



Kaji Eksperimen Pengaruh Sudut Bilah Darrieus Tipe H dan Bentuk Bilah Savonius Terhadap Performa Turbin Hybrid pada Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Wisnu Herico Aji Ronggo Kuncoro (Mahasiswa), Bintang Tries Nanda Nugraha (Mahasiswa), Gatut Priyo Utomo (Dosen Pembimbing)

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya
Jalan Semolowaru No. 45 Surabaya 60118, Tel. 031-5931800, Indonesia
email: wisnuhericoaji.wha@gmail.com

ABSTRACT

This research focuses on harnessing the wind energy potential in the Surabaya region as a source of new renewable energy, particularly wind power. The researchers conducted a study and developed a hybrid Darrieus type-H and Savonius wind turbine. An experimental research method was employed to analyze the effect of the airfoil angle inclination (0° , 10° , 15°) and the variation of U and L-shaped Savonius turbine blades on the performance of the Darrieus Savonius hybrid turbine. The test results indicate that the blade angle of the Darrieus type-H turbine and the shape of the Savonius turbine blades affect the hybrid turbine's performance. The turbine with L-shaped Savonius blades at a 0° angle produced the maximum electrical output power, which is 30.94 watts. At a 0° angle, the wind striking the turbine does not experience disturbance, reducing wind resistance and hindrance to the turbine's rotational movement. L-shaped Savonius blades also demonstrate better stability, even load distribution during rotation, reduced vibration, and increased resistance to sudden changes in wind direction. This conclusion can serve as a foundation for the efficient design and construction of wind power generators at the coastal region of Surabaya.

Keyword: Darrieus, Savonius, airfoil, renewable energy, hybrid turbine

ABSTRAK

Penelitian ini fokus pada pemanfaatan potensi energi angin di wilayah Surabaya sebagai sumber energi baru terbarukan, khususnya tenaga bayu. Peneliti melakukan kajian dan pembuatan turbin angin hybrid Darrieus tipe-H dan savonius. Metode penelitian eksperimental digunakan untuk menganalisis pengaruh kemiringan sudut *airfoil* (0° , 10° , 15°) dan variasi bilah turbin Savonius tipe U dan L pada turbin hybrid Darrieus Savonius pada performa daya turbin. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut bilah turbin Darrieus tipe-H dan bentuk bilah turbin Savonius berpengaruh pada performa turbin *hybrid*. Turbin dengan bilah Savonius tipe L pada sudut 0° menghasilkan daya output listrik maksimum, yaitu 30,94 watt. Pada sudut 0° , angin yang menabrak turbin tidak mengalami gangguan, mengurangi resistansi angin dan hambatan terhadap gerakan putar turbin. Bilah Savonius tipe L juga menunjukkan tingkat kestabilan yang lebih baik, redistribusi beban yang merata saat berputar, mengurangi getaran, dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan arah angin secara tiba-tiba. Kesimpulan ini dapat menjadi dasar untuk rancang bangun pembangkit listrik tenaga bayu yang efisien di wilayah pesisir Surabaya.

Kata kunci: Darrieus, Savonius, *airfoil*, energi terbarukan, turbin *hybrid*

PENDAHULUAN

Sepanjang sejarah manusia dan kebudayaannya yang selalu diikuti dengan meningkatnya konsumsi energi yang dibutuhkan. Meningkatnya kebutuhan energi ini juga dipengaruhi oleh majunya dunia industri. Oleh karena itu, diperlukan pasokan energi yang besar. Energi fosil merupakan salah satu sumber energi yang paling sering dimanfaatkan. Ketika sumber energi fosil habis dan tidak dapat diisi ulang, maka harus dicari sumber energi lain (Daryanto, 2007). Oleh karena itu, sumber energi terbarukan diperlukan untuk mengimbangi gangguan penggunaan bahan bakar fosil.

Sumber energi alam yang dapat dimanfaatkan secara terus-menerus disebut sumber energi terbarukan. Energi terbarukan memiliki banyak manfaat bagi kehidupan manusia, seperti lingkungan terjaga karena mengurangi pencemaran udara yang disebabkan eksplorasi sumber energi fosil, tidak bergantung pada pasokan energi impor, Energi ini dapat dihasilkan di mana saja, oleh karena itu sentralisasi khusus tidak diperlukan dalam produksi (Global Energy Outlook, 2001). Energi angin merupakan salah satu jenis energi berkelanjutan.

Pergerakan udara dari zona bertekanan tinggi ke zona bertekanan rendah disebut energi angin. Menurut teori ini, Indonesia bisa memanfaatkan energi angin dengan baik. Memiliki 17.500 pulau dan garis pantai sepanjang lebih dari 81.290 meter, Indonesia adalah negara kepulauan. Indonesia merupakan negara tropis yang melewati garis khatulistiwa, yang mana garis khatulistiwa ini memiliki potensi angin daratan menghasilkan listrik hingga 19,6 GW. Dengan potensi angin yang besar ini sayang sekali kurang banyaknya pemanfaatan energi angin ini menjadi sumber energi terbarukan namun sangat disayangkan belum ada pemasangan turbin angin daratan dengan kapasitas terpasang hanya 0,2 GW (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022). Kurangnya pemanfaatan energi angin ini diakibatkan pula karena kecepatan dan arah angin yang berubah-ubah (BMKG, 2022).

Arah dan kecepatan angin yang sering berubah disebabkan letak geografis Indonesia, sehingga pemasangan *horizontal axis wind turbine* (HAWT) kurang tepat digunakan karena posisi turbin harus menghadap arah datangnya angin. Untuk menempatkan turbin semacam ini 1,5 meter di atas permukaan tanah, digunakan VAWT, dimana turbin bergerak secara independen terhadap arah angin dan dapat berputar pada kecepatan angin yang relatif rendah. Di antara banyak manfaat arsitektur turbin angin sumbu horizontal ini adalah kemampuannya menangkap angin dari segala arah, tapak pemasangannya yang kecil, kecepatan pengoperasiannya yang rendah, dan yang terpenting, suaranya yang lebih halus.

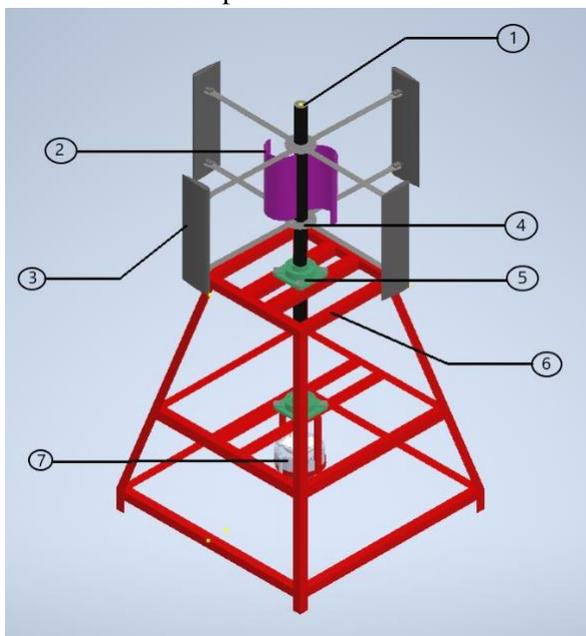
Turbin angin tipe vertikal diperbaiki pada penelitian sebelumnya dengan memposisikan turbin angin Savonius di bawah rotor H Darrieus dan di tengah rotor H. Temuan ini menunjukkan bahwa koefisien daya yang lebih tinggi dihasilkan dengan menempatkan turbin angin Savonius di tengah rotor Darrieus H dibandingkan di bawahnya (Rassoulinejad-Mousavi, 2013). Pengembangan Darrieus eggbeater dan savonius dual stage dikombinasikan. Savonius dual-stage lainnya adalah di tengah Darrieus dan di bawah Darrieus. Nilai koefisien daya yang lebih baik dihasilkan ketika Savonius diposisikan di bawah Darrieus, menurut temuan tersebut. Namun, lebih disarankan untuk menempatkan Savonius di tengah Darrieus mengingat ketahanan bentuk rotornya (Wakui T, 2014).

Pada Penelitian ini, Penulis akan mengkaji pengaruh performa turbin yang dihasilkan terhadap gabungan turbin angin Darrieus tipe-H dan Savonius. Di Savonius, memilih bentuk kombo ini berpotensi memulai dengan sendirinya. Darrieus dengan tipe-H dipilih karena kemampuannya menghasilkan listrik lebih banyak karena adanya efek gaya angkat dari *airfoil* dengan variasi sudut bilah pada *airfoil* darrieus tipe-H.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian adalah cara peneliti melakukan penelitian untuk mengumpulkan data atau informasi untuk diolah dan dianalisis secara ilmiah. Untuk menemukan masalah, penelitian dimulai dengan pengambilan data. Metode penelitian digunakan untuk menguji hipotesis dan menjawab pertanyaan penelitian. Pengumpulan data, analisis data, dan interpretasi hasil penelitian adalah beberapa metode penelitian. Teori yang digunakan untuk mengumpulkan data dikumpulkan untuk memungkinkan pengolahan data, dan dasar teori yang digunakan diambil dari berbagai studi pustaka yang digunakan. Setelah data diolah, masalah, tujuan penelitian, dan teori yang digunakan dievaluasi.

Tugas akhir ini menggunakan metode penelitian eksperimental. Penelitian dilakukan dengan melihat bagaimana kemiringan sudut airfoil dan penambahan bilah Savonius pada turbin Darrieus tipe-H mempengaruhi performa daya turbin yang dihasilkan. Metode yang dilakukan dalam penelitian ini diawali dengan pembuatan alat turbin angin Darrieus tipe-H dan selanjutnya dilakukan pengambilan data melalui pengujian pada turbin tersebut dengan menggunakan variasi sudut kemiringan airfoil sebesar 0° , 10° , 15° serta menggunakan variasi bilah turbin Savonius dengan tipe U dan L pada turbin Darrieus tipe-H.



Keterangan :

1. *Shaft*
2. Bilah turbin Savonius
3. Bilah *airfoil* turbin Darrieus tipe-H
4. *Flange*
5. *Pillow Block*
6. Rangka turbin
7. Generator

Dari spesifikasi yang ditentukan maka proses fabrikasi dilakukan di workshop.

Mekanisme Kerja Alat Uji

Peralatan uji turbin angin beroperasi berdasarkan prinsip berikut:

1. Alat uji diletakkan pada daerah pantai yang terbuka dengan potensi kecepatan angin yang tinggi bertujuan agar angin menabrak bilah pada alat uji
2. Setelah turbin menerima tiupan angin yang cukup, bilah turbin akan berputar dan membuat *shaft* berotasi
3. Putaran yang dihasilkan oleh turbin terhadap *shaft* ditransfusikan menuju pulley yang terhubung pada generator menggunakan *rubber belt*
4. Putaran yang dihasilkan pulley melalui *shaft* terhadap *generator* menyebabkan generator dapat berputar sehingga energi kinetik yang dihasilkan turbin angin dapat diubah menjadi energi listrik oleh *generator*.
5. Tegangan listrik dan arus listrik adalah dua bentuk energi listrik yang dihasilkan oleh generator.
6. Tahapan proses konversi energi diulangi.

Pelaksanaan Pengujian

Instalasi turbin digunakan untuk melakukan uji coba turbin kombinasi tipe H Savonius dan Darrieus di Kawasan Wisata Pantai Kenjeran. Memanfaatkan aliran angin menuju sudu-sudu turbin, pengujian pun dilakukan. Pergerakan angin menabrak bilah turbin membuat turbin berputar, putaran yang diakibatkan oleh bilah turbin membuat *shaft* berotasi sehingga mampu memutar *shaft* agar generator bergerak menghasilkan listrik, dalam pengujian ini divariasikan menjadi dua macam jenis turbin savonius dengan 3 macam sudut bilah darrieus tipe-H, untuk jenis turbin yaitu menggunakan turbin Savonius tipe U dan L. Sedangkan untuk

variasi sudut dilakukan pada bilah darrieus tipe H yaitu 0° , 10° , dan 15° . Data pengujian dilakukan dengan metode pengujian variabel. Pengukuran yang dilakukan terhadap pengujian meliputi :

1. Pengukuran kecepatan angin (m/s) menggunakan Anemometer
2. Pengukuran putaran (rpm) pada *shaft* turbin menggunakan Tachometer
3. Pengukuran tegangan listrik (volt) dan arus listrik (ampere) dengan menggunakan multimeter.

Tata Cara Pengujian

Prosedur pengujian turbin angin berdasarkan variabel penggunaan turbin gabungan Savonius dan Darrieus tipe-H dengan turbin angin Darrieus tipe-H, variasi sudut bilah sebesar 0° , 10° , dan 15° . Sebelum proses pengujian dilakukan penyusunan peralatan, serta dilakukan pemeriksaan kelayakan alat apakah bisa dioperasikan dengan baik. Pelaksanaan pengujian dilakukan dengan beberapa langkah, yaitu :

1. Pasang turbin savonius tipe U pada *shaft*
2. Atur kemiringan sudut bilah turbin darrieus tipe h dengan sudut 0° , 10° , dan 15° .
3. Pastikan kondisi sekitar turbin tidak ada objek lain yang menyebabkan terganggunya tiupan angin menuju turbin.
4. Lakukan pengukuran kecepatan angin menggunakan alat Anemometer dan pastikan kecepatan angin stabil
5. Lakukan pemantauan terhadap bilah turbin tipe-H, pastikan sudut bilah tidak berubah dan pantau putaran pada turbin pastikan kecepatan stabil.
6. Setelah turbin berputar konstan, dilakukan pengukuran tegangan dan arus yang dikeluarkan generator :
 - a. Pengukuran kecepatan putaran *shaft* menggunakan alat Tachometer
 - b. Pengukuran tegangan dan arus listrik yang dihasilkan generator dengan menggunakan alat Multimeter
7. Mencatat data pengamatan waktu selama 5 menit sebanyak 3 kali percobaan sesuai sudut kemiringan bilah Darrieus tipe-H

8. Semua data yang diambil dimasukkan ke dalam tabel data pengujian
9. Setelah dilakukan pengambilan data, lepaskan bilah turbin Savonius tipe U lalu lakukan langkah 2 sampai dengan 8 untuk pengambilan data selanjutnya menggunakan bilah savonius tipe L

Tabel data pengujian :

Tipe Turbin	Sudut	Waktu (5 menit)	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
Kombinasi Savonius Tipe U dan Darrieus Tipe-H	0°	Pengujian 1			
	0°	Pengujian 2			
	0°	Pengujian 3			
	10°	Pengujian 1			
	10°	Pengujian 2			
	10°	Pengujian 3			
	15°	Pengujian 1			
	15°	Pengujian 2			
	15°	Pengujian 3			
Kombinasi Savonius Tipe L dan Darrieus Tipe-H	0°	Pengujian 1			
	0°	Pengujian 2			
	0°	Pengujian 3			
	10°	Pengujian 1			
	10°	Pengujian 2			
	10°	Pengujian 3			
	15°	Pengujian 1			
	15°	Pengujian 2			
	15°	Pengujian 3			

Instalasi turbin digunakan untuk melakukan uji coba turbin kombinasi tipe H Savonius dan Darrieus di Kawasan

Setelah data didapatkan maka data tersebut dapat diolah dengan menghitung nilai daya turbin angin

Daya Turbin Angin

Energi kinetik angin memiliki massa (m) dan kecepatan (v), dengan v tidak mendekati kecepatan cahaya. Selain itu, rumus ini berlaku untuk angin, yaitu udara yang bergerak.

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

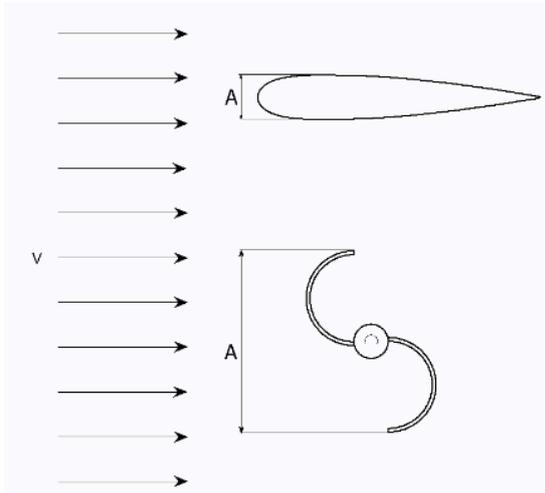
Keterangan:

E_k = Energi kinetik (joule)

m = massa udara (kg/m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

Volume udara persatuan waktu (debit) yang bergerak dengan kecepatan v yang melewati daerah dengan luas A adalah :



$$V = V_a \cdot A$$

Keterangan:

V = Volume udara (m^3)

V_a = Kecepatan angin (m/s)

A = luas penampang (m^2)

Rumus berikut dapat digunakan untuk mendapatkan luas daerah sapuan angin.

$$A = \pi \cdot r^2$$

Keterangan :

A = Luas daerah sapuan angin (m^3)

r = jari-jari lingkaran turbin atau Panjang turbin

Banyaknya massa yang bergerak melalui suatu lokasi jika suatu balok udara mempunyai luas penampang A (m^2) dan bergerak dengan kelajuan v (m/s) sama dengan:

$$m = \rho \cdot v = \rho \cdot A \cdot V_a \text{ (kg/s)}$$

Daya angin adalah energi persatuan waktu dari udara yang bergerak dengan kecepatan tertentu yang diformasikan sebagai berikut :

$$Pa = \frac{1}{2} (\rho \cdot A \cdot V_a) V_a^2$$

$$Pa = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_a^3$$

Keterangan :

Pa = Daya angin (watt)

ρ = Massa jenis udara ($1,2 \text{ Kg}/m^3$)

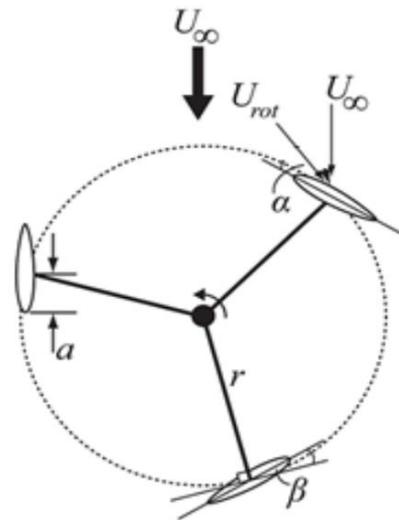
V_a = Kecepatan angin pada waktu tertentu (m/s)

A = Luas daerah sapuan angin (m^2)

Nilai Sudut Pasang Bilah

Mengubah sudut sudu turbin angin merupakan salah satu cara agar lebih efisien.

Peningkatan sudut serang ini dapat menghasilkan gaya angkat yang mempercepat putaran. Menurut Susilo Bambang Widodo (2019), sudut pemasangan sudu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya stall, dimana gaya hambat sudu airfoil meningkat dan kecepatan putaran turbin melambat. Rumus tersebut digunakan untuk mendapatkan sudut sudu β (pitch):



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

Keterangan :

β = Sudut pasang bilah

r = Jari-jari rotor (m)

TSR = Rasio kecepatan ujung

θ = Sudut bilah

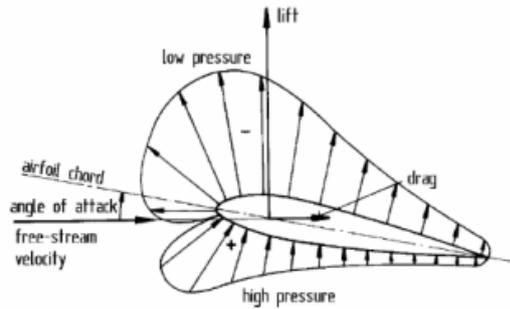
Sudut Serang

Dengan menggunakan teknik penentuan sudut serang melalui modifikasi sudut serang, cara untuk meningkatkan kinerja VAWT dapat dicapai. Secara teoritis, penyesuaian sudut serang melalui sistem penentuannya dapat signifikan meningkatkan putaran awal turbin dan kinerja VAWT. Oleh karena itu, pada TSR rendah, diperlukan amplitudo pitch yang besar untuk mengurangi sudut serang dan meningkatkan kinerja rotor. (Gebreel Abdalrahman, 2017). Besarnya sudut serang dihitung menggunakan persamaan :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta + \lambda} \right)$$

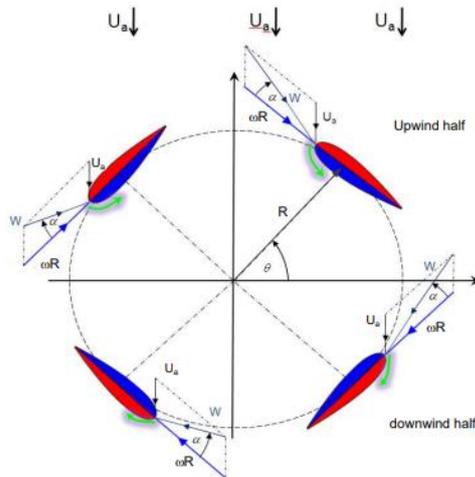
keterangan :

α = variable pitch
 λ = Tip speed ratio



Tip Speed Ratio

Kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas diukur sebagai rasio kecepatan ujung. Kecepatan putaran rotor akan dipengaruhi oleh rasio kecepatan ujung untuk kecepatan angin nominal tertentu. Rasio kecepatan tip turbin angin yang dilengkapi sudu tipe lift akan lebih besar dibandingkan turbin angin yang menggunakan sudu tipe drag (Hari Saputra, 2021). Persamaan digunakan untuk menghitung rasio kecepatan tip :



Gambar 2.17 Tip Speed Ratio

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

(sumber; I.B Alit, 2016)

Keterangan :

- λ = Tip Speed Ratio
- n = Putaran Rotor (Rpm)
- D = Diameter Rotor (m)
- V_a = Kecepatan angin (m/s)

Daya Generator

Daya generator adalah daya yang dihasilkan dari turbin angin yang disalurkan

menuju ke generator melalui *shaft*. Rumus mencari daya generator adalah

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

Keterangan :

- P_{gen} = daya generator (watt)
- V_{gen} = tegangan (volt)
- I_{gen} = Arus (ampere)

Efisiensi Sistem

Dengan membandingkan keluaran daya generator dengan keluaran daya angin, efisiensi sistem dapat ditentukan. Oleh karena itu, rumus efisiensi sistem dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

Keterangan:

- η_{sis} = efisiensi sitem (%)
- P_{gen} = daya generator (watt)
- P_a = daya turbin angin (watt)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan pengujian dengan menggunakan sampel random didapatkan data berikut ini :

Kode	Random	Sudut bilah Darrieus	Tipe Savonius	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
1	A1	0	U	276,5	7,3	2,2
2	A2	0	U	303,1	7,8	2,4
3	A3	0	U	298,4	7,5	2,4
4	B1	10	U	222,4	4,6	2
5	B2	10	U	196,8	4,1	1,96
6	B3	10	U	201,4	4,2	1,97
7	C1	15	U	91,9	1,1	0,4
8	C2	15	U	75,4	1	0
9	C3	15	U	95,1	1,2	0,4
10	D1	0	L	320,3	7,2	2,7
11	D2	0	L	360,7	8,12	2,9
12	D3	0	L	410,6	9,1	3,4
13	E1	10	L	199,7	4,1	1,9
14	E2	10	L	253,4	5,3	2,3
15	E3	10	L	220,6	4,6	2,1
16	F1	15	L	128,4	3,1	1,9
17	F2	15	L	148,1	3,6	2,5
18	F3	15	L	112,5	2,4	1,1

Setelah sampel random didapatkan, tahap selanjutnya adalah mengurutkan sampel random tersebut. Hasil data pengurutan dari sampel random :

Waktu (5Menit)	Sudut bilah darrieus	Tipe Savonius	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
Pengujian 1	0	U	276,5	7,3	2,2
Pengujian 2	0	U	303,1	7,8	2,4
Pengujian 3	0	U	298,4	7,5	2,4
Rata-rata			292,5	7,6	2,4
Pengujian 1	10	U	222,4	4,6	2
Pengujian 2	10	U	196,8	4,1	1,96
Pengujian 3	10	U	201,4	4,2	1,97
Rata-rata			206,8	4,3	1,9
Pengujian 1	15	U	91,9	1,1	0,4
Pengujian 2	15	U	75,4	1	0
Pengujian 3	15	U	95,1	1,2	0,4
Rata-rata			87,46	1,1	0,26
Pengujian 1	0	L	320,3	7,2	2,7
Pengujian 2	0	L	360,7	8,12	2,9
Pengujian 3	0	L	410,6	9,1	3,4
Rata-rata			363,86	8,14	2,9
Pengujian 1	10	L	199,7	4,1	1,9
Pengujian 2	10	L	253,4	5,3	2,3
Pengujian 3	10	L	220,6	4,6	2,1
Rata-rata			224,56	5,2	2,1
Pengujian 1	15	L	128,4	3,1	1,9
Pengujian 2	15	L	148,1	3,6	2,5
Pengujian 3	15	L	112,5	2,4	1,1
Rata-rata			129,66	3,0	1,83

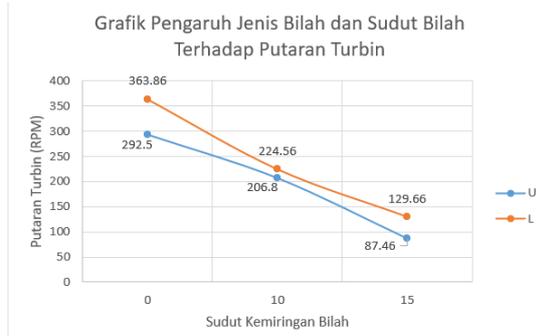
Dari perhitungan daya, efisiensi dan kecepatan ujung berdasarkan rumus diatas didapatkan hasil berikut :

No	Perhitungan	Jenis Sudu/Bilah					
		Bilah U			Bilah L		
		0°	10°	15°	0°	10°	15°
1	Daya Turbin Angin	42,17 Watt	35,22 Watt	34,11 Watt	44,68 Watt	21,87 Watt	13,23 Watt
2	Sudut Pasang Sudu	8°	-1°	-9°	6°	-3°	-1°
3	Sudut Serang	0,00389	-0,136	-0,194	0,0063	0,00166	-0,2104
4	Tip Rasio (TSR)	4,52	3,39	1,45	5,5	4,34	2,49
5	Daya Generator	18,24 Watt	8,17 Watt	0,286 Watt	23,6 Watt	10,92 Watt	5,49 Watt
6	CP	0,43	0,23	0,008	0,52	0,44	0,39

Data hasil perhitungan karakteristik turbin :

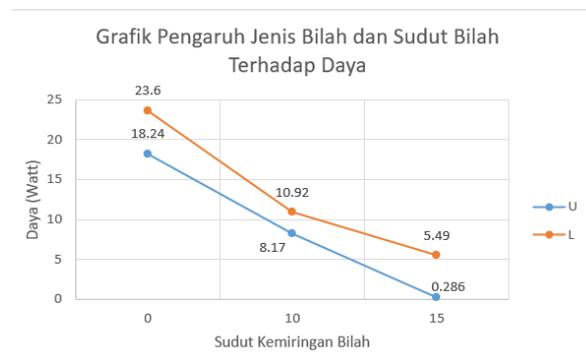
No	Perhitungan	Jenis Sudu/Bilah					
		Bilah U			Bilah L		
		0°	10°	15°	0°	10°	15°
1	Daya Turbin Angin	42,17 Watt	35,22 Watt	34,11 Watt	44,68 Watt	21,87 Watt	13,23 Watt
2	Sudut Pasang Sudu	8°	-1°	-9°	6°	-3°	-1°
3	Sudut Serang	0,00389	-0,136	-0,194	0,0063	0,00166	-0,2104
4	Tip Rasio (TSR)	4,52	3,39	1,45	5,5	4,34	2,49
5	Daya Generator	18,24 Watt	8,17 Watt	0,286 Watt	23,6 Watt	10,92 Watt	5,49 Watt
6	CP	0,43	0,23	0,008	0,52	0,44	0,39

Dari perhitungan diatas didapatkan nilai-nilai yang kemudian dimasukkan ke dalam bentuk grafik yang bertujuan untuk memudahkan pemahaman mengenai hasil penelitian.



Pengaruh variasi jenis bilah savonius dan sudut bilah darrieus terhadap putaran yang dihasilkan. Diketahui bilah savonius L dengan kemiringan bilah darrieus 0° menghasilkan putaran tertinggi yaitu 363,86 Rpm, sedangkan putaran terendah dihasilkan oleh bilah savonius tipe U dengan kemiringan 15° yang menghasilkan putaran hanya 87,46 Rpm.

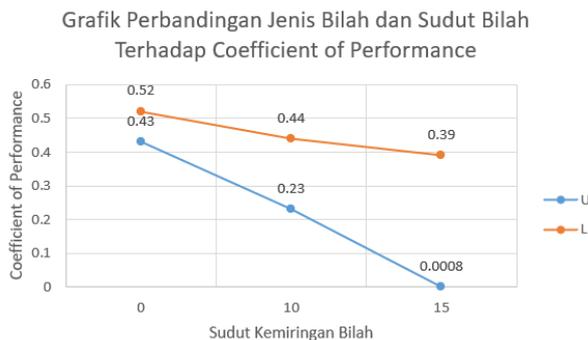
Dari hasil analisis grafik, terlihat bahwa semakin kecil sudut bilah pada turbin Darrieus dengan jenis penampang Savonius L mengakibatkan putaran turbin yang lebih besar. Fenomena ini disebabkan oleh adanya sudut pitch pada bilah Darrieus yang relatif kecil, sehingga bilah Darrieus tidak mengalami stall.



Pada grafik diatas diperoleh daya tertinggi pada variabel bilah savonius tipe L dengan sudut kemiringan bilah darrieus 0° yaitu 23,6 watt sedangkan daya terendah ada pada variabel bilah savonius tipe U dengan sudut kemiringan darrieus 15° sebesar 0,286 watt.

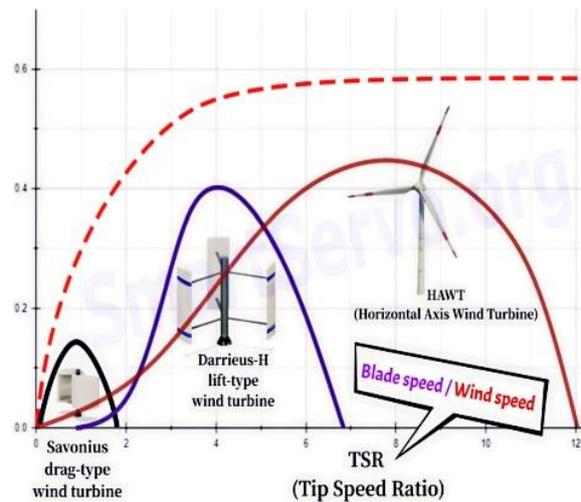
Dari analisis grafik, dapat disimpulkan bahwa semakin besar sudut kemiringan bilah turbin, daya listrik yang dihasilkan menjadi semakin kecil. Fenomena ini muncul karena sudut kemiringan bilah Darrieus yang terlalu lebar menyebabkan terjadinya stall pada airfoil bilah. Hal ini mengakibatkan aliran angin yang melewati

bilah turbin tidak optimal, sehingga turbin tidak berputar dengan efisiensi maksimal.



Grafik diatas menunjukkan pengaruh jenis bilah dan kemiringan bilah terhadap nilai coefficient of performance (COP). Pada garis oranye, turbin dengan jenis bilah Savonius L dan sudut kemiringan bilah 0° menghasilkan COP sebesar 52%. Dengan peningkatan sudut kemiringan menjadi 10° , nilai COP turun menjadi 44%, dan pada kemiringan bilah 15° , nilai COP lebih lanjut menurun menjadi 39%. Sementara itu, untuk bilah jenis U dengan sudut kemiringan 0° , nilai COP sebesar 43%. Namun, ketika sudut kemiringan bilah ditingkatkan menjadi 10° , nilai COP menurun drastis menjadi 23%, dan pada sudut kemiringan bilah 15° , nilai COP mencapai hanya 0,008%.

Hasil analisis grafik menunjukkan bahwa turbin dengan variasi bilah L pada sudut 0° menghasilkan nilai Koefisien Kinerja (COP) tertinggi, mencapai 52%. Temuan ini mendukung prinsip Batas Betz yang menyatakan bahwa turbin angin ideal tidak dapat menangkap lebih dari 59,3% dari energi kinetik aliran angin. Secara keseluruhan, nilai COP terendah tercatat pada variasi turbin jenis savonius U dengan sudut kemiringan bilah 15° , hanya mencapai 0,008%. Fenomena ini disebabkan oleh hambatan yang dihasilkan oleh sudut kemiringan bilah, menyebabkan aliran angin tidak dapat melewati turbin dengan efisiensi optimal dan mengakibatkan putaran turbin yang lambat.



KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pengujian dengan variabel sudut bilah turbin darrieus tipe H dan bentuk bilah turbin savonius terhadap performa turbin hybrid pada rancang bangun pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) didapatkan sebuah kesimpulan bahwa variabel kemiringan dan jenis bilah turbin berpengaruh terhadap daya performa. Hasil turbin dengan jenis bilah savonius L dan sudut bilah 0° menghasilkan daya output listrik terbesar yaitu 30,94 watt. Hal tersebut disebabkan pada sudut bilah 0° angin yang menabrak turbin tidak mengalami gangguan sehingga resistansi angin terhadap baling-baling dapat dikurangi, meminimalkan hambatan terhadap gerakan putar turbin. Dengan mengatur sudut serang pada 0 derajat, dapat dihindari sudut serang negatif yang dapat mengakibatkan penurunan efisiensi hal ini dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja turbin secara keseluruhan. pada bila savonius L memiliki tingkat kestabilan yang lebih baik karena bentuknya yang memungkinkan redistribusi beban secara lebih merata saat berputar. Hal ini dapat mengurangi getaran turbin dan membuatnya lebih tahan terhadap perubahan arah angin yang tiba-tiba berubah.

Saran untuk penelitian selanjutnya rancang bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang telah direncanakan memiliki potensi pengembangan yang signifikan untuk menyempurnakan desain dan kemajuan dalam bidang penelitian ini. Berikut adalah beberapa

saran pengembangan yang dapat diimplementasikan:

1. Pemilihan Generator: Pemilihan generator perlu mendapat perhatian khusus, karena penggunaan generator yang sesuai dengan perencanaan dapat menghasilkan performa maksimal. Evaluasi dan pemilihan generator yang lebih efisien dan sesuai dengan karakteristik turbin dapat meningkatkan kinerja keseluruhan PLTB.
2. Variasi Sudut Bilah dengan Ukuran Lebih Kecil: Implementasi variasi sudut bilah dengan ukuran yang lebih kecil dapat menjadi solusi untuk menghindari atau mengurangi stall pada turbin. Penyesuaian ini dapat meningkatkan efisiensi turbin dalam berbagai kondisi angin.
3. Pemilihan Bilah Airfoil yang Tepat: Perhatian lebih lanjut terhadap pemilihan bilah airfoil menjadi penting karena karakteristik masing-masing airfoil dapat berbeda tergantung pada kecepatan aliran angin. Pemilihan yang cermat dapat meningkatkan performa aerodinamis turbin.
4. Peningkatan Bahan Turbin: Meningkatkan kualitas bahan yang digunakan untuk turbin, disesuaikan dengan kecepatan angin yang dihadapi, dapat mencegah kegagalan pada saat pengujian dan memastikan turbin berputar secara maksimal. Pemilihan bahan yang lebih tahan terhadap korosi dan ketahanan terhadap lingkungan eksternal dapat meningkatkan umur turbin.

Penerapan saran-saran ini dapat membantu meningkatkan efisiensi dan kinerja PLTB, serta memberikan kontribusi positif terhadap perkembangan teknologi pembangkit listrik tenaga bayu secara keseluruhan.

REFERENSI

- S.M. Rassoulinejad-Mousavi, M., 2013 An experimental study of a three-bucket H-rotor and Savonius wind turbine hybrid. Department of Renewable Energy, Materials and Energi Research Center, Karaj, Iran.
- Wakui, T., Takagi, H., Hashizume, T., (2014). Hybrid Darrieus-Savonius rotors for stand-alone power systems. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*.
- Teguh Dewo Maulana, (2019). "Membangun Fasilitas Energi Angin Bergerak", Univeritas Pasundan.
- Daryanto, Y., 2007, Analisis kapasitas angin untuk produksi energi angin. Yogyakarta: BALAI PPTAGG – UPT-LAGG.
- Ikbal Pandu Prakoso, (2019). "Penambahan dua bilah tipe Savonius pada perencanaan turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus-H untuk pembangkit listrik", Universitas Islam Malang.
- J. Victor Tuapetel, Ikbal Arif Triprayoga, Putu M. Santika, (2019). "Pemeriksaan Hasil Uji Kinerja Turbin Angin Savonius 4-Blade" Teknik Mesin ITI.
- Fadiel Muhammad Akbar dan Chalillullah Rangkuti, (2018). "Pengujian Kinerja Turbin Angin Kombinasi Darrieus-Savonius", Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti.
- Agus Muhamad Arsad, (2010). "Pengembangan Kode Desain dan Analisis Turbin Angin Sumbu Vertikal Darrieus Tipe H" Universitas Nurtanio Bandung.
- Soelaiman, (2006). "Dampak Geometri Sudu terhadap Efisiensi Turbin Angin Savonius", *Majalah Ilmiah STTR*, Cebu.
- F.W. Sears dan M.W. Zemansky. Young dan Freedman (1962). *Buku Fisika untuk Universitas 1*. Jakarta: Binacipta.
- I.B. Alit (2016). "Turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius dengan banyak tingkatan dan perubahan posisi sudut" Teknik

Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram.

Gebreel Abdalrahman, William Melek, dan Fue-Sang Lien (2017). "Controlling the pitch angle of a small-scale Darrieus vertical axis wind turbine (H-Type VAWT) equipped with straight blades" Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada

Susilo Bambang Widodo, Eva Magdalena Silalahi dan Atmadi Priyono (2019). "Pengaruh Sudut Pemasangan dan Jumlah Sudut Terhadap Daya Modifikasi Turbin Angin H-Darrieus Sebagai Sumber Tenaga Listrik Dalam Negeri" Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia, Jakarta