

Kaji Experimental Pengaruh Jumlah Sudu Dan Sudut Sudu Turbin Angin Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Satrya Dirga Agung Prasetyo^a, Bayu Saputro^b, M Slamet^c, Supardi^d, Ismail^e, Zainun Achmad^f

^{a,b,c,d,e,f}Department of Mechanical Engineering, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 Oktober 2025

Received in revised form

3 November 2025

Accepted 5 November 2025

Available online 30 November 2025

Keywords:

wind power plant, wind energy, wind turbine, U-type Savonius turbine, vertical wind turbine

ABSTRACT

This research explores the potential of coastal wind resources as a sustainable and renewable energy source, with a focus on their application for electricity generation in coastal regions. Although coastal areas possess substantial wind energy potential, the level of utilization remains limited due to technical, structural, and environmental constraints. Therefore, this study aims to analyze, design, and evaluate a wind turbine system that can optimize wind energy conversion, thereby providing an alternative and environmentally friendly source of electrical power for coastal communities. The study develops a prototype of an alternative power generation system that converts wind-driven kinetic energy into electrical energy using two Savonius turbine configurations: the U-type Savonius turbine and the vertical Savonius wind turbine. The research specifically investigates the influence of blade quantity and blade angle variations in order to identify the most effective configuration capable of producing the highest power output. For the U-type turbine, blade numbers of 2 and 4 are examined, while the vertical Savonius turbine utilizes configurations of 3 and 4 blades. The blade angles evaluated in both turbine types include 10°, 15°, and 20°. The system operates by harnessing wind flow to rotate the turbine blades, which in turn drive a central shaft connected directly to a power generator. As wind speed increases, the rotational velocity of the shaft rises proportionally, resulting in higher levels of electrical energy production. The findings of this study are expected to provide valuable insights into the optimization of small-scale wind energy systems and support the development of renewable energy solutions tailored to coastal environments.

1 Pendahuluan

Seiring dengan kemajuan peradaban manusia, kebutuhan energi mengalami peningkatan yang signifikan, terutama akibat pertumbuhan sektor industri global. Kondisi ini menuntut tersedianya sumber energi yang mampu memenuhi permintaan yang terus meningkat. Selama ini, energi fosil menjadi sumber utama yang banyak digunakan. Namun, keterbatasan cadangan bahan bakar fosil menjadikannya ketergantungan terhadap sumber energi tersebut tidak berkelanjutan, sehingga diperlukan alternatif ketika ketersediaannya semakin menurun [1]. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi baru dan terbarukan menjadi sangat penting untuk mengatasi berbagai permasalahan yang berkaitan dengan penggunaan energi fosil serta memastikan keberlanjutan pasokan energi di masa mendatang.

Energi baru dan terbarukan (EBT) menawarkan solusi alternatif yang mulai banyak dilihat untuk menggantikan sumber energi konvensional. Ketersediaannya di alam yang terus-menerus diperbarui membuat energi terbarukan tidak perlu dikhawatirkan akan habis. Manfaat penggunaannya bagi kehidupan manusia pun sangat beragam. Di sisi lain, ketergantungan pada bahan bakar fosil telah menimbulkan berbagai dampak merugikan bagi lingkungan. Penggunaan energi fosil tidak hanya mencemari udara, tetapi juga mempercepat pemanasan global sehingga mengancam keseimbangan ekosistem. Dalam konteks ini, energi angin termasuk salah satu sumber daya yang menjanjikan dan dapat dikembangkan lebih lanjut [2], [3], [4].

Pada penelitian sebelumnya, kajian ini difokuskan pada analisis pengaruh variasi sudut sudu dan jumlah sudu terhadap kinerja turbin angin Savonius tipe U. Kombinasi kedua parameter tersebut dievaluasi untuk memahami karakteristik daya serta efisiensi turbin. Pemilihan model Savonius tipe U dilakukan untuk mengidentifikasi konfigurasi yang mampu menghasilkan daya keluaran secara optimal.

2 Landasan Teori

Penelitian ini membaca dan mengumpulkan informasi sebanyak mungkin untuk memperbarui penelitian turbin sebelumnya. Angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat berpotensi untuk dikembangkan di kawasan tropis seperti Indonesia, khususnya di wilayah pesisir yang memiliki kecepatan angin rata-rata

cukup konsisten. Pemanfaatan ini dilakukan melalui turbin angin yang mengubah energi kinetik dari hembusan angin menjadi energi listrik. Turbin ini secara umum dibedakan menjadi dua jenis, yaitu turbin dengan sumbu horizontal (HAWT) dan turbin dengan sumbu vertikal (VAWT). Di antara jenis VAWT, turbin Savonius menjadi pilihan populer karena konstruksinya yang sederhana, kemampuannya untuk mulai berputar sendiri (self-start),

serta dapat berfungsi dengan baik pada kecepatan angin rendah tanpa sistem pengarah (yaw) [5]. Kinerja turbin Savonius sangat dipengaruhi oleh bentuk sudu, jumlah bilah, dan sudut pemasangannya. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perbedaan bentuk bilah, seperti tipe-U, tipe-V, dan tipe-L, memiliki pengaruh terhadap arah aliran angin dan kecepatan rotasi rotor [6]. Oleh sebab itu, analisis eksperimental terhadap jumlah dan sudut bilah sangat penting untuk meningkatkan efisiensi konversi energi angin menjadi listrik, terutama pada wilayah dengan kondisi angin berkecepatan rendah.

3 Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang melibatkan proses perancangan dan pembuatan turbin angin, diikuti dengan pengujian untuk memperoleh data kinerja. Pengujian dilakukan pada berbagai variasi bentuk sudu dan sudut sudu guna mengukur karakteristik performa serta efisiensi turbin[7].

Fokus utama penelitian adalah menganalisis pengaruh variasi bentuk dan sudut sudu pada turbin angin Savonius tipe U dan Vertikal Wind. Kombinasi parameter tersebut dipilih untuk mengidentifikasi konfigurasi turbin yang mampu menghasilkan daya secara optimal[8].

Tahapan penelitian meliputi persiapan alat dan material, pelaksanaan uji performa turbin, pengambilan data di kawasan Pantai Kenjeran, serta pengolahan dan analisis data. Landasan teori yang mendukung penelitian dihimpun dari berbagai sumber literatur. Setelah data diperoleh dan diolah, hasilnya dievaluasi berdasarkan keterkaitannya dengan rumusan masalah, tujuan penelitian, serta teori yang digunakan sebagai acuan[9].

3.1 Persamaan

1. Daya Turbin Angin

Seperti yang diketahui, energi kinetik adalah jenis energi yang terkandung dalam angin, benda dengan massa (m) dan kecepatan (v)

adalah $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ dengan ketentuan v tidak mendekati kecepatan cahaya. Rumus ini juga berlaku untuk angin yang merupakan udara bergerak[10].

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_a^2$$

Keterangan:

E_k = Energi kinetik (Joule)

m = Massa udara (kg/m^2)

v = Kecepatan angin (m/s) (1)

2. Pengaruh Variasi Sudut Sudu Terhadap Performa Turbin

Mengubah sudut bilah merupakan salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi turbin angin. Dengan meningkatkan sudut ini, gaya angkat dapat dihasilkan, yang akan meningkatkan kecepatan putar. Stall dapat terjadi ketika gaya hambat bilah airfoil meningkat dan kecepatan putar turbin turun karena sudut pemasangan bilah yang terlalu lebar [11]. Rumus tersebut digunakan untuk menentukan besar sudut β (pitch).

$$\beta = \arctan\left(\frac{2r}{3r \cdot \text{TSR}}\right) - \theta$$

Keterangan:

B = Sudut Sudut pemasangan sayap

r = Jari-jari rotor(m)

TSR = Rasio Kecepatan Ujung

θ = Sudut sayap (2)

3. Tip Speed Ratio (TSR)

Rasio kecepatan ujung menunjukkan bagaimana kecepatan rotor dipengaruhi oleh kecepatan angin bebas tertentu. Rasio kecepatan ujung turbin angin dengan bilah pengangkat lebih tinggi daripada turbin angin dengan hambatan[12]. Persamaan ini digunakan untuk menghitung rasio kecepatan ujung:

$$\lambda = \frac{\pi D n}{60 V_a}$$

(Sumber; I.B Alit, 2016)

Keterangan:

λ = Ratio kecepatan tip

n = kecepatan Putaran Rotor (Rpm)

D = Diameter Rotor (m)

V_a = Kecepatan angin (m/s) (3)

4. Daya Generator

Generator listrik dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan menggunakan sumber energi mekanik. Induksi elektromagnetik adalah dasar dari prinsip kerja generator listrik. Generator dibagi menjadi generator DC dan generator AC berdasarkan jenis arusnya[13]. Generator DC dan AC menghasilkan energi listrik yang diperlukan untuk menyalaikan turbin angin Savonius. Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung daya generator:

$$P_{\text{gen}} = V_{\text{gen}} \cdot I_{\text{gen}}$$

Keterangan:

P_{gen} = Daya generator (watt)

V_{gen} = Tegangan (Volt)

I_{gen} = Arus (Ampere) (4)

5. Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem dihitung dengan perbandingan daya yang dihasilkan oleh generator dengan daya yang dihasilkan oleh angin. Sehingga rumus untuk efisiensi sistem dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta_{\text{sis}} = \frac{P_{\text{gen}}}{P_a} \cdot 100\%$$

Keterangan:

η_{sis} = efisiensi sistem (%)

P_{gen} = daya generator (watt)

P_a = daya turbin angin (Watt) (6)

6. Perhitungan BHP

BHP adalah daya hasil turbin yang kurang karena direduksi oleh gaya-gaya pembebahan yang disebabkan oleh generator, shaft, dan perangkat tambahan lainnya. Untuk mengetahui nilai BHP dituliskan rumus sebagai berikut:

$$\text{BHP} = \frac{P_g}{n_{\text{sis}}}$$

BHP = Brake horse power (watt)

P_g = Daya generator (watt)

n_{sis} = Efisiensi sistem (%) (7)

3.2 Tabel

Tabel 1. Data hasil pengujian turbin angin Tipe-U

Tipe Turbin	Waktu (5 Menit)	Sudut Sudu	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
Savonius Tipe-U	Pengujian 1	10°	223,1	3,4	2,5
	Pengujian 2	10°	196,3	3,1	2,2
	Pengujian 3	10°	209,7	3,3	2,4
	Rata-rata		209,7	3,26	2,3
	Pengujian 1	15°	186,1	2,9	1,8
	Pengujian 2	15°	194,9	3,0	2,1
	Pengujian 3	15°	180,5	2,7	1,58
	Rata-rata		187,1	2,86	1,82
	Pengujian 1	20°	174,0	2,5	1,5
	Pengujian 2	20°	155,2	2,3	1,4
	Pengujian 3	20°	182,0	2,7	1,6
	Rata-rata		170,4	2,5	1,5

Tipe Turbin	Waktu (5 Menit)	Jumlah Sudu	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
Savonius Tipe-U	Pengujian 1	2	179,9	3,0	2,9
	Pengujian 2	2	163,8	2,9	2,5
	Pengujian 3	2	137,2	2,5	2,4
	Rata-rata		160,3	2,8	2,6
	Pengujian 1	3	298,1	4,0	3,1
	Pengujian 2	3	241,9	3,6	2,7
	Pengujian 3	3	260,3	3,8	2,9
	Rata-rata		266,7	3,8	2,9

Tabel 2. Data hasil pengujian turbin angin Tipe-Vertikal Wind

Tipe Turbin	Waktu (5 Menit)	Sudut Sudu	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
Savonius Tipe-U Vertikal Wind	Pengujian 1	10°	130,3	2,2	1,3
	Pengujian 2	10°	149,6	2,4	1,5
	Pengujian 3	10°	127,9	1,8	1,21
	Rata-rata		135,9	2,1	1,3
	Pengujian 1	15°	129,5	2,1	1,28
	Pengujian 2	15°	125,3	1,9	1,25
	Pengujian 3	15°	120,7	1,7	1,1
	Rata-rata		125,1	1,9	1,21
	Pengujian 1	20°	118,0	1,67	1,28
	Pengujian 2	20°	122,4	1,8	1,22
	Pengujian 3	20°	107,3	1,78	1,02
	Rata-rata		115,9	1,75	1,17

Tipe Turbin	Waktu (5 Menit)	Jumlah Sudu	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
Savonius Tipe-Verikal Wind	Pengujian 1	3	120,8	1,7	1,3
	Pengujian 2	3	116,5	1,9	1,1
	Pengujian 3	3	108,2	1,5	1,05
	Rata-rata		115,1	1,7	1,15
	Pengujian 1	4	150,9	2,1	1,4
	Pengujian 2	4	158,1	2,5	1,5
	Pengujian 3	4	122,5	1,94	1,15
Rata-rata			143,8	2,18	1,35

Tabel 3. Hasil Perhitungan Karakteristik Turbin Angin Tipe-U

NO	Perhitungan	Jenis Sudu/Bilah				
		Bilah U			Bilah U	
		10°	15°	20°	2 bilah	4 bilah
1	Daya Turbin Angin	3,91 Watt	4,03 Watt	4,21 Watt	8,98 Watt	9,89 Watt
2	Sudut Pasang Sudu	29°	24°	17°	41°	29°
3	Tip Speed Rasio (TSR)	0,822	0,831	0,871	0,763	1,19
4	Daya Generator	3,75 Watt	5,20 Watt	7,49 Watt	7,28 Watt	11,0 Watt
5	Efisiensi Sistem	0,95%	1,23%	1,77%	0,81%	1,11%
6	BHP	3,91 Watt	4,22 Watt	4,23 Watt	8,96 Watt	9,9 Watt

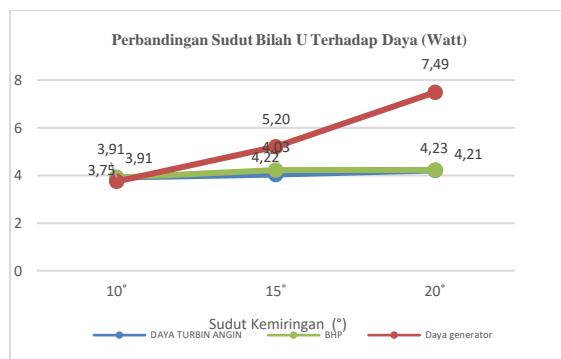
Tabel 4. Hasil Perhitungan Karakteristik Turbin Angin Tipe-Vertikal Wind

NO	Perhitungan	Jenis Sudu/Bilah				
		Bilah Vertikal Wind			Bilah Vertikal Wind	
		10°	15°	20°	3 bilah	4 bilah
1	Daya Turbin Angin	1,44 Watt	1,57 Watt	1,69 Watt	2,1 Watt	2,26 Watt
2	Sudut Pasang Sudu	42°	36°	30°	53°	49°
3	Tip Speed Rasio (TSR)	0,505	0,507	0,511	0,49	0,575
4	Daya Generator	1,75 Watt	2,29 Watt	2,73 Watt	1,95 Watt	2,94 Watt
5	Efisiensi Sistem	1,41%	1,45%	1,61%	0,98%	1,30%
6	BHP	1,44 Watt	1,57 Watt	1,69 Watt	2,1 Watt	1,92 Watt

4 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari berbagai variasi sudut suhu (10° , 15° , 20°) dan jumlah bilah pada turbin angin Savonius kedua jenis Tipe-U (bilah 2 & 4) dan Vertikal-Wind (bilah 3 & 4) konfigurasi dengan sudut 20° dan 4 bilah menghasilkan performa paling optimal dalam hal torsi dan output daya, menandingi semua kombinasi lainnya.

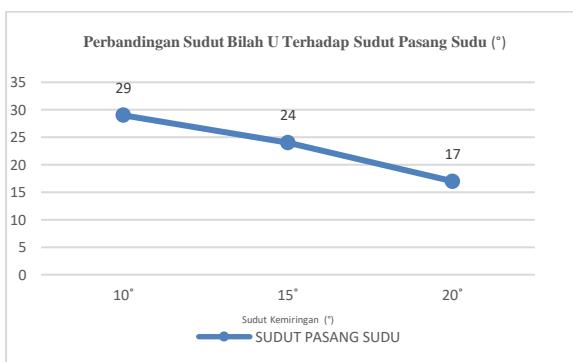
1 Grafik 1. hasil pengujian Jenis Bilah U terhadap daya (Watt)



Gambar 1. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Daya (Watt)

Hasil analisis grafik menunjukkan bahwa bilah tipe U menghasilkan daya keluaran tertinggi pada sudut tertentu. Pencapaian daya maksimum ini dipengaruhi oleh sudut bilah yang cukup besar sehingga mampu mencegah terjadinya hambatan atau kmacetan pada pergerakan bilah.

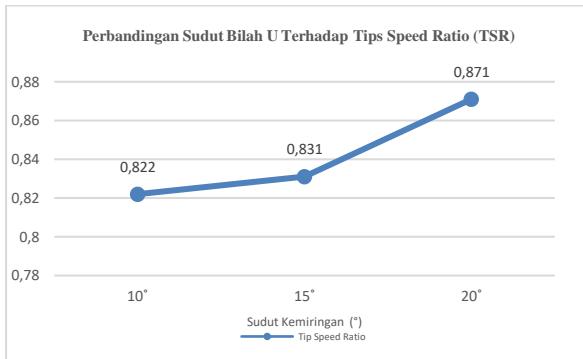
2. Grafik 2. Hasil pengujian Jenis



Gambar 2. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Sudut Pasang Sudu

Menurut temuan analisis grafik, gaya angkat meningkat seiring dengan sudut bilah U, sehingga turbin berputar tepat saat turbin dengan sudut terbesar bekerja.

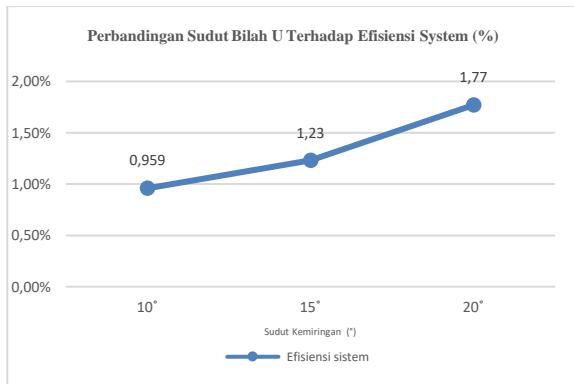
3. Grafik 3. Hasil Pengujian Jenis Bilah U Terhadap Tip Speed Ratio (TSR)



Gambar 3. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Tip Speed Ratio (TSR)

Menurut hasil analisis grafik, rasio menurun seiring dengan peningkatan sudut bilah U, dan nilai yang diperoleh meningkat seiring dengan penurunan sudut bilah.

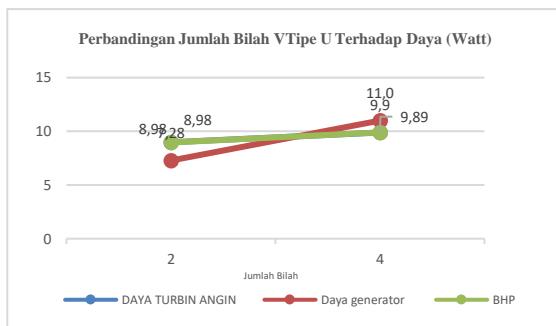
4. Grafik 4. Hasil pengujian Jenis Bilah U



Gambar 4. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Efisiensi Sistem

Hasil analisis grafik menunjukkan bahwa peningkatan ukuran sudut U-blade berbanding lurus dengan efisiensinya, sedangkan pengurangan ukuran sudut akan berdampak pada turunnya efisiensi system yang di peroleh.

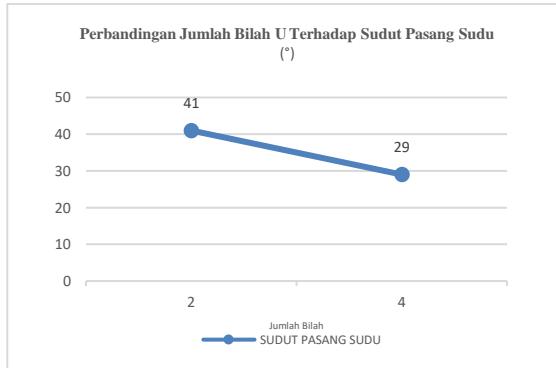
5. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah U Terhadap Daya (Watt)



Gambar 5. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Daya (Watt)

Hasil analisis grafik menunjukkan bahwa daya keluaran meningkat seiring dengan jumlah sudut bilah U. Hal ini karena ada cukup banyak bilah untuk mencegah bilah macet.

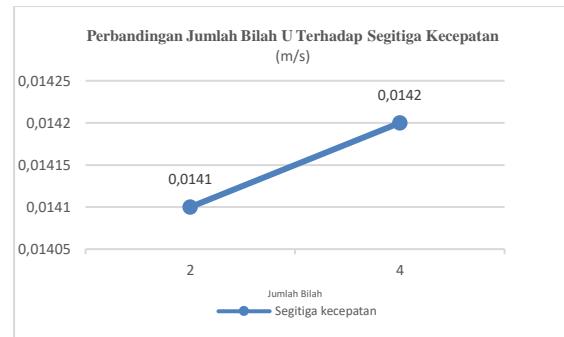
6. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah U Terhadap Sudut Pasang Suhu (%)



Gambar 6. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Sudut Pasang Suhu (%)

Analisa dari grafik mengindikasikan bahwa penggunaan batang yang lebih banyak berhubungan dengan hasil yang semakin buruk; sebaliknya, penggunaan batang yang lebih sedikit menghasilkan hasil yang lebih baik .

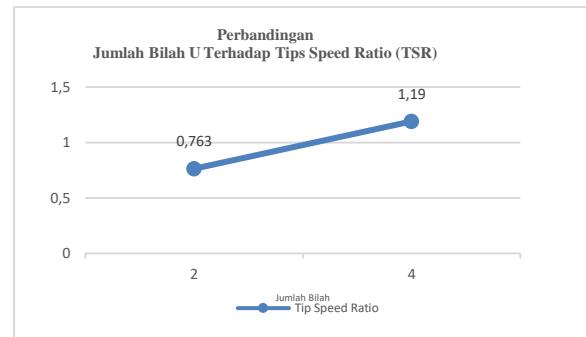
7. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah U Terhadap Segitiga Kecepatan (m/s)



Gambar 7. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Segitiga Kecepatan (m/s)

Temuan analisis visual memperlihatkan bahwa semakin banyak batang, semakin baik hasilnya, dan semakin sedikit batang, semakin baik hasilnya.

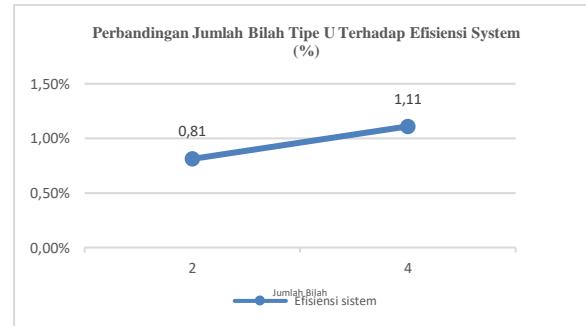
8. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah U Terhadap Tips Speed Ratio (TSR)



Gambar 8. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Tips Speed Ratio (TSR)

Hasil analisis grafik menunjukkan bahwa nilai rasio mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah bilah, namun cenderung menurun ketika jumlah bilah dikurangi.

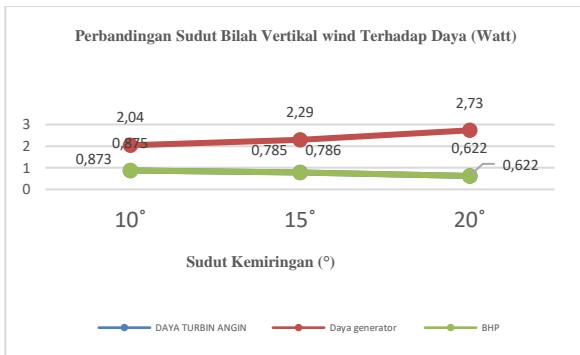
9. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah U Terhadap Efisiensi Sistem (%)



Gambar 9. Grafik Jenis Bilah U Terhadap Efisiensi Sistem (%)

Hasil analisa dari grafik mengindikasikan bahwa semakin banyak batang, semakin tinggi nilainya, sedangkan semakin sedikit bilah menghasilkan nilai efisiensi sistem yang lebih rendah.

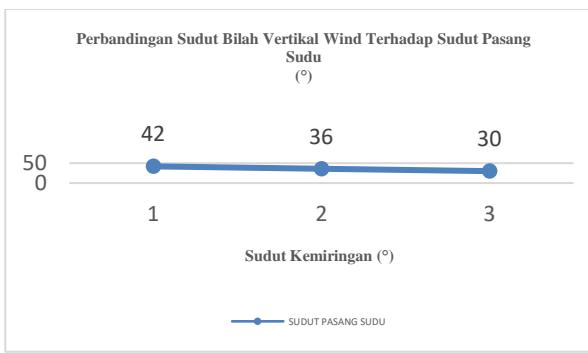
10. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Daya (Watt)



Gambar 10. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Daya (Watt)

Hasil analisis grafik menunjukkan bahwa daya keluaran pada bilah angin vertikal mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya sudut kemiringan bilah. Kondisi ini terjadi karena sudut yang terlalu besar berperan dalam mencegah terjadinya hambatan atau macetnya pergerakan bilah, sehingga berdampak pada berkurangnya efisiensi konversi daya.

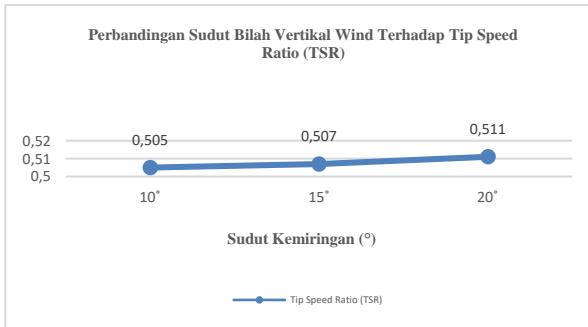
11. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Sudut Pasang Sudu



Gambar 11. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Sudut Pasang Sudu

Sudut bilah vertikal terbesar menghasilkan daya angkat paling kecil, menurut analisis grafis. Ini memungkinkan turbin berputar pada sudut terkecil.

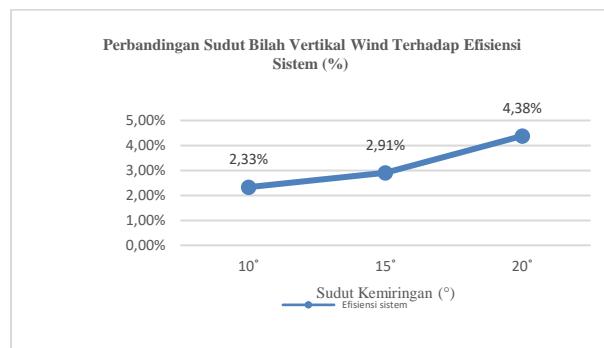
12. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Tip Speed Ratio (TSR)



Gambar 12. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Tip Speed Ratio (TSR)

Hasil analisis grafik menunjukkan bahwa rasio serta nilai parameter yang diamati mengalami peningkatan seiring bertambahnya sudut bilah angin vertikal. Sebaliknya, nilai tersebut cenderung menurun ketika sudut bilah bergerak menjauhi posisi vertical.

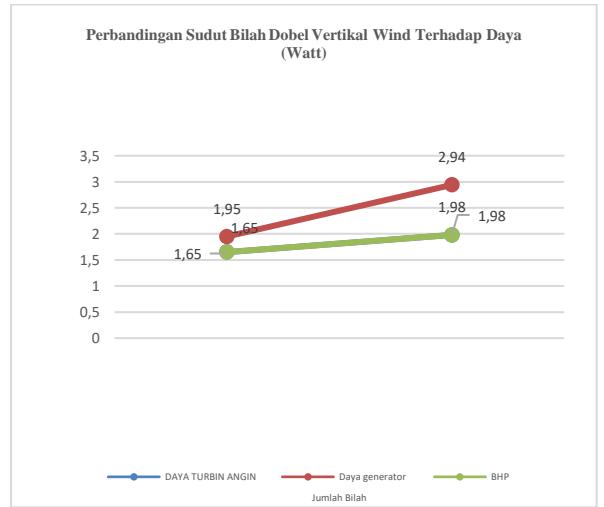
13. Grafik Hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Efisiensi Sistem (%)



Gambar 13. Perbandingan Efisiensi Sistem (%) pada Berbagai Jenis Bilah Vertikal Wind

Menurut hasil analisis grafik, nilai efisiensi yang dihasilkan oleh Berdasarkan hasil analisis grafik, efisiensi bilah angin vertikal menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya sudut bilah. Sebaliknya, efisiensi sistem cenderung menurun ketika sudut bilah dikurangi.

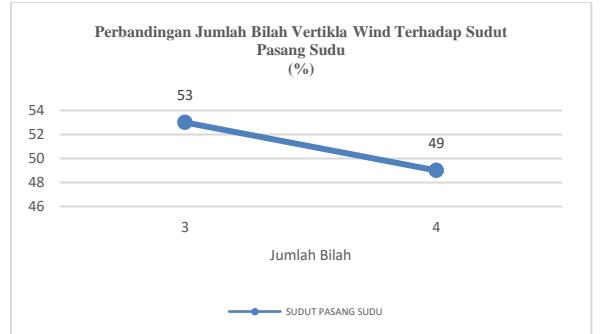
14. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Daya (Watt)



Gambar 14. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Daya (Watt)

Temuan analisis grafik menunjukkan bahwa daya keluaran meningkat seiring dengan jumlah bilah angin vertikal. Hal ini karena ada cukup banyak bilah untuk mencegah bilah tersebut macet.

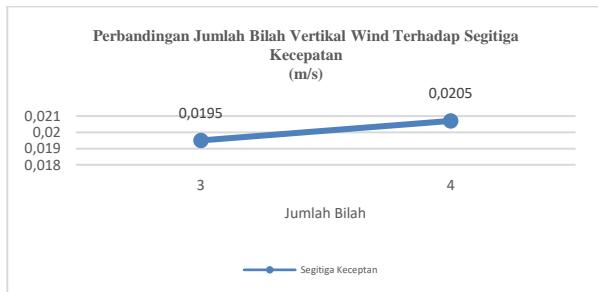
15. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Sudut Pasang Sudu (%)



Gambar 15. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Sudut Pasang Sudu (%)

Hasil pemantauan visual mengindikasikan bahwa dengan bertambahnya jumlah batang yang di gunakan, hasilnya menjadi semakin buruk, sementara ketika jumlah batang yang di gunakan berkurang, hasilnya menjadi lebih baik.

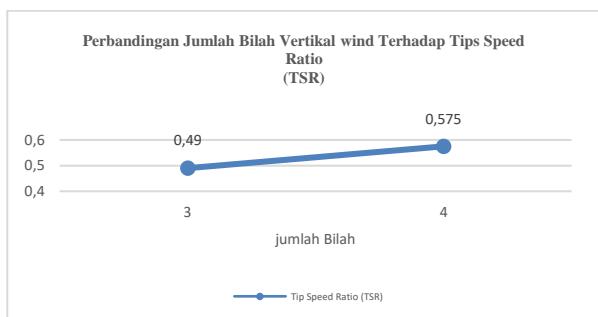
16. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Segitiga Kecepatan (m/s)



Gambar 16. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Segitiga Kecepatan (m/s)

Berdasarkan grafik, terlihat bahwa konfigurasi dengan jumlah bilah yang lebih banyak memberikan performa yang lebih tinggi, sementara penggunaan bilah dalam jumlah lebih sedikit menghasilkan performa yang menurun.

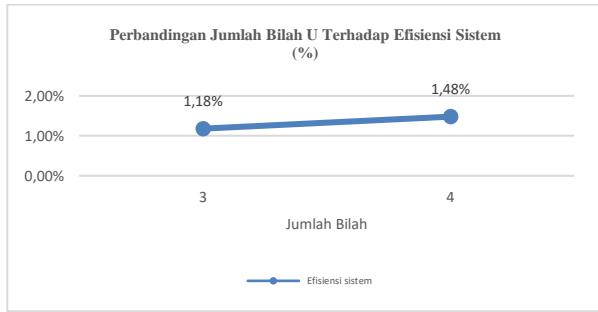
17. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Tip Speed Ratio (TSR)



Gambar 17. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Tip Speed Ratio (TSR)

Temuan analisis grafik menunjukkan bahwa nilai rasio meningkat seiring dengan jumlah bilah dan menurun seiring dengan jumlah bilah.

18. Grafik hasil pengujian Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Efisiensi Sistem (%)



Gambar 18. Grafik Jenis Bilah Vertikal Wind Terhadap Efisiensi Sistem (%)

Nilai efisiensi sistem meningkat seiring dengan jumlah bilah, sedangkan nilai efisiensi sistem yang dihasilkan menurun seiring dengan jumlah bilah, menurut hasil analisis grafik.

5.Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan jumlah bilah dari 2 menjadi 4 memberikan pengaruh signifikan terhadap kenaikan putaran (RPM) dan daya keluaran. Pada turbin tipe U, konfigurasi 2 bilah pada kecepatan angin 3,3 m/s menghasilkan 160,2 RPM dan daya 32,7 W, sedangkan konfigurasi 4 bilah pada 3,5 m/s mampu mencapai 266,7 RPM dan 39,2 W. Pola serupa juga terlihat pada turbin vertikal, di mana penggunaan 3 bilah pada 3,2 m/s menghasilkan 115,1 RPM dan 1,65 W, sedangkan 4 bilah pada 3,4 m/s meningkat menjadi 143,8 RPM dan 1,95 W. Variasi sudut bilah turut menunjukkan pengaruh penting terhadap performa sistem. Sudut 10° menghasilkan daya maksimum, yakni 3,97 W pada turbin tipe U dan 0,871 W pada turbin vertikal. Kondisi ini terjadi karena sudut kecil memungkinkan aliran angin melewati bilah dengan lebih lancar, mengurangi turbulensi serta menurunkan getaran, sehingga meningkatkan stabilitas dan efisiensi konversi energi. Efisiensi tertinggi untuk tipe U tercatat sebesar 0,944% pada sudut 10° dengan 4 bilah, sedangkan pada turbin vertikal efisiensi maksimum sebesar 1,98% diperoleh pada konfigurasi 4 bilah dan sudut 20°. Hasil grafik menunjukkan kecenderungan bahwa meskipun peningkatan jumlah bilah mampu meningkatkan daya, nilai efisiensi cenderung menurun. Sebaliknya, konfigurasi dengan efisiensi lebih tinggi menghasilkan daya yang lebih stabil dan optimal. Fenomena ini berkaitan dengan massa bilah, luas penangkapan angin, serta hubungan antara kecepatan angin dan kecepatan putar yang tercermin dalam nilai tip-speed ratio (TSR).

Kontribusi Penulis

Penulis 1 dan Penulis 2 menangani konseptualisasi, sementara metodologi dikembangkan oleh Penulis 1 dan Penulis 3; perangkat lunak dan validasi dilakukan oleh Penulis 1, dibantu oleh Penulis 2, 3, dan 4. Analisis formal dikerjakan oleh Penulis 1 dan 3, investigasi dilakukan oleh Penulis 2 dan 4, sumber daya disediakan oleh Penulis 5, kurasi data dilakukan oleh Penulis 2 dan 5, penulisan draf awal oleh Penulis 1 dan 2, peninjauan serta penyuntingan oleh Penulis 3 dan 4. Visualisasi data oleh Penulis 2 dan 4, pengawasan keseluruhan oleh Penulis 1 dan 5, dan administrasi proyek ditangani oleh Penulis 5.

Ucapan Terima Kasih

Alhamdulillah, penulis berterima kasih kepada Allah atas kasih sayang dan hidayah-Nya. Penelitian ini adalah Langkah dasar yang krusial dalam kemajuan teknologi energi yang dapat di perbarui, terutama dalam sektor mikrohidro. Di harapkan hasilnya bisa berkontribusi pada pengembangan turbin ulir sebagai alternatif yang inovatif dan pantas untuk memenuhi kebutuhan energi warga.

REFERENSI

- [1] Y. Daryanto, *Kajian Potensi Angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: BALAI PPTAGG – UPT-LAGG, 2007.
- [2] H. Alamsyah, *Pemanfaatan Turbin Angin Dua Sudu Sebagai Penggerak Mula Alternator pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin*. Semarang: Universitas Negeri Semarang, 2007.
- [3] F. Soelaiman, N. P. Tandian, and N. Rosidin, “Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Prototipe SKEA Menggunakan Rotor Savonius dan Windside untuk Penerangan Jalan Tol,” Bandung: ITB, 2006.
- [4] M. S. Rassoulinejad-Mousavi, “Experimental Study of a Combined Three Bucket H-Rotor with Savonius Wind Turbine,” Department of Renewable Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran, 2013.
- [5] H. Darmawan, I. Kahfi, and B. St, “Perancangan turbin angin tipe Savonius I sumbu vertikal,” Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tanjung Pinang, pp. 1–13, 2015.
- [6] L. Salim, S. Poernomo Sari, and I. Setyawan, “Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tipe U dengan Memvariasikan Jumlah Sudu Turbin,” *Jurnal Penelitian Enjiniring (JPE)*, vol.

- 24, no. 2, 2020, doi: 10.25042/jpe.112020.07.
- [7] M. Satyajith, Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Berlin, Germany: Springer, 2005.
 - [8] F. W. Sears and M. W. Zemansky, Fisika untuk Universitas 1. Jakarta: Binacipta, 1962.
 - [9] T. D. Maulana, Pembuatan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Portable, 2019.
 - [10] E. S. Wijianti, Y. Setiawan, and A. F. Karim, "Effect of Blade Profile Models on Savonius Wind Turbine Performance," vol. 9, 2019.
 - [11] S. B. Widodo, E. M. Silalahi, and A. Priyono, "Pengaruh Jumlah Bilah dan Sudut Pasang terhadap Daya Turbin Angin H-Darrieus Termodifikasi sebagai Pembangkit Tenaga Listrik Skala Rumah Tangga," Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia, Jakarta, 2019.
 - [12] I. B. Alit, "Turbin angin poros vertikal tipe Savonius bertingkat dengan variasi posisi sudut," Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, 2016.
 - [13] M. R. Faturrochman, I. Guntara, A. H. Andriawan, et al., "Pengaplikasian Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tipe Turbin Screw di Desa Sendi, Pacet, Kabupaten Mojokerto," Elsains: Jurnal Elektro, 2021.

Halaman ini sengaja dikosongkan