Jurnal Teknik Mesin Universitas Bandar Lampung, Vol 13 No.2, April 2025

Submitted: 19-02-2025
Revised: 10-03-2025
Submitted: 11-03-2025
Revised: 10-04-2025
Accepted:14-04-2025
Published:30-04-2025

Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Sistem Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) untuk Penerangan Jalan di Daerah Terbatas Listrik

Zein Muhamad, Rifqi Dwi Aryana, Riza Muhida, Muhammad Riza, Indra Surya, Kunarto, Bambang Pratowo, Harjono Saputro, Mulyana

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik,Universitas Bandar Lampung, Bandar Lampung, 35143, Indonesia
Email: aryanarifqidwi@gmail.com

Abstrak. Pembangkit listrik tenaga angin merupakan salah satu solusi alternatif dalam menyediakan pasokan listrik yang ramah lingkungan, terutama untuk daerah-daerah yang menghadapi keterbatasan akses listrik. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin menggunakan Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) yang dapat diandalkan untuk penerangan jalan di wilayah Kecamatan Penawartama, Kabupaten Tulang Bawang, Provinsi Lampung. Turbin angin ini dirancang dengan empat bilah setengah lingkaran untuk menghasilkan daya mekanik dan selanjutnya dikonversi menjadi daya listrik menggunakan generator. Dengan rata-rata kecepatan angin 1,96 m/s, turbin ini mampu menghasilkan daya sekitar 7,10 Watt. Melalui sistem konversi dengan efisiensi generator 90%, daya listrik yang dihasilkan mencapai 6,39 Watt, cukup untuk penerangan jalan skala kecil. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem VAWT ini dapat beroperasi dengan efisien pada kecepatan angin rendah hingga sedang, menjadikannya solusi yang berkelanjutan dan layak untuk penerangan jalan di daerah terbatas listrik.

Kata kunci : energi terbarukan, pembangkit listrik, turbin angin, turbin sumbu vertikal, penerangan jalan

1 Pendahuluan

Energi angin merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi alternatif di berbagai wilayah, khususnya di daerah-daerah yang memiliki akses listrik terbatas. Sebagai sumber daya yang tidak habis dan tidak mencemari lingkungan, energi angin menawarkan solusi ramah lingkungan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Di Indonesia, yang memiliki garis pantai panjang dan area terbuka dengan potensi angin yang cukup, teknologi pembangkit listrik tenaga angin dapat diimplementasikan untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah terpencil atau dengan pasokan listrik yang kurang memadai.

Penerangan jalan merupakan kebutuhan penting dalam infrastruktur umum, baik di perkotaan maupun pedesaan, yang berdampak langsung terhadap keselamatan dan kenyamanan masyarakat. Namun, di beberapa daerah, terutama yang terpencil, penerangan jalan masih menjadi tantangan karena keterbatasan akses listrik. Kecamatan Penawartama di Kabupaten Tulang Bawang, Provinsi Lampung, merupakan salah satu contoh wilayah yang menghadapi masalah serupa. Untuk mengatasi hal ini, pemanfaatan teknologi Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) menjadi alternatif yang menjanjikan karena kemampuannya bekerja pada kecepatan angin rendah serta kemudahan dalam pemasangan dan pemeliharaan.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan VAWT untuk mendukung kebutuhan penerangan jalan di Kecamatan Penawartama. Dengan desain yang disesuaikan, turbin angin ini diharapkan mampu beroperasi dengan efisien dalam kondisi angin rendah hingga sedang, serta menyediakan sumber listrik yang stabil untuk penerangan jalan. Selain itu, studi ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kinerja VAWT dalam menghasilkan daya listrik dan stabilitas operasionalnya sebagai bagian dari infrastruktur penerangan jalan yang berkelanjutan dan hemat energi.

Keunggulan ini membuat VAWT cocok digunakan di wilayah dengan kondisi angin yang beragam, seperti yang terdapat di Kecamatan Penawartama, Lampung.

Rancangan dan efisiensi dari turbin angin sangat bergantung pada beberapa faktor utama, termasuk massa jenis udara, luas penampang bilah, dan kecepatan angin. Prinsip dasar dari SKEA dapat dihitung melalui beberapa rumus berikut:

Rumus Dasar Turbin Angin

Daya Kinetik Angin (P):

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

Keterangan :

P adalah daya kinetik angin (Watt),
ρ adalah massa jenis udara (kg/m³),
A adalah luas penampang bilah turbin (m²),
v adalah kecepatan angin (m/s).

Koefisien Daya (Cp):
Koefisien daya (Cp) mencerminkan efisiensi turbin dalam menangkap energi angin dan mengubahnya menjadi daya mekanik. Rumusnya adalah:

$$Cp = \frac{P_{turbin}}{P_{angin}} \tag{2}$$

Keterangan P_{turbin} adalah daya yang dihasilkan turbin dan P_{angin} adalah daya kinetik angin yang memasuki area turbin.

Daya Listrik yang Dihasilkan (P_{listrik}):
Daya listrik yang dihasilkan oleh generator bergantung pada efisiensi konversi generator tersebut. Jika generator memiliki efisiensi

η, maka: $$P_{listrik} = P_{turbin} \times \eta \quad (3)$$

Keterangan :
η adalah efisiensi generator (dalam persen atau desimal).

Perhitungan Efisiensi Total Turbin
Rumus ini memberikan persentase dari total energi angin yang berhasil diubah menjadi daya listrik. Tingkat efisiensi ini menunjukkan seberapa baik sistem turbin bekerja dalam kondisi angin tertentu dan menyediakan gambaran untuk potensi peningkatan lebih lanjut.
Dengan perhitungan ini, penilaian efisiensi turbin dapat dilakukan secara akurat untuk memastikan bahwa sistem memenuhi kebutuhan energi listrik pada kondisi angin yang tersedia.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam peneliti sebagai berikut : Mesin Las, Gerinda, Bor, Meteran, Kunci Ring dan Pas, Tang, Jangka Sorong
Multimeter

Bahan yang digunakan adalah sebagai berikut ; Besi Holo, Pipa PVC, Baut dan Mur, Pipa Besi, Bearing, Generator, Elektroda, Amplas, Plat Besi

2.2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen untuk merancang dan membangun sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) sebagai sumber listrik untuk penerangan jalan. Metode penelitian ini meliputi beberapa tahap utama, yaitu pengumpulan data angin, perancangan dan fabrikasi turbin, pengujian sistem, dan analisis data. Setiap tahapan dijelaskan secara rinci sebagai berikut:

Pengumpulan Data Angin
Pengumpulan data angin dilakukan untuk mengetahui potensi energi angin di lokasi penelitian. Data kecepatan angin diambil melalui alat anemometer yang dipasang pada ketinggian tertentu dan diukur selama beberapa periode waktu untuk mendapatkan data

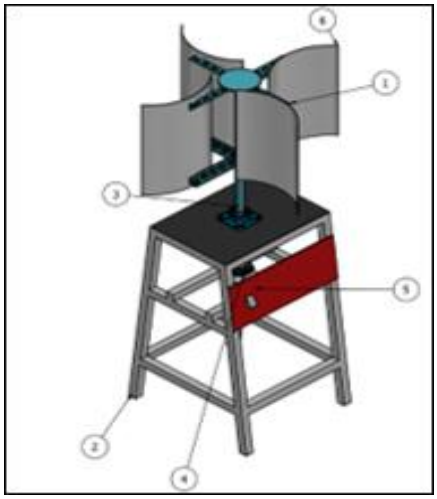
yang representatif. Sebagai alternatif, data angin dapat diambil dari sumber terpercaya seperti Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) untuk mendapatkan informasi angin rata-rata pada lokasi tersebut.

Perancangan dan Fabrikasi Turbin
Proses perancangan melibatkan desain turbin dengan empat bilah setengah lingkaran yang dioptimalkan untuk kondisi kecepatan angin rendah. Dimensi dan bahan bilah turbin ditentukan berdasarkan kriteria efisiensi dan stabilitas struktur. Setelah desain selesai, fabrikasi turbin dilakukan dengan menggunakan peralatan seperti mesin las, bor, dan gerinda untuk memastikan kualitas konstruksi yang sesuai dengan spesifikasi desain.

Pengujian Sistem Turbin dan Generator
Setelah fabrikasi selesai, pengujian awal dilakukan untuk memastikan sistem dapat berfungsi sesuai desain. Turbin dipasang pada lokasi yang telah ditentukan dan dihubungkan ke generator untuk mengukur daya listrik yang dihasilkan. Parameter yang diukur meliputi tegangan output, arus, dan daya listrik yang dihasilkan pada berbagai kecepatan angin.

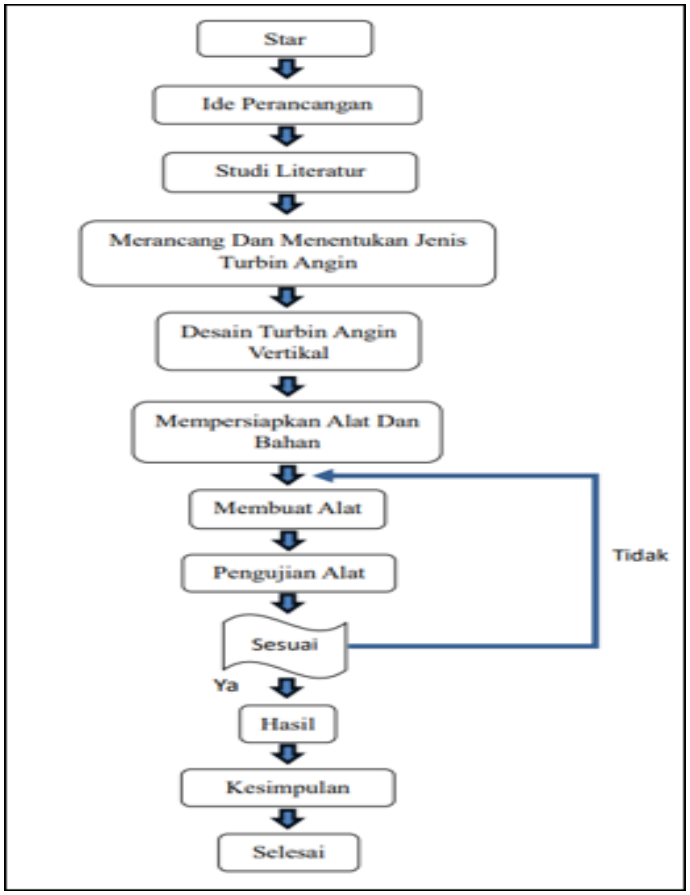
Analisis Data dan Evaluasi Kinerja
Data dari hasil pengujian dianalisis untuk mengevaluasi kinerja turbin dan efisiensinya dalam menghasilkan listrik untuk penerangan jalan. Efisiensi turbin dihitung berdasarkan koefisien daya (Cp) dan efisiensi konversi generator. Analisis ini bertujuan untuk menilai apakah turbin dapat memenuhi kebutuhan daya untuk penerangan jalan dan memberikan rekomendasi untuk peningkatan sistem di masa depan.

2.4. Rencana Desain



Gambar 1. Desain dasar Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) dengan empat bilah setengah lingkaran, dirancang untuk menghasilkan daya mekanik yang kemudian dikonversi menjadi listrik untuk kebutuhan penerangan jalan.

2.5. Proses Fabrikasi



Gambar 2 Flowchart Perancangan

2.6. Penentuan Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin angin sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang efektif di poros turbin, dan selanjutnya menjadi energi listrik melalui generator. Untuk menghitung efisiensi turbin angin, beberapa parameter utama harus diperhitungkan, seperti koefisien daya (Cp), kecepatan angin, dan luas penampang bilah turbin.

Energi Kinetik Angin (P_angin)
Energi kinetik yang dapat dimanfaatkan dari angin dinyatakan sebagai:
Daya Kinetik Angin (P):

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \tag{4}$$

Keterangan :

P adalah daya kinetik angin (Watt),
ρ adalah massa jenis udara (kg/m³),
A adalah luas penampang bilah turbin (m²),
v adalah kecepatan angin (m/s).

Menetukan daya nyata yang dihasilkan turbin

$$P_{turbin} = \frac{1}{2} PAC_p V^3 \quad (5)$$

Keterangan :
P_{turbin} : daya turbin W
C_p : koefisien daya turbin 0.5
Menentukan efisiensi turbin

$$\eta = \frac{P_{turbin}}{P_{angin}} \quad (6)$$

Ada beberapa factor yang mempengaruhi efisiensi turbin angin vertical yaitu desain turbin, kecepatan angin, kondisi lingkungan, perawatan dan kualitas material. Dengan Langkah – Langkah ini, dapat menentukan efisiensi turbin angin vertical secara lebih akurat dan realistis.
Dengan perhitungan ini, penilaian efisiensi turbin dapat dilakukan secara akurat untuk memastikan bahwa sistem memenuhi kebutuhan energi listrik pada kondisi angin yang tersedia.

3 Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian ini mencakup pengujian daya mekanik dan daya listrik yang dihasilkan oleh Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) serta evaluasi efisiensinya dalam memenuhi kebutuhan penerangan jalan. Pengujian dilakukan pada berbagai kecepatan angin, dan data yang dihasilkan dianalisis untuk menilai kinerja sistem. Berikut adalah hasil dan pembahasan perhitungan dari setiap tahap pengujian:

3.1 Perhitungan Daya Mekanik Turbin

Untuk menghitung daya mekanik (P) yang diperoleh sebuah turbin angin, kita bisa menggunakan rumus berikut

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

Keterangan:
P : Daya mekanik (W)
v : kecepatan angin (1,96m/s)
ρ : densitas udara (1,225 kg/m³)

A : luas penampang turbin (1,54 m^2)

Maka :

$P = \frac{1}{2}$ x 1,225 x 1,54 x $(1,96)^3$
P = 0,6125 x 1,54 x 7,529
P = 7,10 W

Jadi daya mekanik yang dihasilkan 7,10 Watt. Namun, ini adalah daya mekanik yang dihasilkan oleh baling-baling dari angin. Daya listrik yang dihasilkan oleh generator bergantung pada efisiensi konversinya. Jika generator memiliki efisiensi η (misalnya, 90%), daya Listrik yang dihasilkan

$$P_{elektrik} = P.\ \eta \tag{8}$$

Dengan asumsi efisiensi generator 90% maka :

$P_{elektrik}$ = 7,10 x 0,9
$P_{elektrik}$ = 6,39 W

Jadi daya Listrik yang dihasilkan oleh generator sekitar 6,39 Watt.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Daya Mekanik dan Listrik Turbin Angin

Parameter	Nilai	Satuan
Kecepatan Angin	1,96	m/s
Luas Penampang Turbin	1,54	m^2
Densitas Udara	1,225	kg/m^3
Daya Mekanik	7,10	Watt
Efisiensi Generator	90%	-
Daya Listrik	6,39	Watt

Menampilkan parameter utama, seperti kecepatan angin, luas penampang turbin, densitas udara, serta daya mekanik dan daya listrik yang dihasilkan berdasarkan efisiensi generator.

3.2 Perhitungan Koefisien Daya Turbin

Untuk menghitung koefisien daya (*Cp*) turbin angin, kita bisa menggunakan rumus berikut:

$$Cp = \frac{2P}{\rho.A.v^3} \tag{9}$$

P : Daya mekanik (W)
v : kecepatan angin (1,96m/s)
ρ : densitas udara (1,225 kg/m^3)
A : luas penampang turbin (1,54 m^2)

Maka :

$$Cp = \frac{2 \times 7{,}10}{1{,}225 \times 1{,}54 \times (1{,}96)^3}$$

$$Cp = \frac{14{,}20}{1{,}225 \times 1{,}54 \times (1{,}96)^3}$$

$$Cp = \frac{14{,}20}{14{,}201}$$

$$Cp = 0{,}50$$

Jadi, koefisien daya (*Cp*) dari turbin angin adalah sekitar 0,5.

Tabel 2. Hasil Koefisien Daya dan Efisiensi Turbin Angin

Parameter	Hasil	Satuan
Koefisien Daya (Cp)	0,50	-
Efisiensi Turbin	45%	-

Memuat nilai koefisien daya (Cp) turbin angin serta efisiensi sistem dalam menghasilkan listrik pada kecepatan angin tertentu.

3.3 Perhitungan Daya Generator

Untuk generator yang di gunakan yaitu generator DC dengan spesifikasi 12-24 volt, untuk mencapai 12 volt di butuhkan putaran sebesar 500 rpm dan bisa menghasilkan Listrik hingga 400 watt.
Untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh generator angin dengan spesifikasi yang-diberikan, kita dapat menghitung menggunakan rumus dibawah ini:

$$P = E \times I \tag{10}$$

Keterangan :

P : daya (Watt)
E : tegangan (Volt)
I : arus (Ampere)

Maka :

P = 12 × 1,05
P = 12,6 Watt

3.4 Perhitungan Efisiensi Turbin

Untuk mengetahui efisiensi turbin dapat di hitung menggunakan beberapa rumus dan parameter:
Menentukan energi yang dapat diekstrak dari angin

$$P_{angin} = \frac{1}{2}\,\rho A V^3 \tag{11}$$

P : Daya mekanik (W)
v : kecepatan angin (1,96m/s)

ρ : densitas udara (1,225 kg/m^3)
A : luas penampang turbin (1,54 m^2)

Maka :

$$P_{angin} = \frac{1}{2}\ 1{,}225\ .1{,}54\ .\ (1{,}95)^3$$
$$P_{angin} = \frac{1}{2}\ 1{,}886\ .\ 7{,}529$$
$$P_{angin} = \frac{1}{2} 14{,}203$$
$$P_{angin} = 7{,}1 \text{ W}$$

Menetukan daya nyata yang dihasilkan turbin

$$P_{turbin} = \frac{1}{2}\ \rho A C_P V^3 \qquad (12)$$

Keterangan :

P_{turbin}: $dayaturbin(W)$
C_p : $Koefisien\ Daya\ Turbin$

Maka :

$$P_{turbin} = \frac{1}{2}\ 1{,}225\ .1{,}54\ .0{,}5\ .\ (1{,}95)^3$$
$$P_{turbin} = \frac{1}{2}\ 1{,}886\ .\ 3{,}764$$
$$P_{turbin} = \frac{1}{2}\ 7{,}099$$
$$P_{turbin} = 3{,}5 \text{ W}$$

Menentukan efisiensi turbin

$$\eta = \frac{P_{turbin}}{P_{angin}} \qquad (13)$$

Maka :

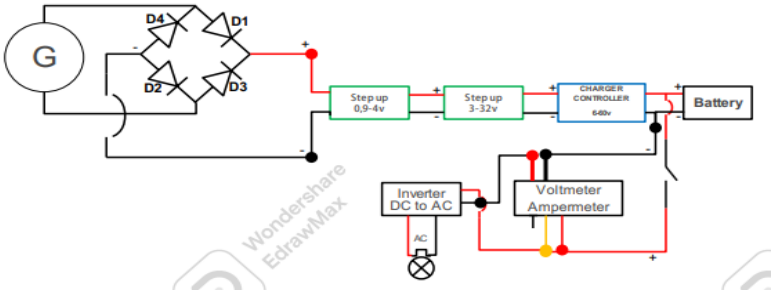
$$\eta = \frac{3{,}5}{7{,}1}$$
$$\eta = 0{,}54$$

3.5 Hasil Pembahasan Dan Pengujian Turbin

Dari hasil pengujian menggunakan blower, turbin angin berputar dan generator dapat menghasilkan Listrik sekitar 1 - 1,2v.

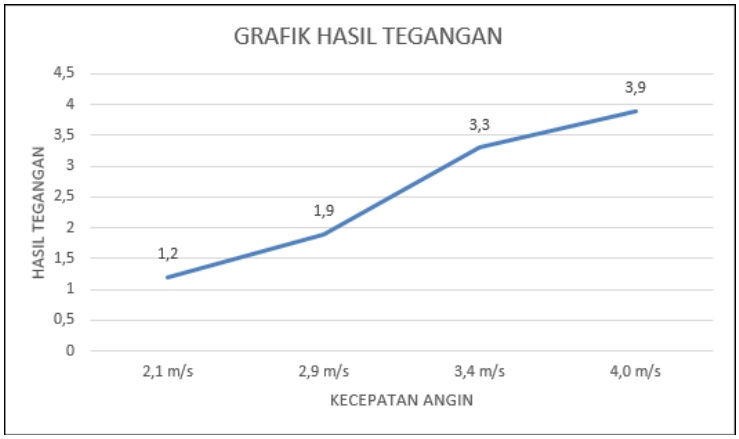
Gambar 3. Output Generator

Untuk melakukan pengisian baterai dibutuh kan tegangan sebesar 12v. Maka untuk menghasilkan tegangan yang di inginkan dapat menggunakan step up, yang berfungsi menaikan tegangan. Gambar berikut menunjukkan cara instalasi Listrik turbin angin vertical:

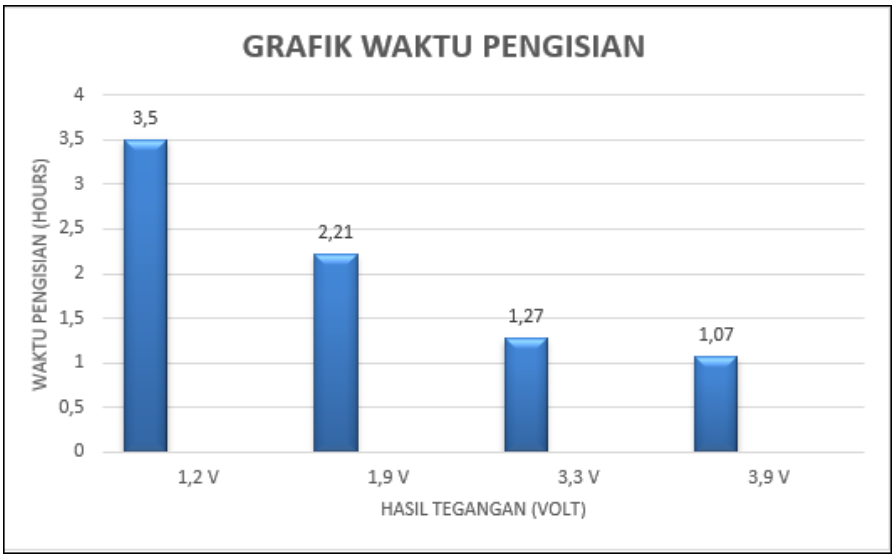


Gambar 4. Diagram Listrik

Apabila tegangan sudah sesuai dengan kebutuhan maka dapat kita ketahui waktu yang dibutuhkan untuk melakukan pengisian baterai.



Gambar 5. Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Mekanik dan Listrik



Gambar 6. Grafik Efisiensi Total Sistem Turbin Angin terhadap Kecepatan Angin
Grafik ini menunjukkan perubahan efisiensi total sistem pembangkit listrik tenaga angin pada berbagai kecepatan angin.

4 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengembangkan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan menggunakan Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) yang dapat digunakan untuk penerangan jalan di daerah dengan akses listrik terbatas. Berdasarkan hasil pengujian, turbin VAWT dengan empat bilah setengah lingkaran mampu menghasilkan daya mekanik sebesar 7,10 Watt pada kecepatan angin rata-rata 1,96 m/s, yang kemudian dikonversi menjadi daya listrik sebesar 6,39 Watt dengan efisiensi generator 90%. Nilai koefisien daya (Cp) sebesar 0,50 menunjukkan efisiensi yang cukup baik untuk turbin angin skala kecil dalam kondisi angin rendah. Efisiensi total sistem sekitar 45%, yang menunjukkan bahwa sistem ini cukup efisien untuk memenuhi kebutuhan penerangan jalan skala kecil.

Implementasi teknologi VAWT ini diharapkan dapat menjadi solusi energi terbarukan yang berkelanjutan untuk penerangan jalan, khususnya di daerah yang sering mengalami keterbatasan pasokan listrik. Dengan kinerja yang stabil dan pemeliharaan yang mudah, turbin VAWT memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut guna meningkatkan efisiensi dan kapasitas daya. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi positif dalam pemanfaatan energi angin sebagai sumber listrik alternatif yang ramah lingkungan dan mendukung pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

References

1. E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2006.
2. T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2001.
3. J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009.
4. M. Gipe, *Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business*, 2nd ed. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing, 2004.
5. I. Astu Pudjanarsa and D. Nursuhud, *Mesin Konversi Energi*. Yogyakarta, Indonesia: Andi, 2006.
6. R. Gasch and J. Twele, *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2012.
7. R. Saidur, M. R. Islam, and N. A. Rahim, *Renewable Energy in Developing Countries: Challenges and Opportunities*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
8. R. I. Putri, M. H. Purnomo, A. Priyadi, and M. P. Pujiantara, *Teknologi Konversi Energi Angin*. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2019.
9. A. M. Breeze, *Power Generation Technologies*, 2nd ed. Boston, MA: Newnes, 2014.
10. S. Hirman, *Energi Angin*. Yogyakarta, Indonesia: Andi, 2019.