

ANALISIS PERFORMA TURBIN ANGIN VERTIKAL SAVONIUS -U DENGAN VARIASI PANJANG DAN BAHAN SUDU

Ahmad Irfan¹, Mohammad Anshori², Aprilia Dwi Ardianti³

ai0910758@gmail.com

Universitas Nahdlatul Ulama Sunan Giri Bojonegoro

ABSTRAK

Energi listrik dapat diperoleh dengan memanfaatkan energi angin melalui bantuan turbin angin. Salah satu jenis turbin angin yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah adalah turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius-U. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa turbin dengan variasi panjang sudu (20 cm, 30 cm, dan 40 cm) serta dua jenis bahan sudu, yaitu pipa PVC dan gentong plastik. Pengujian dilakukan di pesisir Pantai Tuban selama 10 menit untuk masing-masing kombinasi variasi, dengan pencatatan data setiap satu menit. Parameter yang diamati meliputi kecepatan angin, tegangan, dan arus listrik, yang kemudian digunakan untuk menghitung daya output. Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi panjang sudu 40 cm dengan bahan PVC menghasilkan daya output tertinggi sebesar 0,852 Watt pada kecepatan angin 6,2 m/s. Temuan ini sejalan dengan teori bahwa semakin panjang sudu dan semakin ringan bahan yang digunakan, maka luas sapuan dan momen inersia sudu akan meningkat, sehingga mampu menangkap energi angin lebih optimal. Hal ini diperkuat oleh hasil penelitian Fachrudin & Astuti (2021), yang menyatakan bahwa peningkatan panjang sudu berbanding lurus dengan peningkatan daya turbin, serta penelitian Ramadhani et al. (2024) yang menyebutkan bahwa material ringan seperti PVC mampu bekerja lebih efisien pada kecepatan angin rendah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi panjang dan material sudu memberikan pengaruh signifikan terhadap performa turbin angin vertikal Savonius-U, dan hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan turbin angin skala kecil yang efisien dan ekonomis, khususnya untuk wilayah dengan kecepatan angin rendah.

Kata Kunci: Turbin Angin Vertikal, Savonius-U, Panjang Sudu, Bahan Sudu, Daya Output, PVC, Gentong Plastik.

ABSTRACT

Electrical energy can be obtained by harnessing wind energy through the use of wind turbines. One type of wind turbine that is capable of operating at low wind speeds is the Savonius-U vertical axis wind turbine. This study aims to analyze the performance of turbines with variations in blade length (20 cm, 30 cm, and 40 cm) and two types of blade materials, namely PVC pipes and plastic drums. The testing was conducted on the coast of Tuban for 10 minutes for each combination, with data recorded every minute. The observed parameters included wind speed, voltage, and electric current, which were then used to calculate the output power. The analysis showed that the combination of a 40 cm blade length and PVC material produced the highest output power of 0.852 Watts at a wind speed of 6.2 m/s. This finding aligns with the theory that longer blades and lighter materials increase the swept area and moment of inertia, allowing the turbine to capture wind energy more effectively. These results are supported by the study of Fachrudin & Astuti (2021), which stated that increasing blade length is directly proportional to increased turbine power, as well as by the research of Ramadhani et al. (2024), which concluded that lightweight materials like PVC are more efficient at low wind speeds. Therefore, it can be concluded that the combination of blade length and material significantly affects the performance of the Savonius-U vertical axis wind turbine. The results of this research are expected to serve as a reference for the development of efficient and economical small-scale wind turbines, particularly in regions with low wind speeds.

Keywords: Vertical Wind Turbine, Savonius-U, Blade Length, Blade Material, Output Power, PVC, Plastic Drum.

PENDAHULUAN

Meningkatnya kebutuhan energi global mendorong eksplorasi terhadap sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Salah satu sumber energi yang memiliki potensi besar adalah energi angin, yang dapat dimanfaatkan melalui teknologi turbin angin. Di Indonesia, potensi energi angin diperkirakan mencapai 60,6 GW, namun pemanfaatannya masih sangat rendah, yaitu kurang dari 1% dari total potensi yang tersedia (Kementerian ESDM, 2023). Oleh karena itu, pengembangan teknologi turbin angin yang efisien, ekonomis, dan sesuai dengan karakteristik angin di Indonesia menjadi sangat penting.

Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk memanfaatkan energi angin adalah turbin angin poros vertikal (Vertical Axis Wind Turbine/VAWT). Berbeda dengan turbin angin horizontal yang memerlukan sistem yaw untuk menyesuaikan arah angin, turbin angin vertikal dapat menangkap angin dari berbagai arah tanpa mekanisme tambahan. Hal ini membuatnya lebih cocok untuk kondisi angin yang tidak stabil, seperti di lingkungan perkotaan atau daerah dengan turbulensi tinggi (Fadila, 2020). Namun, efisiensi turbin angin vertikal masih menjadi tantangan utama dalam pengembangannya.

Dua faktor penting yang sangat berpengaruh terhadap performa turbin angin adalah panjang sudu dan material sudu yang digunakan. Panjang sudu mempengaruhi luas permukaan yang menangkap angin, sehingga berdampak langsung terhadap daya yang dihasilkan. Semakin panjang sudu maka daya turbin semakin besar dan semakin besar kecepatan angin maka daya turbin yang dihasilkan akan semakin besar. (Fachrudin, A. R. & Astuti, F. A., 2021) Sementara itu bahan PVC dipilih karena ringan dan tahan terhadap berbagai kondisi cuaca (Ramadhani, S., dkk., 2024) sedangkan drum plastik dipilih karena mudah didapat, ringan dan mudah dibentuk (Musrady, M., & Marhatang. 2013).

Penelitian yang dilakukan oleh (Valentius Kelvin Heryanto, 2014) menunjukkan bahwa menggunakan bahan pipa pvc dengan variasi kemiringan sudu ($28,7^\circ$, 34° , $39,9^\circ$). Menghasilkan koefisien daya yang maksimal pada sudu kemiringan 34° sebesar 34,91% Tip speed ratio 4,38.

(Choiri, M. U., 2024) membahas tentang perbandingan turbin savonius dan turbin angin darrieus dengan menggunakan bahan pipa PVC. Hasil menunjukkan Turbin savonius disini lebih diunggulkan dikarenakan kecepatan angin sedang sekitar 4-5m/s dan menggunakan tiga buah bilah ini membuat turbin savonius memiliki momen inersia yang lebih rendah dan dapat berputar dengan maksimal.

(Fikri, dan Ali, M., 2023) Menunjukkan bahwa jumlah sudu berpengaruh, dengan efisiensi tertinggi untuk kincir angin savonius tipe u adalah tipe 2 sudu dengan nilai efisiensi sebesar 1,0046% pada kecepatan angin 5,8.

Pranoto, Ali Akbar (2018) dalam penelitian turbin angin sumbu horizontal profil NACA 0015 menggunakan variasi jumlah sudu (3, 4, dan 5) panjang sudu 75 cm, lebar sudu 15 cm, dan sudut 10 derajat. Hasil penelitian variasi jumlah sudu terhadap daya listrik turbin angin sumbu horizontal sesuai hasil anova p-value $> 0,05$ untuk hasil pengujian menunjukkan 3 sudu menghasilkan rata rata daya listrik yang paling tinggi dibandingkan jumlah sudu lainnya dengan hasil sebesar 1,0203 Watt. Sehingga dapat disimpulkan variasi jumlah sudu berpengaruh terhadap daya listrik.

Berdasarkan penelitian terdahulu, kombinasi variasi panjang sudu dan jenis material sudu belum banyak diteliti secara bersamaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa turbin angin vertikal dengan variasi panjang sudu (20 cm, 30 cm, dan 40 cm) serta penggunaan dua jenis bahan berbeda, yaitu pipa PVC dan High-Density Polyethylene (HDPE). Dengan penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh kombinasi optimal antara panjang sudu dan jenis material untuk meningkatkan performa

turbin angin vertikal dan memberikan solusi teknologi yang lebih ekonomis bagi pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen kuantitatif, dengan pendekatan eksperimen langsung di lapangan. Pengujian dilakukan dengan cara mengoperasikan turbin angin Savonius-U di kawasan pesisir Pantai Remen Tuban, memanfaatkan tekanan angin alami untuk memutar turbin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa turbin angin vertikal berdasarkan kombinasi panjang sudu (20 cm, 30 cm, dan 40 cm) dan jenis material sudu (pipa PVC dan High-Density Polyethylene (HDPE)).

Performa turbin dinilai dari parameter utama yaitu daya listrik (watt) yang dihasilkan. Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer digital, yang diposisikan sejajar arah datangnya angin di dekat turbin. Sedangkan daya listrik diukur dengan multimeter digital, yang disambungkan langsung ke keluaran generator. Pengambilan data dilakukan secara manual selama durasi 10 menit untuk setiap kombinasi variasi.

Setelah data terkumpul, dilakukan perhitungan daya listrik dengan rumus $P=V \times I$, dan semua hasil pengujian dikompilasi ke dalam tabel dan grafik untuk memudahkan analisis performa tiap spesimen. Fokus analisis terletak pada identifikasi kombinasi panjang dan material sudu yang mampu menghasilkan performa tertinggi, ditinjau dari jumlah daya yang dihasilkan dan konsistensi putaran turbin selama waktu pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan terhadap performa turbin angin vertikal tipe Savonius dilakukan secara eksperimental di lingkungan terbuka dengan kondisi kecepatan angin alami.

Uji coba dilaksanakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi panjang sudu dan bahan terhadap daya listrik yang dihasilkan serta karakteristik putaran rotor (RPM).

Turbin dirancang dengan diameter rotor tetap sebesar 20 cm, sedangkan panjang sudu divariasikan menjadi 20 cm, 30 cm, dan 40 cm, dengan dua jenis bahan (PVC dan High-Density Polyethylene (HDPE)). Total terdapat enam variasi kombinasi, masing-masing diuji selama 10 menit dengan pencatatan data setiap 1 menit, sehingga menghasilkan 60 data pengamatan.

Parameter utama yang diamati dan dihitung pada tiap menit pengujian meliputi:

1. Kecepatan angin (m/s)
2. Tegangan output (Volt)
3. Arus output (Ampere)
4. Putaran rotor (RPM)
5. Luas sapuan (m^2)
6. Daya input (Watt)
7. Daya output (Watt)

Rumus yang digunakan untuk perhitungan adalah sebagai berikut:

1. Daya Input

$$P_{input} = \frac{2}{1} \times \rho \times A \times v^3 \dots \dots \dots (4.1)$$

Keterangan:

ρ = Massa jenis udara (1.225 kg/m^3)

A = Luas sapuan rotor (m^2)

v = Kecepatan angin (m/s)

2. Daya Output

$$P_{output} = V \times I \dots \dots \dots (4.2)$$

Keterangan:

V = Tegangan output (Volt)

I = Arus output (Ampere)

3. Luas Sapuan

$$A = D \times H \dots \dots \dots (4.3)$$

Keterangan:

D = Diameter rotor (m)

H = Panjang sudu (m)

Data hasil pengamatan disusun dalam bentuk tabel dan disajikan secara lengkap pada bagian lampiran skripsi. Seperti yang ditampilkan pada table 4.1 dibawah ini:

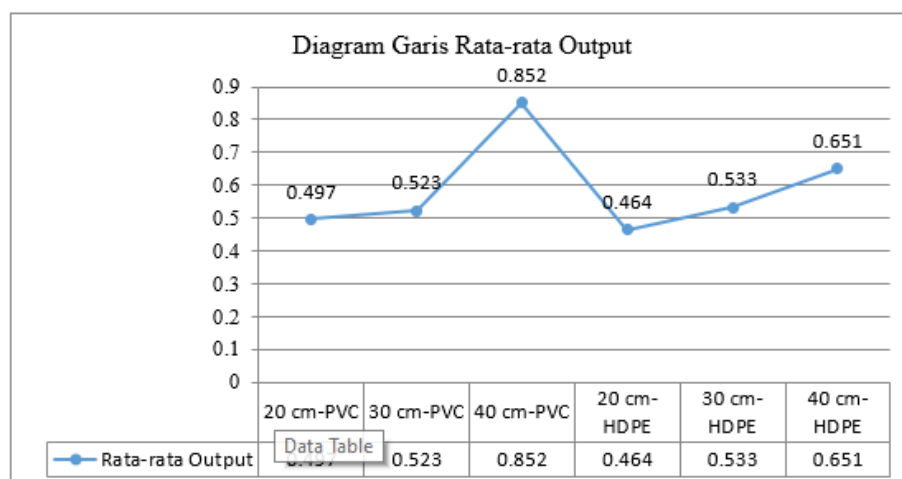
Tabel 1. Variasi 1: Panjang Sudu 20 cm – PVC

Menit ke-	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	RPM	Luas Sapuan (m ²)	Daya Input (Watt)	Daya Output (Watt)
1	3.45	5.10	0.060	101	0,04	1.00	0.31
2	3.68	5.50	0.071	105	0,04	1.22	0.39
3	3.50	5.20	0.065	102	0,04	1.05	0.34
4	3.85	5.80	0.079	107	0,04	1.39	0.46
5	4.02	6.00	0.091	110	0,04	1.61	0.55
6	3.94	5.90	0.086	109	0,04	1.52	0.51
7	4.18	6.20	0.100	113	0,04	1.81	0.62
8	4.05	6.00	0.093	111	0,04	1.65	0.56
9	4.22	6.40	0.101	114	0,04	1.87	0.65
10	4.10	6.10	0.095	112	0,04	1.72	0.58

Penyajian Data Bentuk Grafik

Data hasil pengamatan pada setiap variasi turbin diolah dan disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah analisis visual terhadap performa turbin. Grafik-grafik yang ditampilkan meliputi daya output, putaran rotor (RPM), hubungan kecepatan angin terhadap daya output, perbandingan daya input-output, serta koefisien daya (C_p) pada masing-masing variasi.

Berikut grafik daya output rata-rata untuk enam variasi kombinasi panjang sudu dan jenis bahan:



Gambar 1. Grafik rata-rata daya output

Gambar 1. menampilkan perbandingan rata-rata daya output dari enam variasi turbin angin vertikal Savonius. Hasil daya output rata-rata dari masing-masing variasi adalah sebagai berikut:

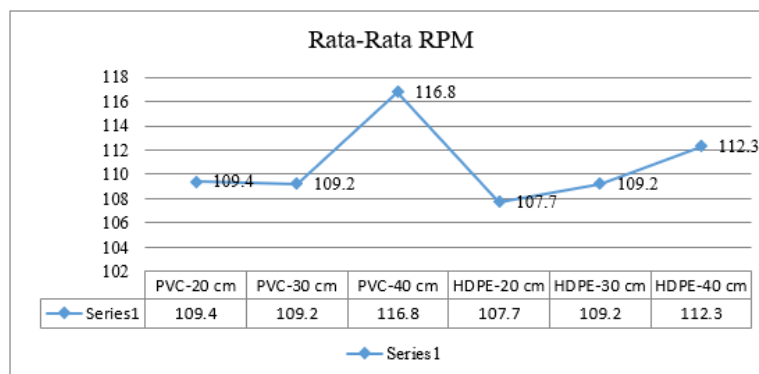
Bahan Sudu	Panjang Sudu	Rata-rata Daya Output (Watt)
PVC	20 cm	0,497
	30 cm	0,523
	40 cm	0,852
<i>High-Density Polyethylene</i> (HDPE)	20 cm	0,464
	30 cm	0,533
	40 cm	0,651

Berdasarkan grafik rata-rata daya output diatas, variasi turbin dengan panjang sudu 20 cm dan terbuat dari High-Density Polyethylene (HDPE) menghasilkan daya terendah, yaitu 0,464 Watt. Hal ini dikarenakan luas sapuan angin yang kecil akibat sudu yang pendek, sehingga turbin tidak mampu menangkap angin dengan baik dan menghasilkan daya listrik yang maksimal, apalagi saat angin bertiup dengan kecepatan rendah.

Sementara itu, variasi 30 cm dengan bahan PVC dan High-Density Polyethylene (HDPE) diperoleh daya output yang hampir setara, masing-masing 0,523 Watt dan 0,533 Watt. Hal ini menunjukkan bahwa pada panjang sudu yang sedang, luas sapuan cukup baik untuk memanfaatkan energi angin secara optimal, dan bahan yang digunakan tidak terlalu mempengaruhi selama angin dalam keadaan stabil. Pada tahap ini, desain turbin sudah menunjukkan keseimbangan yang baik antara ukuran dan berat.

Daya output tertinggi dari variasi turbin dengan panjang sudu 40 cm dan terbuat dari PVC, mencapai 0,852 Watt. Kombinasi ini mampu mengoptimalkan performa turbin karena luas sapuan yang lebih besar, yang berarti bisa menangkap lebih banyak energi angin. Di sisi lain, meskipun variasi 40 cm dengan bahan High-Density Polyethylene (HDPE) juga memiliki panjang sudu yang sama, daya output yang dihasilkan hanya 0,651 Watt.

Berikut grafik daya output rata-rata untuk enam variasi kombinasi panjang sudu dan jenis bahan:



Gambar 2. Grafik rata-rata RPM Per Variasi

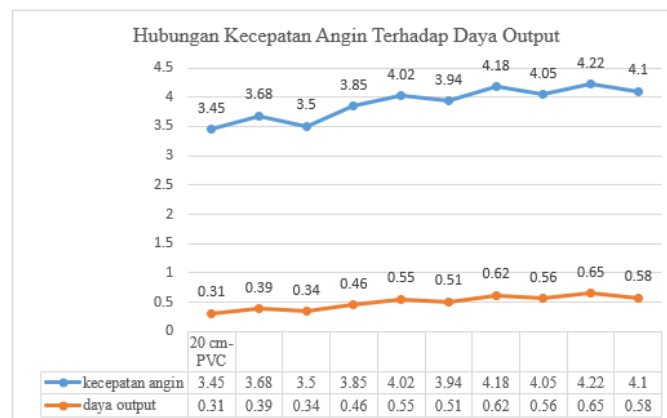
Gambar 2. menampilkan perbandingan rata-rata RPM dari enam variasi turbin angin vertikal Savonius. Hasil RPM rata-rata dari masing-masing variasi adalah sebagai berikut:

Bahan Sudu	Panjang Sudu	Rata-Rata RPM
PVC	20 cm	109,4
	30 cm	109,2
	40 cm	116,8
<i>High-Density Polyethylene</i> (HDPE)	20 cm	107,7
	30 cm	109,2
	40 cm	112,3

Dapat dilihat dari grafik di atas bahwa peningkatan panjang sudu sebanding dengan kenaikan RPM rata-rata. Terlihat jelas bahwa semakin panjang sudu turbin, maka semakin tinggi pula nilai RPM-nya. Hal ini disebabkan oleh luas sapuan angin yang semakin besar, sehingga semakin banyak energi angin yang ditangkap dan dikonversi menjadi gerak putar. Variasi dengan RPM tertinggi adalah 40 cm – PVC dengan nilai 116,8 RPM, diikuti oleh 40 cm – High-Density Polyethylene (HDPE) dengan 112,3 RPM. Meskipun bahan PVC lebih berat dari High-Density Polyethylene (HDPE), panjang sudu 40 cm memungkinkan turbin tetap berputar optimal karena area tangkap angin yang luas.

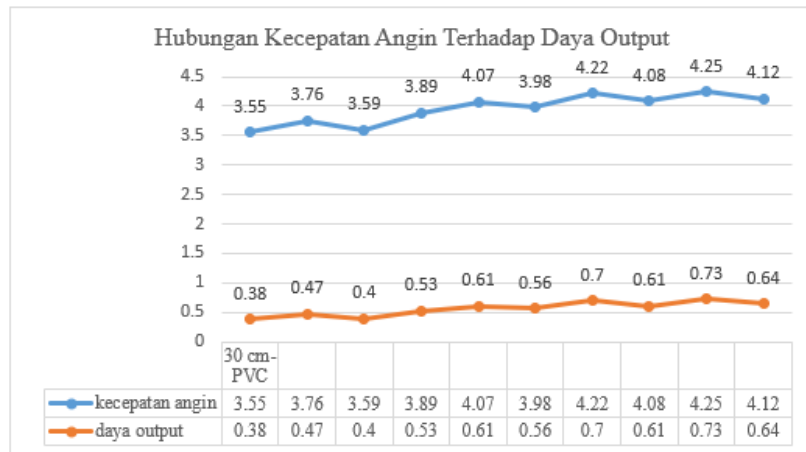
Sementara itu, variasi dengan RPM terendah adalah 20 cm – High-Density Polyethylene (HDPE), dengan 107,7 RPM. Hal ini disebabkan oleh luas sapuan yang kecil dan energi angin yang tertangkap juga kecil, sehingga tidak mampu menghasilkan gaya putar yang besar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa panjang sudu sangat berpengaruh terhadap kecepatan putaran turbin. Pada variasi panjang 30 cm, RPM dari kedua bahan sama yaitu 109,2 RPM, menandakan bahwa pengaruh bahan tidak terlalu besar pada ukuran sudu sedang. Secara keseluruhan, penggunaan sudu yang lebih panjang lebih efektif dalam meningkatkan RPM, sedangkan bahan yang ringan seperti High-Density Polyethylene (HDPE) membantu turbin tetap bisa berputar dengan baik, terutama pada ukuran sudu yang kecil.

Berikut grafik daya output rata-rata untuk enam variasi kombinasi panjang sudu dan jenis bahan:



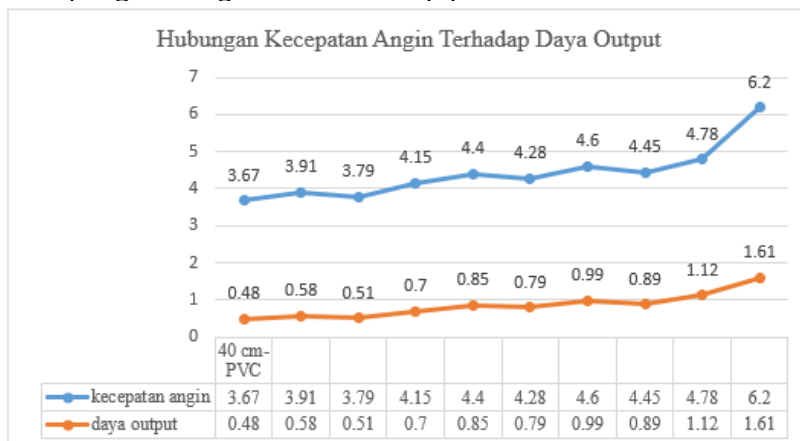
Gambar 3. Grafik Hubungan Kecepatan Angin terhadap Daya Output Variasi 20 cm PVC

Pada Gambar 3, ditampilkan grafik hubungan antara kecepatan angin (dalam m/s) terhadap daya output (dalam Watt) untuk variasi turbin dengan panjang sudu 20 cm berbahan PVC. Grafik menunjukkan bahwa seiring meningkatnya kecepatan angin, daya output yang dihasilkan juga mengalami peningkatan. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar turbin angin, di mana daya angin berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan angin ($P \propto v^3$). Artinya, sedikit peningkatan pada kecepatan angin akan memberikan kenaikan signifikan pada energi yang tersedia untuk dikonversi menjadi listrik. Karena panjang sudu yang digunakan hanya 20 cm, luas sapuan terhadap angin sangat kecil, sehingga energi angin yang bisa ditangkap pun terbatas. Meskipun daya output meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin, nilai output secara keseluruhan tetap rendah dibanding variasi sudu yang lebih panjang, dengan rata-rata daya hanya mencapai 0,497 Watt. Hal ini menunjukkan bahwa panjang sudu 20 cm belum cukup efektif dalam menangkap dan memanfaatkan energi angin, terutama pada kecepatan angin sedang.



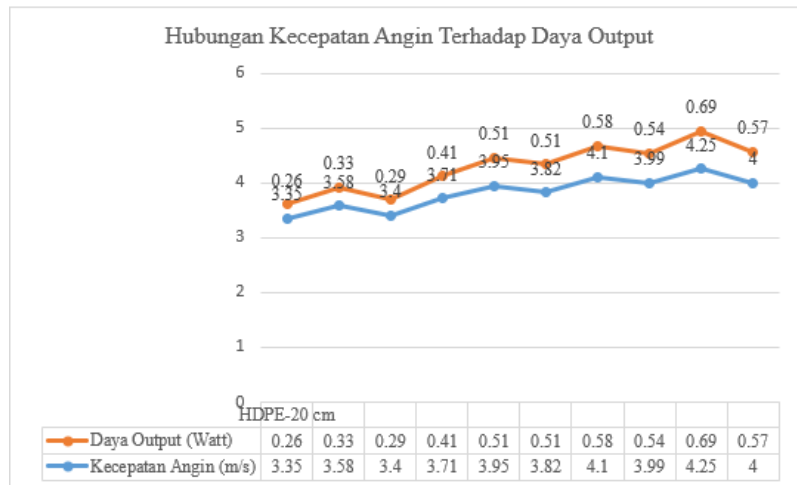
Gambar 4. Grafik Hubungan Kecepatan Angin terhadap Daya Output Variasi 30 cm PVC

Pada Gambar 4, grafik menunjukkan bahwa daya output meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin, dengan panjang sudu 30 cm, luas sapuan terhadap angin menjadi lebih besar dibanding sudu 20 cm, sehingga energi angin yang ditangkap juga meningkat. Variasi ini menghasilkan rata-rata daya output sebesar 0,523 Watt. Meskipun bahan PVC memiliki bobot yang cukup berat, panjang sudu yang lebih besar mampu mengimbangi, sehingga tetap dapat berputar dan menghasilkan daya listrik yang lebih baik dibanding sudu yang lebih pendek. Ini menunjukkan bahwa peningkatan panjang sudu memberikan pengaruh signifikan terhadap performa turbin.



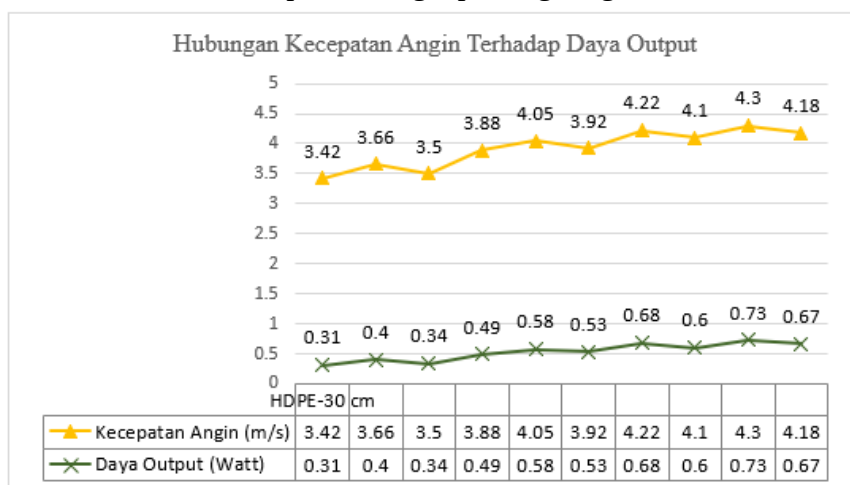
Gambar 5. Grafik Hubungan Kecepatan Angin terhadap Daya Output Variasi 40 cm PVC

Pada Gambar 5, terlihat bahwa daya output meningkat tajam seiring bertambahnya kecepatan angin, dengan hasil tertinggi di antara semua variasi. Panjang sudu 40 cm memberikan luas sapuan paling besar, sehingga mampu menangkap lebih banyak energi angin. Meskipun bahan PVC cukup berat, sudu yang panjang menghasilkan gaya putar yang besar, sehingga dapat berputar secara optimal. Variasi ini mencatat daya output rata-rata tertinggi sebesar 0,852 Watt, menjadikannya variasi paling unggul dalam menghasilkan energi listrik. Ini membuktikan bahwa panjang sudu menjadi faktor utama dalam meningkatkan kinerja turbin.



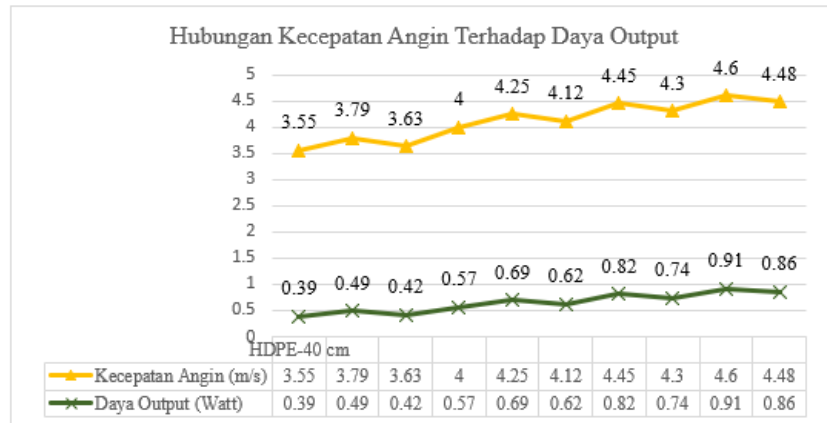
Gambar 6. Grafik Hubungan Kecepatan Angin terhadap Daya Output Variasi 20 cm High-Density Polyethylene (HDPE)

Pada Gambar 6, grafik menunjukkan bahwa daya output meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin, namun nilainya tetap tergolong rendah dibanding variasi lainnya. Dengan panjang sudu hanya 20 cm, luas sapuan terhadap angin sangat terbatas, sehingga energi angin yang dapat ditangkap juga minim. Meskipun menggunakan bahan High-Density Polyethylene (HDPE) yang ringan, daya rata-rata yang dihasilkan hanya sebesar 0,464 Watt, merupakan yang terendah di antara semua variasi. Ini menunjukkan bahwa ringannya bahan belum cukup untuk menghasilkan daya besar jika panjang sudu terlalu pendek, karena tidak mampu menangkap energi angin secara maksimal.



Gambar 7. Grafik Hubungan Kecepatan Angin terhadap Daya Output Variasi 30 cm High-Density Polyethylene (HDPE)

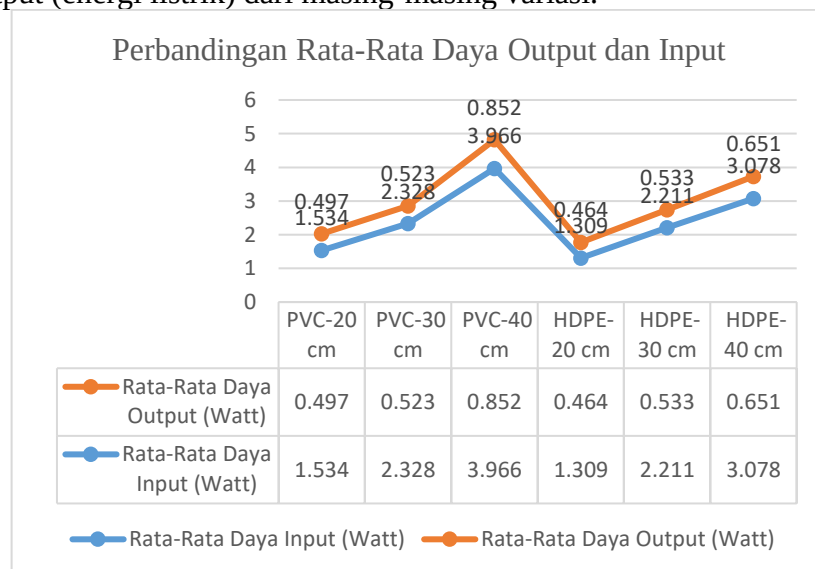
Pada Gambar 7, grafik menunjukkan bahwa daya output meningkat secara bertahap seiring bertambahnya kecepatan angin, mengikuti pola umum turbin angin. Dengan panjang sudu 30 cm, luas sapuan angin lebih besar dibanding sudu 20 cm, sehingga energi angin yang ditangkap juga lebih banyak. Variasi ini mencatat rata-rata daya output sebesar 0,533 Watt, sedikit lebih tinggi dibandingkan variasi PVC dengan panjang sudu yang sama. Ini menunjukkan bahwa kombinasi panjang sudu sedang dan bahan ringan memberikan hasil yang lebih efisien dalam menghasilkan daya listrik, khususnya pada kecepatan angin sedang.



Gambar 8. Grafik Hubungan Kecepatan Angin terhadap Daya Output Variasi 40 cm High-Density Polyethylene (HDPE)

Pada Gambar 8, grafik menunjukkan kenaikan daya output yang konsisten seiring bertambahnya kecepatan angin. Panjang sudu 40 cm memberikan luas sapuan yang besar, sehingga turbin mampu menangkap lebih banyak energi angin. Variasi ini menghasilkan rata-rata daya output sebesar 0,651 Watt, menjadikannya variasi tertinggi kedua setelah 40 cm – PVC. Ini menunjukkan bahwa kombinasi sudu panjang dan bahan ringan cukup efektif dalam meningkatkan performa turbin.

Grafik ini memperlihatkan perbandingan antara rata-rata daya input (energi angin) dan daya output (energi listrik) dari masing-masing variasi.



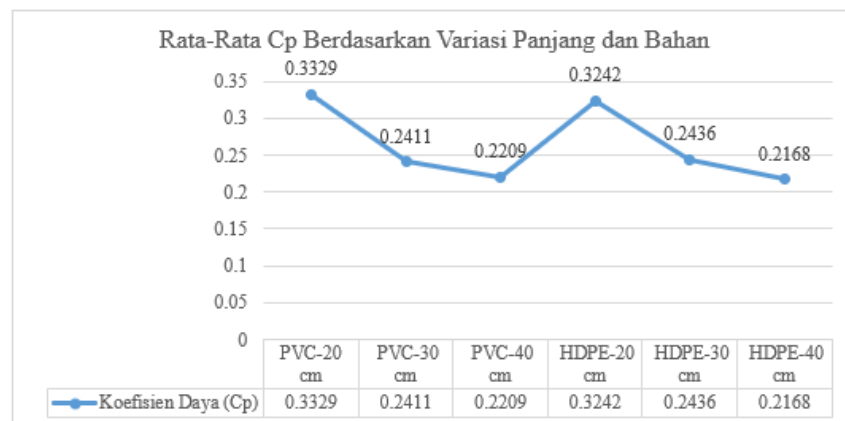
Gambar 9. Grafik Perbandingan Rata-Rata Daya Input dan Output

Gambar 9. menampilkan perbandingan rata-rata daya input dan output dari enam variasi turbin angin vertikal Savonius. Hasil daya output rata-rata dari masing-masing variasi adalah sebagai berikut:

Bahan Sudu	Panjang Sudu	Rata-Rata Daya Input	Rata-Rata Daya Output
PVC	20 cm	1,534	0,497
	30 cm	2,328	0,523
	40 cm	3,966	0,852
High-Density Polyethylene (HDPE)	20 cm	1,309	0,464
	30 cm	2,211	0,533
	40 cm		

		3,078	0,651
--	--	-------	-------

Pada Gambar 4, diperlihatkan perbandingan antara rata-rata daya input dan daya output untuk setiap variasi turbin. Secara umum, daya input selalu lebih besar daripada daya output. Dari grafik terlihat bahwa daya input tertinggi terdapat pada variasi 40 cm – PVC, yaitu 3,966 Watt, dengan output sebesar 0,852 Watt. Sementara itu, daya input terendah terdapat pada variasi 20 cm – High-Density Polyethylene (HDPE), yaitu 1,309 Watt, dengan output sebesar 0,464 Watt. Meskipun selisih antara input dan output cukup besar di semua variasi, perbedaan tersebut mencerminkan seberapa baik setiap kombinasi sudu dan bahan dalam mengonversi energi angin menjadi listrik. Dengan demikian, grafik ini menunjukkan bahwa panjang sudu sangat memengaruhi daya input, sedangkan daya output tidak hanya bergantung pada luas sapuan angin, tetapi juga pada seberapa efisien desain dan bahan sudu.



Gambar 10. Grafik ini memperlihatkan Koefisien Daya (Cp)

Gambar 10. menampilkan rata-rata koefisien daya dari enam variasi turbin angin vertikal Savonius. Hasil rata-rata koefisien daya dari masing-masing variasi adalah sebagai berikut:

Bahan Sudu	Panjang Sudu	Rata-Rata Daya Input	Rata-Rata Daya Output	Cp
PVC	20 cm	1,534	0,497	0,3329
	30 cm	2,328	0,523	0,2411
	40 cm	3,966	0,852	0,2209
High-Density Polyethylene (HDPE)	20 cm	1,309	0,464	0,3242
	30 cm	2,211	0,533	0,2436
	40 cm	3,078	0,651	0,2168

Nilai Cp diperoleh dari perbandingan antara daya output yang dihasilkan oleh turbin dan daya input yang berasal dari angin. Semakin tinggi nilai Cp, maka semakin besar energi angin yang berhasil diubah menjadi energi listrik. Berdasarkan hasil perhitungan dari rata-rata daya input dan output pada masing-masing variasi turbin, diperoleh grafik tabel yang menunjukkan bahwa nilai Cp tertinggi terdapat pada variasi turbin dengan panjang sudu 20 cm berbahan PVC, yaitu sebesar 0,3329. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi panjang sudu pendek mampu memberikan efisiensi konversi energi tertinggi. Disusul oleh variasi 20 cm dengan bahan sudu High-Density Polyethylene (HDPE), yang juga menunjukkan efisiensi tinggi dengan nilai Cp sebesar 0,3242. Sebaliknya, nilai Cp terendah diperoleh pada variasi 40 cm berbahan gentong plastik yaitu sebesar 0,2168, meskipun daya inputnya besar. Ini menunjukkan bahwa panjang sudu yang terlalu besar justru menurunkan efisiensi konversi energi. Secara

umum, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan PVC cenderung menghasilkan C_p yang lebih tinggi dibandingkan High-Density Polyethylene (HDPE).

Analisis Performa Turbin

Analisis performa turbin angin vertikal Savonius-U dilakukan untuk menilai efisiensi konversi energi angin menjadi energi listrik berdasarkan variasi panjang sudu dan material sudu (PVC dan High-Density Polyethylene (HDPE)). Penilaian performa ini didasarkan pada parameter utama berupa daya output (Watt), yang dihitung dari hasil pengukuran tegangan dan arus listrik, serta dikaitkan dengan kecepatan angin (m/s) sebagai faktor input utama. Berdasarkan hasil pengujian dan olah data, berikut adalah rata-rata daya output untuk masing-masing variasi:

Bahan Sudu	Panjang Sudu	Rata-rata Daya Output (Watt)
PVC	20 cm	0,497
	30 cm	0,523
	40 cm	0,852
High-Density Polyethylene (HDPE)	20 cm	0,464
	30 cm	0,533
	40 cm	0,651

Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa turbin angin vertikal Savonius-U sangat dipengaruhi oleh panjang sudu dan jenis bahan sudu. Berdasarkan data daya output rata-rata, variasi dengan daya tertinggi adalah 40 cm – PVC, yaitu sebesar 0,852 Watt, sedangkan daya terendah diperoleh pada variasi 20 cm – High-Density Polyethylene (HDPE), sebesar 0,464 Watt. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh luas sapuan sudu terhadap angin. Semakin panjang sudu, semakin besar area yang digunakan untuk menangkap angin, sehingga energi angin yang dapat diubah menjadi energi listrik juga meningkat. Ini sesuai dengan rumus daya angin $P=1/2.\rho.A.v^3$, di mana A adalah luas penampang sudu. Hal ini sejalan dengan penelitian Fachrudin & Astuti (2021) yang menyatakan bahwa semakin panjang sudu pada turbin vertikal, maka semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan.

Selain panjang sudu, jenis bahan sudu turut memengaruhi performa turbin, terutama dalam hal kecepatan rotasi (RPM). Bahan High-Density Polyethylene (HDPE) memiliki massa lebih ringan dibanding PVC, sehingga pada umumnya menghasilkan RPM yang lebih tinggi karena rotor lebih mudah berputar, terutama saat kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, data menunjukkan bahwa variasi 40 cm – PVC justru mencatat RPM tertinggi, yaitu 116,8 RPM, sedikit lebih tinggi dibanding 40 cm – gentong plastik, yang mencatat 112,3 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun PVC lebih berat, kekakuan dan kekuatan bahan membantu sudu menangkap angin lebih efektif dan stabil pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Temuan ini didukung oleh penelitian Choiri (2024) yang menjelaskan bahwa bahan kaku seperti PVC dapat menjaga bentuk sudu tetap optimal saat menerima tekanan angin, sehingga menghasilkan performa rotasi lebih baik dibanding bahan fleksibel seperti High-Density Polyethylene (HDPE).

Dari grafik hubungan kecepatan angin terhadap daya output, seluruh variasi menunjukkan pola kenaikan daya yang sebanding dengan kenaikan kecepatan angin, yang sesuai dengan teori bahwa daya angin berbanding lurus terhadap v^3 . Namun, besarnya daya output yang dicapai setiap variasi tetap sangat dipengaruhi oleh luas sapuan dan bahan. Misalnya, pada variasi 40 cm – PVC, peningkatan kecepatan angin menghasilkan lonjakan daya yang lebih signifikan dibanding variasi dengan sudu lebih pendek atau bahan lebih ringan. Hal ini diperkuat oleh pernyataan dalam penelitian Ramadhani dkk. (2024), yang menyebutkan bahwa kecepatan angin memberikan pengaruh besar terhadap

daya output turbin, terutama pada desain yang mampu memaksimalkan penangkapan angin.

Pada grafik koefisien daya (C_p), nilai tertinggi terdapat pada variasi 20 cm – gentong plastik, yaitu 0,354, menunjukkan bahwa meskipun daya output-nya kecil, variasi ini mampu mengubah sebagian besar energi angin yang diterima menjadi energi listrik secara efisien. Nilai C_p terendah dimiliki oleh 40 cm – PVC, yaitu 0,215, diikuti sangat dekat oleh 40 cm – High-Density Polyethylene (HDPE) sebesar 0,211. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sudu panjang tidak selalu menghasilkan efisiensi konversi energi yang tinggi, terutama jika bobot sudu besar seperti PVC atau bahan terlalu fleksibel seperti High-Density Polyethylene (HDPE), yang dapat menyebabkan hilangnya energi saat menerima tekanan angin. Temuan ini sejalan dengan penelitian Valentius (2014) yang menyebutkan bahwa efisiensi turbin tidak hanya ditentukan oleh ukuran sudu, tetapi juga dipengaruhi oleh desain dan kekakuan bahan sudu dalam mempertahankan bentuk saat beroperasi.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi panjang sudu 40 cm dan bahan PVC adalah yang paling optimal dalam menghasilkan daya listrik tertinggi, karena mampu menangkap angin secara maksimal dan mempertahankan kestabilan sudu saat berputar. Sementara itu, variasi 20 cm – gentong plastik menunjukkan efisiensi konversi energi terbaik, meskipun dengan daya output yang rendah. Dengan demikian, pemilihan panjang sudu dan bahan sudu harus disesuaikan dengan kebutuhan: apakah lebih mengutamakan total daya listrik, atau efisiensi pemanfaatan energi angin.

Penelitian ini memiliki unsur kebaruan dalam beberapa aspek. Pertama, pengujian dilakukan dengan mengombinasikan dua variabel sekaligus, yaitu variasi panjang sudu (20 cm, 30 cm, dan 40 cm) dan dua jenis material sudu (pipa PVC dan High-Density Polyethylene (HDPE)), yang belum banyak dibahas secara bersamaan dalam penelitian terdahulu. Kedua, penggunaan gentong plastik sebagai material sudu memberikan pendekatan alternatif yang ekonomis dan berpotensi ramah lingkungan. Ketiga, pengujian dilakukan secara langsung di wilayah pesisir Pantai Tuban yang memiliki karakteristik kecepatan angin rendah. Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi sudu panjang 40 cm dengan bahan PVC menghasilkan daya output tertinggi, sejalan dengan teori peningkatan luas sapuan dan efisiensi bahan ringan, serta memberikan data empiris baru yang dapat menjadi acuan pengembangan turbin angin skala kecil di wilayah serupa.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis terhadap performa turbin angin vertikal Savonius-U, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Pengaruh Variasi Panjang Sudu

Panjang sudu berpengaruh signifikan terhadap performa turbin angin vertikal. Semakin panjang sudu, semakin besar luas sapuan angin yang dihasilkan, sehingga semakin banyak energi angin yang dapat ditangkap dan dikonversi menjadi energi listrik. Variasi panjang sudu 40 cm menghasilkan daya output tertinggi, yaitu pada kombinasi 40 cm – PVC sebesar 0,852 Watt, serta mencatat RPM tertinggi sebesar 116,8 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan panjang sudu meningkatkan efisiensi penangkapan energi angin dan daya output secara langsung.

2. Pengaruh Jenis Material Sudu (PVC dan High-Density Polyethylene (HDPE))

Jenis bahan juga berpengaruh terhadap performa turbin, terutama dalam hal kecepatan rotasi. Bahan gentong plastik yang lebih ringan secara umum menghasilkan RPM lebih tinggi dibandingkan PVC karena lebih mudah berputar pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, PVC mencatat daya output

tertinggi pada sudu 40 cm karena materialnya yang lebih kaku mampu menangkap angin dengan lebih stabil. Sementara itu, koefisien daya (C_p) tertinggi dicapai oleh kombinasi 20 cm – High-Density Polyethylene (HDPE) sebesar 0,354, menandakan bahwa meskipun daya kecil, efisiensi konversi energi anginnya sangat baik. Dengan demikian, pemilihan material harus disesuaikan dengan kebutuhan: apakah mengutamakan efisiensi konversi atau total daya yang dihasilkan.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya adalah:

1. Disarankan untuk menambahkan variasi panjang sudu di atas 40 cm guna mengetahui batas optimal panjang sudu terhadap daya output, serta untuk mengkaji apakah terdapat titik jenuh di mana peningkatan panjang sudu tidak lagi memberikan peningkatan performa yang signifikan.
2. Sebaiknya dilakukan pengujian dengan bahan sudu alternatif yang lebih ringan dan kaku, seperti aluminium atau bahan komposit, untuk mendapatkan kombinasi ideal antara efisiensi rotasi dan kekuatan struktur sudu, sehingga dapat meningkatkan efisiensi konversi energi angin menjadi listrik.

DAFTAR PUSAKA

- Ambabunga, Y. (2019). Analisis Pengembangan Pembangkit Tenaga Listrik dengan Sumber Energi Baru dan Terbaharukan. *Journal Dynamic Saint*.
- Andi Mulkan. (2022). Analisis Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Sumber Pembangkit Energi Listrik. *Jurnal Ilmiah Teknik Unida*.
- Fachri, M. R., & Hendrayana, H. (2017). Analisa Potensi Energi Angin dengan Distribusi Weibull untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Banda Aceh. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*
- Fachrudin, A. R. & Astuti, F. A. (2021). Analisis Performa Turbin Angin Darrieus-H Naca 3412 Dengan Variasi Kecepatan Angin Dan Panjang Chord. *Jurnal Poros Teknik*, Volume 13, No.2.
- Fadila, A. (2020). Rancang Bangun Turbin Angin Tipe Darrieus Tiga Sudu Rangkap Tiga dengan Profil NACA 0006. *Jurnal Eksergi*.
- Fikri & Muhammad Ali. (2023). Pengaruh Jumlah Sudu terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius Tipe U dengan Menggunakan Variasi Sudu. *Repository.UNISMA*.
- Ichsan. (2023). Pengertian PVC: Karakteristik, Kelebihan, Kekurangan, dan Fungsinya. Diakses pada 23 Juni 2025, dari <https://visitpare.com/informasi-pendidikan/pengertian-pvc/?amp=1>
- Kementerian ESDM. (2023). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kristiana imajati. (2024). Kelebihan dan Kelemahan Barang Aluminium. Diakses pada 23 Juni 2025, dari <https://www.elitealuminium.co.id/blog/kelebihan-dan-kelemahan-barang-aluminium>
- M.Ubaidillah Choiri. (2024). Studi Komparasi Turbin Angin Darrieus Type H Dan Turbin Angin Savonius. *Universitas Islam Kadiri*.
- Murniati, Miranda Evi. 2022. "Analisis Potensi Energi Angin Sebagai Pembangkit Enegi Listrik Tenaga Angin Di Daerah Banyuwangi Kota Menggunakan Database Online-BMKG." *Jurnal Surya Energy*
- Musrady, M., & Marhatang. (2013). Rancang Bangun Turbin Savonius Untuk Penerangan Lampu Pantai. *Repository PNUP*.
- Nakhoda, Y. I., & Saleh, C. (2015). Rancang bangun kincir angin pembangkit tenaga listrik sumbu vertikal Savonius portabel menggunakan generator magnet permanen. *Industri Inovatif: Jurnal Teknik Industri*.
- Nakhoda, Y. I., & Saleh, C. (2017). Pembangkit Listrik Tenaga Angin Sumbu Vertikal Untuk Penerangan Rumah Tangga Di Daerah Pesisir Pantai. *Prodi Teknik Elektro, Fakultas*

- Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang.
- Petrane. (2024). Apa itu HDPE? Keunggulan, Penggunaan dan Manfaatnya. Diakses 22 Juni 2025, dari <https://petrane.co.id/blog/apa-itu-hdpe-keunggulan-penggunaan-dan-manfaatnya>
- Pranoto, Ali Akbar (2018). Analisa Daya Turbin Angin Sumbu Horizontal Profil NACA 0015 Dengan Variasi Jumlah Blade. Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Nusantara PGRI Kediri.
- Priyambada, O. D., (2016). Unjuk Kerja Kincir Angin Sumbu Horizontal Dua Sudu Berbahan Komposit, Berdiameter 100 Cm Dengan Lebar Maksimal 13 Cm Pada Jarak 19 Cm Dari Pusat Poros. Teknik Mesin Fakultas Sains Dan Teknologi Universitas Sanata Dharma Yogyakarta.
- Ramadhani, S., Siti, C., Amajida, S., M Hendra Budi Satria, & Tria, P. S. (2024). Analisis Output Generator Turbin Angin Savonius Berdasarkan Kecepatan Angin. Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur.
- Samosir, R., Turnip, K., Purba, R., & Widodo, B. (2013). Pemanfaatan Energi Angin Untuk Penerangan. Universitas Kristen Indonesia.
- T-Composites. (2016). Keuntungan & Kerugian dari Serat Karbon. Diakses 22 Juni 2025, dari <https://id.t-composites.net/news/advantages-disadvantages-of-carbon-fiber-1759312.html>
- Tuapetel, J. V., Triprayoga, I. A., & Santika, P. M. (2019). Analisis dan pengujian kinerja turbin angin Savonius 4 sudu. Jurnal Teknik Mesin – Iti Vol. 3, No. 2.
- Valentius Kelvin Heryanto (2014). Unjuk Kerjakincir Angin Poros Horizontal 4 Sudu Berbahan Pipa Pvc 8" Dengan Variasi Kemiringan Sudu. Universitas Sanat