubahan kecepatan angin pada pembangkit listrik tenaga angin terhadap daya yang dihasilkan generator DC,” *Jurnal Teknik Elektro*, pp. 1–7, 2019.
- [8] K. Song, H. Huan, and Y. Kang, “Aerodynamic performance and wake characteristics analysis of Archimedes spiral wind turbine rotors with different blade angle,” *Energies*, vol. 16, no. 1, 2023, doi: 10.3390/en16010385.
- [9] D. Han, Y. G. Heo, N. J. Choi, S. H. Nam, K. H. Choi, and K. C. Kim, “Design, fabrication, and performance test of a 100-W helical-blade vertical-axis wind turbine at low tip-speed ratio,” *Energies*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.3390/en11061517.
- [10] P. Pitriadi, R. Bachmid, and I. M. Susanto, “Perancangan kincir angin sumbu vertikal empat sudu dengan kelengkungan 90°,” 2018.
- [11] F. Rahman, I. Nurjannah, H. N. Sari, A. Christian, and M. K. Hidayat, “Optimalisasi metode blade turbin angin sumbu horizontal,” *Otopro*, vol. 18, no. 2, pp. 59–64, 2023, doi: 10.26740/otopro.v18n2.p59-64.
- [12] A. Akbar, “Analisa daya turbin angin sumbu horizontal profil NACA 0015 dengan variasi jumlah blade,” 2018.
- [13] S. A. Ulfiah, A. Rahman, S. D. Nugroho, and F. A. Aarsal, “Analisa prototipe pembuatan PLTB skala kecil pada Laboratorium Teknik Listrik di Politeknik Negeri Padang,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 2, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i2.6395.

