

## Rancang Bangun dan Komparasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan Menggunakan Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Savonius dan Jenis Darrieus Tipe-H

Nur Fatkhiyaturrosidah<sup>1</sup>, Rizki Nurilyas Ahmad<sup>1</sup>, Hasyim Asyari<sup>1</sup>, Umar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jalan A. Yani Tromol Pos 1, Pabelan, Sukoharjo, Indonesia

 Email korespondensi: [nurfatkhiyaturrosidah@gmail.com](mailto:nurfatkhiyaturrosidah@gmail.com)

**Abstrak.** Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membandingkan kinerja dua jenis turbin angin sumbu vertikal, yaitu Savonius dan Darrieus tipe-H. Parameter kinerja yang dianalisis yaitu kecepatan putar (RPM), tegangan (Volt), arus (Ampere), dan daya listrik (Watt) yang dihasilkan. Hasil perbandingan kinerja yang diperoleh dari penelitian ini yaitu bahwa turbin Savonius dapat berputar dan menghasilkan tegangan pada kecepatan angin lebih rendah dibanding Darrieus tipe-H. Savonius mampu mulai berputar pada kecepatan angin di bawah 2,0 m/s dan menghasilkan tegangan hingga 21,8 V saat mencapai 68 RPM, sedangkan Darrieus mulai efektif berputar di atas 2,8 m/s dan menghasilkan tegangan maksimum sebesar 17,0 V pada 49 RPM. Kondisi berbeban, turbin Savonius mulai menghasilkan arus pada kecepatan angin  $\pm 4,11$  m/s. Tegangan mencapai 12,5 V, arus 0,22 A, serta daya 2,75 W dalam kecepatan angin 5,70 m/s. Sebaliknya, turbin Darrieus tipe-H hanya mampu menghasilkan tegangan hingga 8,2 V pada kecepatan angin 5,53 m/s namun belum mengalirkan arus, sehingga daya keluaran masih 0 W karena tegangan keluarannya belum bisa melampaui tegangan baterai. Dengan demikian, turbin Savonius lebih cocok untuk diaplikasikan di daerah yang memiliki kecepatan angin rendah karena kinerjanya yang lebih baik.

**Kata kunci:** PLTB; turbin angin sumbu vertikal; kecepatan angin; perbandingan kinerja



## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan bertambahnya penduduk dan perkembangan industri [1], dengan demikian pemerintah Indonesia berkomitmen untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan sebagai pembangkit listrik. Salah satu energi terbarukan tersebut adalah angin atau bayu, yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik melalui Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), karena Indonesia merupakan negara kepulauan sehingga potensi anginnya memadai untuk memutar turbin angin dalam sistem PLTB. Terdapat dua pembangkit listrik tenaga bayu skala besar yang telah beroperasi di Indonesia, yaitu PLTB Sidrap dan PLTB Tolo Jeneponto dengan kapasitas masing-masing 75MW dan 72MW yang terletak di Provinsi Sulawesi Selatan [2].

Potensi pengembangan PLTB di Indonesia tinggi, namun masih terdapat beberapa kendala. Salah satu kendalanya adalah kecepatan angin yang relatif rendah dan cenderung tidak stabil, jenis turbin pada sistem PLTB yang tepat untuk kondisi angin ini yaitu turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu horizontal memiliki kinerja yang baik, namun dinilai kurang optimal untuk kondisi angin yang rendah karena turbin angin sumbu horizontal mampu menghasilkan energi yang jauh lebih tinggi pada kecepatan angin yang tinggi [3]. Turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dan jenis Darrieus tipe-H tersebut menarik untuk dijadikan bahan penelitian karena kemampuannya beroperasi pada kecepatan angin rendah dan arah angin bervariasi, seperti di Indonesia [4].

Berdasarkan penelitian terdahulu, jenis turbin angin sumbu vertikal dalam kondisi kecepatan angin rendah lebih cocok untuk jenis Savonius [1]. Hal tersebut dikarenakan prinsip kerja yang berbeda, jenis Savonius dapat berputar sendiri (*self-starting*), sehingga dapat bekerja secara baik pada kecepatan angin rendah. Jenis Darrieus tipe-H memerlukan bantuan eksternal untuk mulai berputar dan jenis Darrieus tipe-H dinilai kurang baik pada kecepatan angin rendah [5]. Selain itu, desain dari kedua jenis tersebut juga mempengaruhi. Desain turbin sumbu vertikal jenis Savonius seperti huruf S sehingga dapat menangkap angin dari semua arah dan berputar meski dalam kondisi angin rendah. Sedangkan, jenis Darrieus tipe-H memiliki bentuk seperti *airfoil* pesawat dan lebih sensitif terhadap kecepatan angin.

Penelitian ini merancang dan membandingkan kinerja kedua jenis turbin tersebut dalam menghasilkan listrik, khususnya pada lokasi dengan kondisi angin rendah seperti di Pantai Parangtritis, Bantul, Yogyakarta. Penelitian menghasilkan data kinerja turbin Savonius dan Darrieus tipe-H dalam kondisi angin rendah, serta rekomendasi jenis turbin yang lebih baik untuk lokasi dengan karakteristik yang sama. Hasil penelitian dapat menjadi referensi bagi pengembangan PLTB skala kecil, khususnya di daerah dengan



potensi angin rendah. Klasifikasi kecepatan angin berdasarkan skala beaufort terdapat beberapa kondisi, kecepatan angin yang berkisar pada 0 – 5,4 m/s merupakan kecepatan angin rendah, kecepatan angin 5,5 – 10,7 m/s merupakan kecepatan angin sedang, kecepatan angin 10,8 – 17,1 m/s merupakan kecepatan angin tinggi, dan kecepatan angin >17,1 m/s merupakan kecepatan angin yang sangat tinggi [6].

## METODE

Penelitian ini berfokus pada kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan menggunakan turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dan jenis Darrieus tipe-H dalam kondisi angin yang cenderung rendah dalam menghasilkan listrik, baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan beban. Penelitian mencakup perbandingan berbagai parameter utama seperti, kecepatan putar (RPM), tegangan (Volt), arus (Ampere), dan kemampuan menghasilkan daya listrik (Watt), pada kecepatan angin tertentu.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian



Penelitian ini dilakukan secara eksperimental yang meliputi beberapa tahapan utama, seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Peneliti memulai dengan pengambilan data kecepatan dan arah angin di lokasi yang dipakai untuk melakukan pengujian nantinya, yaitu di Pantai Parangtritis, Bantul, Yogyakarta. Setelah mendapatkan data tersebut, maka dilakukan studi literatur untuk memahami dasar teori mengenai PLTB dan jenis turbin angin yang sesuai untuk kondisi kecepatan angin yang didapatkan. Hasil dari studi literatur, jenis turbin angin yang cocok untuk kondisi kecepatan angin tersebut yaitu turbin angin sumbu vertikal. Penelitian ini membandingkan kedua jenis turbin angin sumbu vertikal, yaitu jenis Savonius dengan jenis Darrieus tipe-H. Setelah penentuan jenis turbin maka dilakukan persiapan alat dan bahan, yang kemudian dilanjutkan dengan pembuatan turbin. Turbin angin yang telah dirakit kemudian diuji dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban untuk memperoleh data masing-masing turbin, seperti kecepatan putar, tegangan, arus, daya listrik dan pengambilan data kecepatan angin. Data hasil pengujian kemudian dianalisis, guna membandingkan kinerja kedua jenis turbin angin tersebut. Penelitian ditutup dengan penyusunan naskah publikasi berdasarkan data keseluruhan yang diperoleh.

### Data Awal Kecepatan Angin

Tabel 1. Data Awal Kecepatan Angin

No.	Kecepatan Angin (Knots)	Kecepatan Angin (m/s)
1.	3,04 knots	1,56 m/s
2.	3,07 knots	1,57 m/s
3.	3,10 knots	1,59 m/s
4.	3,29 knots	1,69 m/s
5.	3,57 knots	1,83 m/s
6.	4,29 knots	2,20 m/s
7.	4,45 knots	2,28 m/s
8.	4,48 knots	2,30 m/s
9.	4,89 knots	2,51 m/s
10.	6,93 knots	3,56 m/s

Sebelum dilakukan perancangan sistem, penting untuk mengetahui bagaimana kondisi dan arah angin di tempat yang akan dipakai untuk pengujian alat. Data kecepatan angin diambil di Pantai Parangtritis, Bantul, Yogyakarta dilakukan pada hari Selasa, 21



Januari 2025, dengan bantuan anemometer yang berfungsi untuk mengukur kecepatan angin dalam satuan knots. Nilai kecepatan angin dalam satuan knots dikonversi ke satuan meter per detik (m/s) dengan menggunakan faktor konversi sebagai berikut, 1 knots = 0,51444 m/s [7]. Sebagaimana seperti yang ditunjukkan pada tabel 1, bahwa nilai kecepatan angin mengalami kenaikan baik dalam satuan knots maupun setelah dikonversi ke meter per detik (m/s). Misalnya, kecepatan angin awal sebesar 3,04 knots setara dengan 1,56 m/s, kemudian mengalami kenaikan menjadi 4,45 knots yang setara dengan 2,28 m/s, hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 6,93 knots atau 3,56 m/s. Pengambilan data kecepatan angin awal digunakan untuk memperkirakan ukuran penampang yang sesuai. Data ini menjadi parameter input dalam perhitungan berdasarkan perhitungan daya angin, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (1).

$$P = 0,5 \times \rho_a \times A \times V^3 \quad (1)$$

Di mana:

P = daya angin (Watt)

0,5 = rumus dasar energi kinetik

$\rho_a$  = densitas angin ( $\text{kg/m}^3$ )

A = luas sapuan turbin ( $\text{m}^2$ )

$V^3$  = kecepatan angin ( $\text{m/s}$ )

Persamaan (1) merupakan rumus untuk menghitung daya angin yang ditangkap oleh turbin pada area penampang tertentu [8]. Luas penampang turbin akan dihitung untuk menghasilkan daya sebesar 25 Watt pada kecepatan angin rendah yang diperoleh dari data lapangan. Nilai  $\rho_a$  (densitas angin) diasumsikan sebesar  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Berdasarkan persamaan tersebut, luas penampang yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya sebesar 25 Watt yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P &= 0,5 \times \rho_a \times A \times V^3 \\ 25 &= 0,5 \times 1,2 \times A \times 3,56^3 \\ 25 &= 0,5 \times 1,2 \times A \times 45,118 \\ 25 &= 27,07 \times A \\ A &= \frac{25}{27,07} \\ A &= 0,92 \text{ m}^2 \end{aligned}$$



Berdasarkan perhitungan persamaan tersebut, diperoleh luas penampang sebesar  $0,92 \text{ m}^2$ . Untuk mempermudah proses perancangan, maka nilai tersebut dibulatkan menjadi  $1 \text{ m}^2$ . Luas penampang tersebut dinyatakan sebagai hasil perkalian antara lebar (L) dan tinggi (t), yaitu  $A = L \times t$ . Sehingga, lebar penampang adalah 1m dan tinggi penampang 1m.

### Pengujian Awal Generator

Generator tanpa beban

**Tabel 2.** Pengujian Generator Tanpa Beban

No.	Kecepatan Putar (RPM)	Tegangan (Volt)
1.	$\pm 100$	7,6
2.	$\pm 300$	11,8
3.	$\pm 500$	17,2
4.	$\pm 700$	37,5
5.	$\pm 900$	53,2
6.	$\pm 1100$	68,3
7.	$\pm 2000$	85,7

Tabel 2 menunjukkan data hasil pengujian generator tanpa beban, yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar dari generator. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan putar generator dengan tegangan output dari generator berbanding lurus, semakin tinggi kecepatan putarnya maka semakin besar juga tegangan outputnya. Kecepatan putar  $\pm 100$  RPM menghasilkan tegangan output sebesar 7,6 V. Ketika kecepatan putar dinaikkan menjadi  $\pm 300$  RPM, tegangan output naik secara signifikan menjadi 11,8 V. Tegangan output terus naik seiring kecepatan putar bertambah hingga mencapai tegangan sebesar 85,7 V pada kecepatan putar  $\pm 2000$  RPM. Peningkatan tegangan output tidak selalu konstan, karena keadaan titik jenuh medan magnet, rugi-rugi yang terdapat di dalam rangkaian generator, atau batasan lainnya dari generator tersebut. Pengujian ini dalam kondisi generator tanpa beban, sehingga nilai tegangan output yang didapatkan belum dipengaruhi oleh arus beban.



Generator dengan beban

**Tabel 3.** Pengujian generator dengan beban

No.	Kecepatan Putar (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
1.	±100	4,6	0,44	2,02
2.	±300	6,5	0,89	5,78
3.	±500	9,3	1,03	9,57
4.	±700	11,5	1,16	13,34
5.	±900	14,2	1,27	18,03
6.	±1100	14,7	1,42	20,8
7.	±2000	15,1	1,54	23,2

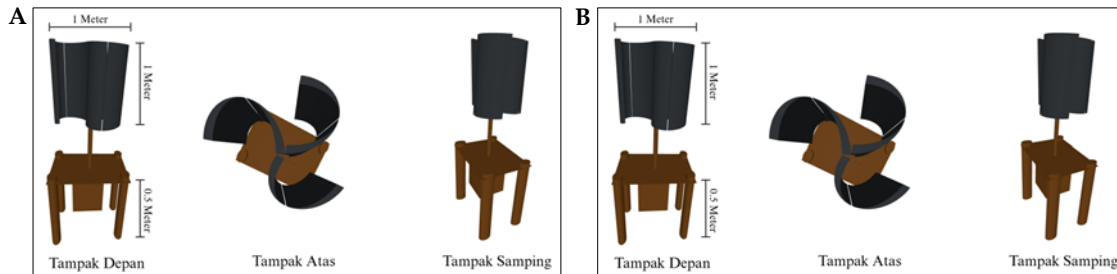
Pengujian generator dengan beban dilakukan untuk mengetahui spesifikasi *real* generator ketika digunakan dalam kondisi operasional yang sesungguhnya, yaitu ketika mengalirkan arus ke beban guna menghitung rasio pulley. Berdasarkan data pada tabel 3, terdapat kenaikan tegangan, arus, dan daya seiring dengan bertambahnya kecepatan putar. Kecepatan putar ±100 RPM, generator hanya menghasilkan tegangan sebesar 4,6 V, arus 0,44 A, dan daya 2,02 W, menunjukkan bahwa pada putaran rendah generator belum mampu mengalirkan arus secara efektif. Akan tetapi, saat kecepatan putar dinaikkan menjadi ±300 RPM, tegangan menjadi 6,5 V, arus mulai mengalir sebesar 0,89 A, dan menghasilkan daya sebesar 5,78 W. Seiring dengan kenaikan kecepatan putar mencapai ±2000 RPM, tegangan terus naik hingga 15,1 V, arus mencapai 1,54 A, dan daya yang dihasilkan adalah 23,2 W. Keadaan tersebut menunjukkan bahwa kinerja generator meningkat secara bertahap dan konsisten terhadap pertambahan kecepatan putar. Jika dibandingkan dengan pengujian generator tanpa beban, tegangan yang dihasilkan pada kondisi dengan beban cenderung lebih rendah karena adanya resistansi internal pada generator yang menyebabkan penurunan tegangan saat arus mengalir ke beban, serta generator belum mampu memenuhi kebutuhan daya beban yang digunakan. Data pengujian generator ini kemudian akan dibandingkan dengan data pengujian awal turbin, untuk menentukan rasio pulley yang digunakan dalam sistem transmisi antara turbin dengan generator, berdasarkan persamaan (2).

$$Rasio\ pulley = \frac{RPM\ turbin}{RPM\ generator} \quad (2)$$



Rasio tersebut ditentukan dari nilai kecepatan putar maksimal kedua jenis turbin, tetapi diambil yang paling rendah. Kemudian dibandingkan dengan nilai kecepatan putar generator berbeban yang sudah bisa menghasilkan tegangan sebesar  $\pm 12$  V.

### Desain Turbin

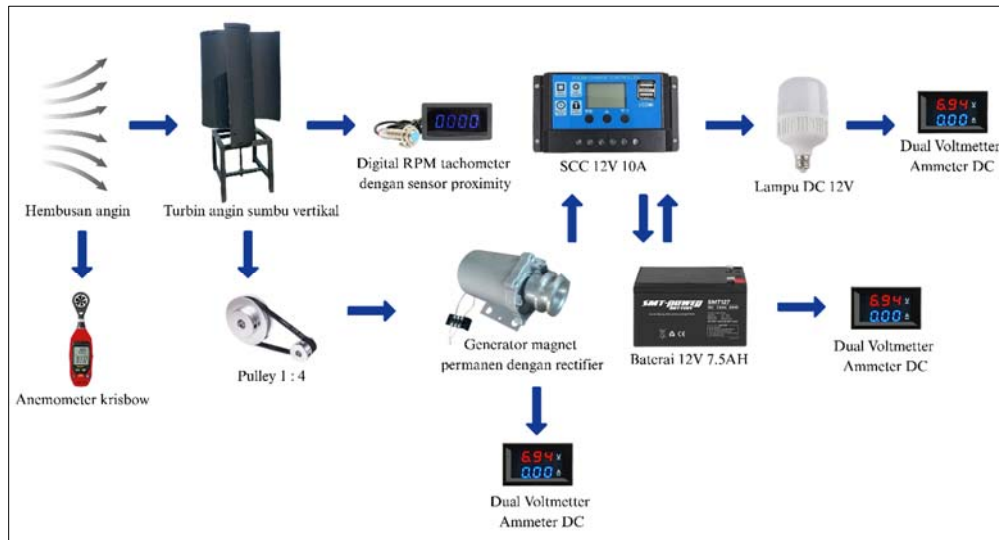


**Gambar 2.** (A) desain turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius, dan (B) desain turbin angin sumbu vertikal jenis Darrieus tipe-H

Desain turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dan jenis Darrieus tipe-H memiliki beberapa kesamaan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Kesamaan tersebut berupa bahan yang dipakai, dalam pembuatan penampang menggunakan bahan galvalum, ass menggunakan bahan besi beton, penghubung ass dengan penampang pada turbin Darrieus tipe-H menggunakan besi *hollow* bulat, dan untuk penyangga bawah menggunakan bahan besi *hollow* kotak. Selain kesamaan dari bahan yang dipakai dalam pembuatannya, terdapat kesamaan lainnya yaitu ukuran. Penyangga bawah memiliki ukuran tinggi 0,5m lebar 0,5m, ass dengan tinggi  $\pm 1,5$ m, penampang memiliki luas  $1\text{m}^2$  (lebar 1m tinggi 1m) jika tampak depan, lebar per penampang pada turbin angin jenis Savonius yaitu 0,5m, penampang turbin angin jenis Darrieus tipe-H juga memiliki lebar 0,5m tetapi dilipat hingga menyerupai bentuk *airfoil* pada pesawat. Turbin angin jenis Savonius menggunakan 3 sudu, karena desain turbin Savonius dengan 3 sudu memiliki efisiensi yang cukup baik dalam kondisi angin rendah hingga sedang [1]. Turbin angin jenis Darrieus tipe-H juga menggunakan 3 sudu, karena turbin angin jenis Darrieus tipe-H yang memiliki sudu berjumlah 3 dinilai lebih efisien daripada turbin yang memiliki sudu 2 atau 4 [9].



Perancangan Sistem PLTB



Gambar 3. Skema perancangan sistem PLTB

Gambar 3 menunjukkan skema perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dan jenis Darrieus tipe-H. Angin yang berhembus akan memutar poros turbin angin, kemudian energi mekanik dari putaran turbin ini diteruskan melalui pulley yang dihubungkan pada poros turbin dan generator magnet *permanent* menggunakan *timing belt* untuk meneruskan gerakan putar dari turbin ke generator. Pulley yang digunakan dalam sistem ini memiliki rasio 1 : 4. Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, listrik disalurkan ke SCC (12V/24V 10A) guna mengatur pengisian daya ke baterai agar tetap aman dan stabil. Selain itu, SCC juga mendistribusikan listrik ke beban (lampu DC 12V). *Solar Charge Controller* berfungsi untuk mengontrol, melindungi, serta mengoptimalkan aliran daya dalam sistem agar tidak terjadi *overcharge* pada baterai, maupun kerusakan pada baterai dan beban. Sistem ini juga dilengkapi dengan alat ukur seperti, anemometer yang dapat berfungsi untuk mengukur kecepatan angin, digital RPM tachometer dengan sensor proximity yang berfungsi untuk mengukur nilai kecepatan putar poros turbin dan dual voltmeter ammeter digital yang berfungsi untuk mengukur tegangan serta arus pada output generator, baterai, dan beban. Penggunaan alat ukur tersebut dapat memudahkan peneliti dalam pengambilan data.



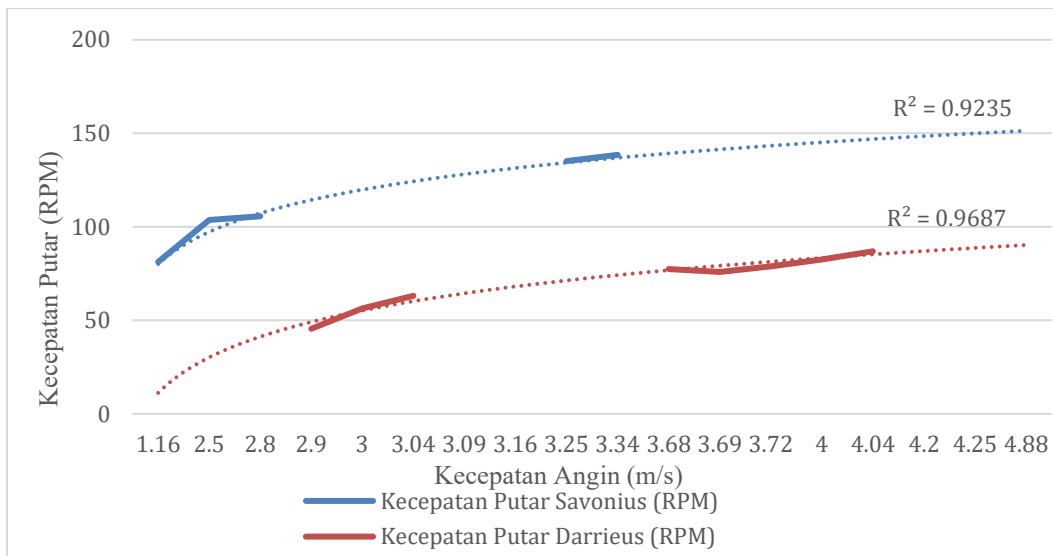
**HASIL**

**Pengujian Awal Turbin Jenis Savonius dan Jenis Darrieus Tipe-H**

**Tabel 4.** Pengujian turbin Savonius dan Darrieus tipe-H

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Putar Savonius (RPM)	Kecepatan Putar Darrieus Tipe-H (RPM)
1.	1,16	81,3	
2.	2,50	103,6	
3.	2,80	105,6	
4.	2,90		45,5
5.	3,00		56,3
6.	3,04		63,1
7.	3,09	110,0	
8.	3,16		71,2
9.	3,25	135,1	
10.	3,34	138,5	
11.	3,68		77,4
12.	3,69		75,8
13.	3,72		78,8
14.	4,00	149,5	82,5
15.	4,04		86,9
16.	4,20	149,7	
17.	4,25		89,6
18.	4,88	155,5	





Gambar 4. Grafik pengujian turbin

Pengujian turbin dilaksanakan untuk mengetahui kecepatan putar (RPM) dari kedua jenis turbin angin sumbu vertikal, yaitu Savonius dan Darrieus tipe-H sebagai dasar dalam penentuan rasio pulley yang sesuai dalam sistem PTLB ini. Dalam pengujian, turbin Savonius menunjukkan kemampuan yang lebih baik dari turbin Darrieus tipe-H untuk berputar pada kecepatan angin rendah. Kecepatan angin 1,16 m/s turbin Savonius mampu berputar dalam kecepatan 81,3 RPM dan terus meningkat hingga 155,5 RPM dalam kecepatan angin 4,88 m/s. Sedangkan, turbin Darrieus tipe-H baru mulai berputar dalam kecepatan angin 2,9 m/s dan mencapai RPM maksimum 82,5 pada kecepatan angin 4,00 m/s. Perbedaan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa turbin Savonius dapat bekerja dengan lebih baik pada kecepatan angin rendah, sedangkan turbin Darrieus tipe-H memerlukan kecepatan angin sedang hingga tinggi untuk mulai berputar. Kondisi tersebut sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa, turbin Savonius lebih tepat digunakan pada kecepatan angin rendah karena dapat memulai berputar sendiri. Sedangkan, turbin Darrieus tipe-H membutuhkan beberapa sumber eksternal untuk memulai berputar karena jenis Darrieus tipe-H memiliki torsi awal yang sangat rendah [10]. Selain dari kemampuan jenis Savonius untuk melakukan *self-starting* atau kemampuan memulai putaran sendiri, maka jenis Savonius lebih baik pada kondisi angin kecepatan rendah dikarenakan desainnya memungkinkan untuk menangkap angin dari segala arah. Dengan menentukan rasio pulley yang tepat, maka sistem PLTB dapat mengoptimalkan kinerja dari konversi energi mekanik menjadi energi listrik, terutama dalam kondisi angin rendah yang umum terjadi di wilayah Indonesia. Hasil pengujian turbin ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian awal generator, dan dijadikan dasar dalam menentukan rasio pulley dengan membandingkan



kecepatan putar turbin dengan kecepatan putar generator, perbandingan tersebut menggunakan persamaan (2).

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio pulley} &= \frac{\text{RPM turbin}}{\text{RPM generator}} \\
 &= \frac{8,96}{700} \\
 &= \frac{0,896}{7} \\
 &= \frac{1}{7} \\
 &= 1 : 7
 \end{aligned}$$

Pulley dengan rasio 1:7 cukup sulit ditemukan di pasaran, sehingga sebagai alternatif digunakan pulley dengan rasio 1:6. Namun, hasil pengujian menunjukkan bahwa putaran turbin masih terlalu berat. Oleh karena itu, dilakukan penyesuaian kembali dengan menggunakan pulley rasio 1:4 guna memperoleh putaran turbin yang lebih ringan.

### Kalibrasi Alat Ukur

Alat ukur tegangan (Volt) dan arus (Ampere)

**Tabel 5.** Data Kalibrasi Alat Ukur Tegangan Dan Arus

No.	Dual Voltmeter Ammeter Digital (Volt)	Clamp Multimeter Hobotest HT207D (Volt)	% <i>Error</i>	Dual Voltmeter Ammeter Digital (Ampere)	Clamp Multimeter Hobotest HT207D (Ampere)	% <i>Error</i>
	Dual Voltmeter Ammeter Digital 1					
1.	3,91	3,91	0,00%	0,00	0,00	0,00%
2.	5,15	5,15	0,00%	0,00	0,00	0,00%
3.	7,90	7,89	0,13%	0,02	0,02	0,00%
4.	10,1	10,19	0,88%	0,31	0,31	0,00%
5.	12,0	12,0	0,00%	0,58	0,55	5,45%
Dual Voltmeter Ammeter Digital 2						



1.	3,92	3,94	0,51%	0,07	0,07	0,00%
2.	5,09	5,14	0,97%	0,07	0,07	0,00%
3.	7,41	7,45	0,54%	0,09	0,09	0,00%
4.	10,5	10,52	0,19%	0,12	0,11	9,09%
5.	12,16	12,1	0,49%	0,15	0,15	0,00%
Dual Voltmeter Ammeter Digital 3						
1.	3,79	3,80	0,26%	0,06	0,05	20%
2.	5,23	5,26	0,57%	0,07	0,07	0,00%
3.	7,35	7,44	1,21%	0,09	0,09	0,00%
4.	10,1	10,23	1,27%	0,12	0,12	0,00%
5.	12,1	12,15	0,41%	0,14	0,15	6,6%

Sistem ini menggunakan tiga unit Dual Voltmeter Ammeter Digital sebagai alat ukur tegangan dan arus. Sebelum digunakan, alat-alat tersebut dikalibrasi dengan membandingkan hasil pengukurannya terhadap Clamp Multimeter Hobotest HT207D sebagai alat ukur acuan. Hasil kalibrasi yang ditunjukkan dalam Tabel 5 yaitu, ketiga alat memiliki tingkat akurasi tegangan yang sangat baik, dengan sebagian besar persentase error berada di bawah 1%. Selisih nilai tegangan umumnya sangat kecil, seperti pada alat pertama yang menunjukkan nilai 7,90 V dengan 7,89 V dari alat acuan, menghasilkan error hanya 0,13%. Hal ini menunjukkan bahwa alat ukur digital tersebut cukup andal untuk memantau tegangan sistem. Ketika pengukuran arus, meskipun terdapat beberapa nilai error yang tampak besar seperti 20%, hal ini disebabkan oleh arus yang sangat kecil, sehingga selisih kecil dapat menghasilkan error relatif yang tinggi. Dual Voltmeter Ammeter Digital dapat dikatakan layak digunakan sebagai alat indikator dalam sistem PLTB, karena selain akurat, alat ini juga memudahkan proses pengambilan data tanpa perlu melakukan pengukuran manual.

Alat ukur kecepatan putar (RPM)

**Tabel 6.** Kalibrasi Alat Ukur Kecepatan Putar (RPM)

No.	Digital RPM Tachometer Dengan Sensor Proximity (RPM)	Digital RPM Tachometer DT-2234C+ (RPM)	% Error



1.	292	293,3	0,44%
2.	597	597,3	0,05%
3.	756	756,9	0,12%
4.	934	934,3	0,04%
5.	1262	1263	0,08%

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Tabel 6, dapat diketahui bahwa alat ukur kecepatan putar digital RPM tachometer dengan sensor proximity menunjukkan akurasi yang tinggi, dengan persentase error yang sangat kecil di setiap titik pengukuran. Persentase error tertinggi hanya sebesar 0,44% pada pengukuran 292 RPM, sedangkan pengukuran lainnya menunjukkan error berkisar antara 0,04% hingga 0,12%, bahkan ada yang hanya 0,05%. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan antara pembacaan alat tachometer sensor proximity dengan alat acuan digital tachometer DT-2234C+ sangat kecil dan tidak signifikan. Meskipun terdapat sedikit perbedaan pembacaan antara kedua alat, hal tersebut dapat dimaklumi karena perbedaan prinsip kerja. RPM tachometer dengan sensor proximity bekerja berdasarkan deteksi medan elektromagnetik terhadap benda logam yang berputar, sedangkan tachometer DT-2234C+ menggunakan deteksi cahaya pantul dari permukaan objek berputar. RPM tachometer dengan sensor proximity tetap sangat layak digunakan sebagai alat ukur kecepatan putar dalam sistem PLTB, terutama karena konsistensi dan akurasi hasil pengukurannya yang mendekati alat standar.

### Pengujian Sistem PLTB

PLTB dengan turbin angin Savonius pada kondisi tanpa beban

**Tabel 7.** (A) Hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Savonius tanpa beban hari pertama, dan (B) Hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Savonius tanpa beban hari kedua

A

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Putar Turbin (RPM)	Tegangan Generator (V)	Arus Generator (A)	Daya Generator (W)
1.	2,02	24	12,1	0,00	0
2.	2,13	25	12,3	0,00	0
3.	2,44	29	13,0	0,00	0
4.	2,46	30	13,5	0,00	0
5.	2,69	34	14,6	0,00	0



6.	2,81	36	15,0	0,00	0
7.	3,09	40	16,2	0,00	0
8.	3,16	41	16,4	0,00	0
9.	3,29	44	16,8	0,00	0
10.	3,41	45	17,1	0,00	0
11.	3,44	45	17,1	0,00	0
12.	3,48	45	17,1	0,00	0
13.	3,97	51	19,1	0,00	0
14.	4,00	52	19,5	0,00	0
15.	4,44	59	21,0	0,00	0

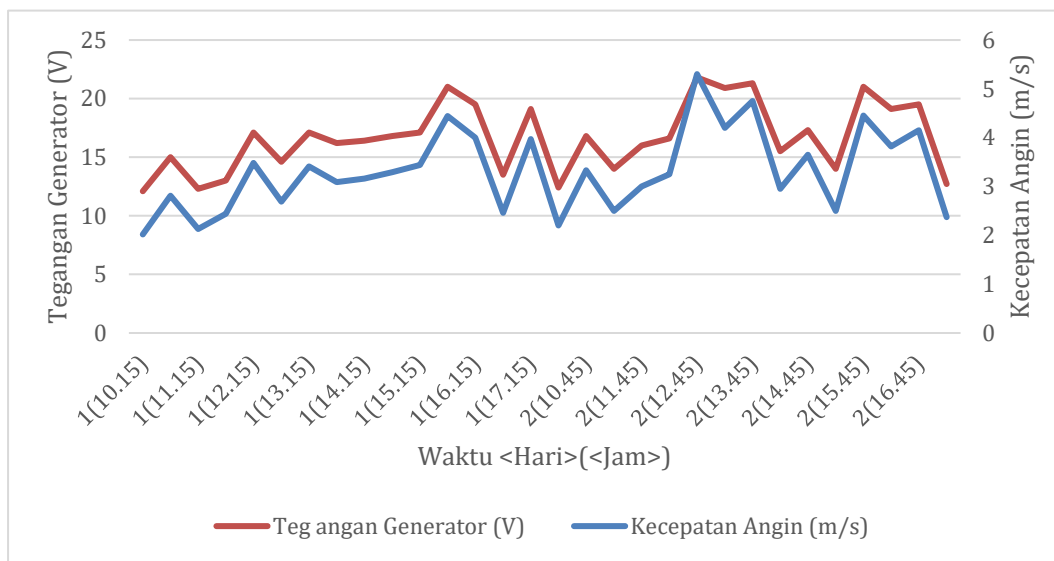
**B**

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Putar Turbin (RPM)	Tegangan Generator (V)	Arus Generator (A)	Daya Generator (W)
1.	2,20	26	12,4	0,00	0
2.	2,37	28	12,7	0,00	0
3.	2,50	32	14,0	0,00	0
4.	2,50	32	14,0	0,00	0
5.	2,95	37	15,5	0,00	0
6.	3,00	39	16,0	0,00	0
7.	3,25	42	16,6	0,00	0
8.	3,33	44	16,8	0,00	0
9.	3,65	47	17,3	0,00	0
10.	3,82	51	19,1	0,00	0
11.	4,15	52	19,5	0,00	0
12.	4,20	57	20,9	0,00	0
13.	4,45	59	21,0	0,00	0
14.	4,75	61	21,3	0,00	0



15.            5,30                    68                    21,8                    0,00                    0

Pengujian turbin angin Savonius tanpa beban dilakukan selama dua hari, hasil pengujian pada hari pertama dengan kecepatan angin berkisar antara 2,02 m/s – 4,44 m/s, yang menghasilkan putaran turbin 24 RPM – 59 RPM dan tegangan 12,1 V – 21,0 V. Hasil pengujian pada hari kedua menunjukkan bahwa kinerja mekanis terlihat lebih baik dengan kecepatan angin 2,20 m/s hingga 5,30 m/s dan putaran turbin mencapai 68 RPM. Tegangan juga meningkat hingga 21,8 V, tetapi seperti hari sebelumnya, arus tetap 0,00 A dan daya masih 0 W, karena saat pengujian tanpa beban kondisi rangkaian generator adalah *open circuit*. Jika dibandingkan, hari kedua memberikan hasil yang lebih tinggi dalam hal kecepatan angin, RPM, dan tegangan output. Karena pada hari kedua kecepatan angin mencapai hingga 5,30 m/s dibanding hari pertama yang hanya sampai 4,44 m/s. Kecepatan angin yang lebih besar memberikan energi kinetik lebih tinggi, sehingga turbin berputar lebih cepat dan menghasilkan tegangan yang lebih besar. Secara langsung, peningkatan kecepatan angin menyebabkan kenaikan putaran turbin (hingga 68 RPM) dan tegangan keluaran (hingga 21,8 V), sehingga menghasilkan performa putaran dan tegangan yang lebih baik dari hari pertama.



**Gambar 5.** Grafik Pengujian PLTB Jenis Savonius Tanpa Beban

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara kecepatan angin dan tegangan keluaran generator pada sistem PLTB jenis Savonius tanpa beban. Secara umum, terlihat bahwa kenaikan kecepatan angin diikuti oleh peningkatan tegangan keluaran, yang menandakan adanya hubungan yang berbanding lurus antara kedua variabel tersebut. Tegangan maksimum yang dihasilkan mencapai sekitar 22 V saat kecepatan angin



mendekati 5,5 m/s. Meskipun terdapat fluktuasi pada beberapa titik waktu, tegangan keluaran cenderung stabil dan berada di atas 12 V sepanjang pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa turbin Savonius mampu menghasilkan energi listrik secara konsisten meskipun tanpa beban, sehingga cocok digunakan pada wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang.

PLTB dengan turbin angin Savonius pada kondisi dengan beban

**Tabel 8.** (A) hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Savonius berbeban hari pertama, dan (B) hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Savonius berbeban hari kedua

A

No	Kec* Angin (m/s)	RPM Turbin	Teg* Gen (V)	Arus Gen (A)	Daya Gen (W)	Teg Bat* (V)	Arus Bat (A)	Daya Bat (W)	Teg Beb* (V)	Arus Beb (A)	Daya Beb (W)
1.	1,85	20	3,1	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
2	2,16	22		0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
3.	2,37	32	6,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
4.	2,41	33	7,2	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
5.	2,80	40	8,2	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
6.	2,88	42	8,6	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
7.	2,92	43	8,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
8.	3,06	44	9,1	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
9.	3,09	45	9,4	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
10.	3,37	51	10,0	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
11.	3,72	53	10,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
12.	3,74	53	10,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
13.	4,11	58	12,5	0,04	0,5	12,5	0,64	8	12,4	0,67	8,3
14.	5,00	67	12,5	0,07	0,87	12,5	0,64	8	12,4	0,67	8,3
15.	5,23	68	12,5	0,07	0,87	12,5	0,64	8	12,4	0,67	8,3

B \*Kec – Kecepatan; Teg – Tegangan; Gen – Generator; Bat – Baterai; BeB – Beban



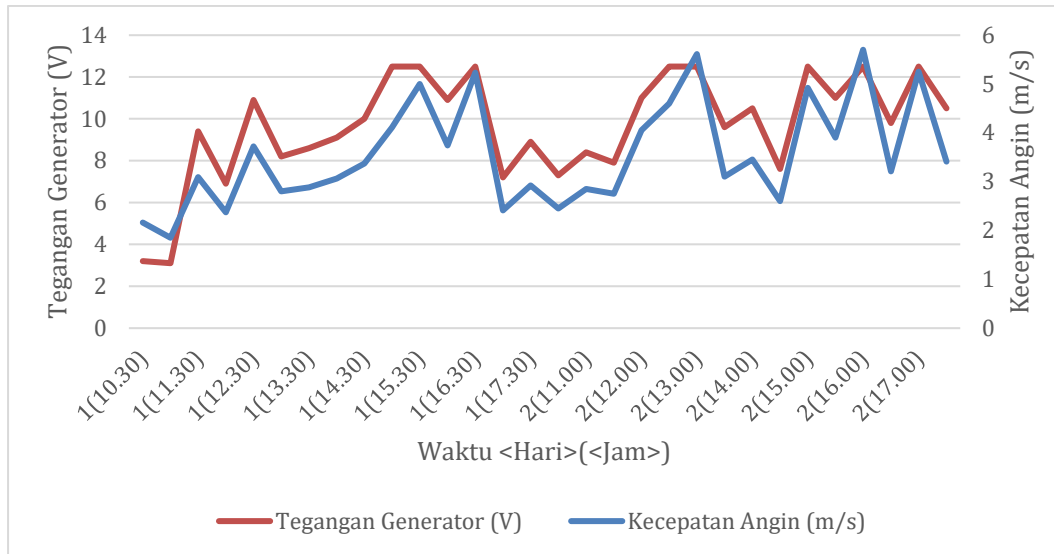
No	Kec* Angin (m/s)	RPM Turbin	Teg* Gen* (V)	Arus Gen (A)	Daya Gen (W)	Teg Bat* (V)	Arus Bat (A)	Daya Bat (W)	Teg Beb* (V)	Arus Beb (A)	Daya Beb (W)
1.	2,45	34	7,3	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
2	2,60	36	7,4	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
3.	2,75	38	7,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
4.	2,85	41	8,4	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
5.	3,10	46	9,6	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
6.	3,21	50	9,8	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
7.	3,41	52	10,5	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
8.	3,45	52	10,5	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
9.	3,90	54	11,0	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
10.	4,05	54	11,0	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
11.	4,60	60	12,5	0,04	0,5	12,5	0,61	7,6	12,4	0,67	8,3
12.	4,92	65	12,5	0,08	1	12,6	0,66	8,3	12,5	0,68	8,5
13.	5,25	68	12,5	0,14	1,7	12,6	0,58	7,3	12,5	0,68	8,5
14.	5,61	71	12,5	0,21	2,6	12,5	0,48	6	12,4	0,67	8,3
15.	5,70	72	12,5	0,22	2,75	12,5	0,47	5,9	12,4	0,67	8,3

\*Kec – Kecepatan; Teg – Tegangan; Gen – Generator; Bat – Baterai; Beb – Beban

Hari pertama pengujian yang menunjukkan bahwa kecepatan angin berkisar antara 1,85 m/s – 5,23 m/s dengan putaran turbin mencapai 68 RPM. Tegangan generator meningkat dari 3,1 V – 12,5 V, namun arus baru muncul saat kecepatan angin mencapai 4,11 m/s. Meskipun demikian, daya pada beban tetap stabil di angka 8,3 W. Hari kedua menunjukkan bahwa kecepatan angin lebih tinggi, yaitu 2,45 m/s – 5,70 m/s, dengan putaran turbin naik hingga 71 RPM. Arus dari generator mulai terdeteksi saat kecepatan angin 4,60 m/s dan nilainya pun lebih besar, hingga mencapai 0,22 A pada kecepatan angin 5,70 m/s. Ketika generator memasok daya, maka daya pada baterai berkurang karena *supply* untuk beban terbagi menjadi 2 bagian yaitu dari baterai dan generator. Selain itu, tegangan pada baterai sempat naik dalam beberapa waktu tertentu karena sistem dari SCC sempat melakukan pengisian ke baterai pada saat tegangan generator



mencapai 8,0 V. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa kinerja yang lebih baik adalah pada hari kedua, karena mulai menghasilkan arus yang nilainya lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa konversi energi kinetik menjadi listrik lebih optimal saat kecepatan angin meningkat.



**Gambar 6.** Grafik pengujian PLTB jenis Savonius berbeban

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara kecepatan angin dan tegangan keluaran generator pada PLTB Savonius dalam kondisi berbeban. Terlihat bahwa grafik tegangan cenderung mengikuti pola kenaikan dan penurunan kecepatan angin. Tegangan tertinggi yang dihasilkan mencapai sekitar 12,5 V saat kecepatan angin mendekati 5,5 m/s. Meskipun nilai tegangan sedikit lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa beban, hasil ini tetap menunjukkan performa konversi energi yang cukup baik. Hal ini menandakan bahwa turbin Savonius masih mampu bekerja secara baik dalam kondisi berbeban, terutama pada saat kecepatan angin meningkat.

PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H pada kondisi tanpa beban

**Tabel 9.** (A) hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H tanpa beban hari pertama, dan (B) hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H tanpa beban hari kedua

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Putar Turbin (RPM)	Tegangan Generator (V)	Arus Generator (A)	Daya Generator (W)
1.	2,32	24	9,5	0,00	0
2	2,88	26	9,6	0,00	0



3.	2,95	29	9,8	0,00	0
4.	3,02	30	10,1	0,00	0
5.	3,02	30	10,1	0,00	0
6.	3,44	31	10,2	0,00	0
7.	3,45	31	10,2	0,00	0
8.	3,74	34	10,4	0,00	0
9.	4,13	36	10,7	0,00	0
10.	4,16	37	14,5	0,00	0
11.	4,18	37	14,5	0,00	0
12.	4,27	38	14,9	0,00	0
13.	4,36	41	15,6	0,00	0
14.	4,60	42	15,9	0,00	0
15.	4,95	45	16,3	0,00	0

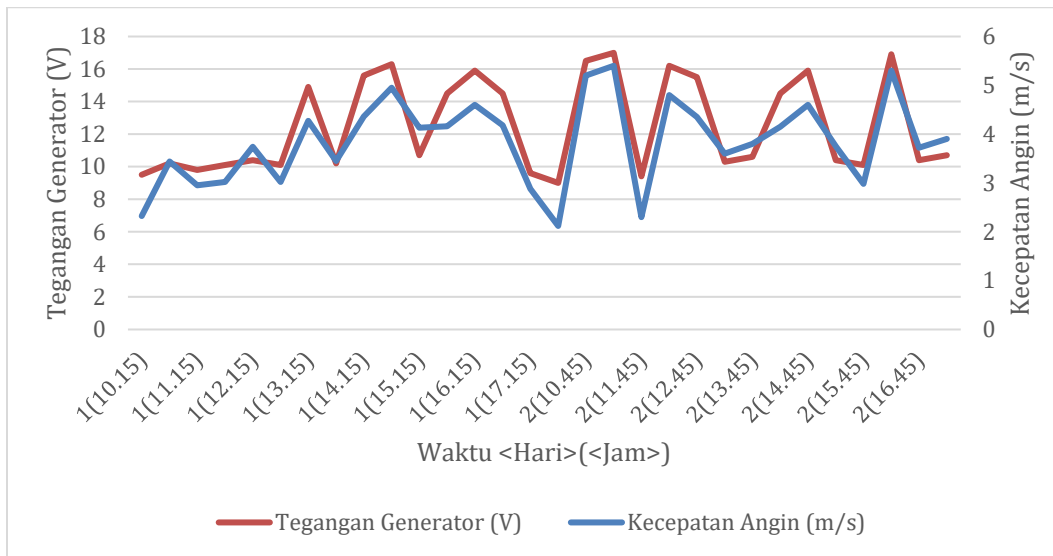
**B**

No.	Kecepatan Angin (M/S)	Kecepatan Putar Turbin (RPM)	Tegangan Generator (V)	Arus Generator (A)	Daya Generator (W)
1.	2,12	23	9,0	0,00	0
2.	2,30	24	9,4	0,00	0
3.	2,98	30	10,1	0,00	0
4.	3,60	32	10,3	0,00	0
5.	3,72	33	10,4	0,00	0
6.	3,75	34	10,4	0,00	0
7.	3,80	35	10,6	0,00	0
8.	3,90	36	10,7	0,00	0
9.	4,15	37	14,5	0,00	0
10.	4,35	39	15,5	0,00	0
11.	4,60	42	15,9	0,00	0
12.	4,80	44	16,2	0,00	0



13.	5,20	46	16,5	0,00	0
14.	5,30	48	16,9	0,00	0
15.	5,40	49	17,0	0,00	0

Pengujian PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H tanpa beban pada hari pertama menunjukkan bahwa kecepatan angin tercatat 2,32 m/s – 4,95 m/s, menghasilkan putaran turbin 24 RPM – 45 RPM. Tegangan naik perlahan dari 9,5 V pada angin terendah hingga 10,7 V di 4,13 m/s, lalu melonjak ke kisaran 14,5 – 16,3 V. Hari kedua menunjukkan bahwa kecepatan angin sedikit lebih bervariasi, 2,12 m/s – 5,40 m/s, dengan putaran turbin 23 RPM – 49 RPM. Tegangan awalnya 9,0 V dan bertambah hingga 10,7 V di sekitar 3,9 m/s, kemudian melonjak ke 14,5 V – 17,0 V. Hari kedua mencatat kecepatan angin, RPM, dan tegangan maksimum sedikit lebih tinggi (5,40 m/s, 49 RPM, 17,0 V) dibanding hari pertama (4,95 m/s, 45 RPM, 16,3 V), menunjukkan kinerja mekanis yang lebih baik. Hal ini menunjukkan bahwa turbin Darrieus tipe-H merespons secara positif terhadap peningkatan kecepatan angin, dengan menghasilkan tegangan lebih besar dan putaran lebih cepat.



**Gambar 7.** Grafik Pengujian PLTB Jenis Darrieus Tipe-H Tanpa Beban

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara kecepatan angin dan tegangan keluaran generator pada PLTB Darrieus tipe-H tanpa beban. Grafik menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin diikuti oleh kenaikan tegangan secara cukup seimbang. Tegangan tertinggi yang tercatat mencapai sekitar 17 V saat kecepatan angin mendekati 5,5 m/s. Fluktuasi tegangan dan kecepatan tampak cukup tajam, namun tetap membentuk pola yang selaras. Hal ini mengindikasikan bahwa turbin Darrieus tipe-H mampu



mengubah energi angin menjadi listrik dengan baik saat tanpa beban, terutama pada kondisi angin sedang hingga tinggi.

PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H pada kondisi dengan beban

**Tabel 10.** (A) hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H berbeban hari pertama, dan (B) hasil pengujian PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H berbeban hari kedua

A

No	Kec* Angin (m/s)	RPM Turbin	Teg* Gen (V)	Arus Gen (A)	Daya Gen (W)	Teg Bat* (V)	Arus Bat (A)	Daya Bat (W)	Teg Beb* (V)	Arus Beb (A)	Daya Beb (W)
1.	2,16	15	3,0	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
2	2,20	15	3,0	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
3.	3,06	21	3,6	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
4.	3,09	21	3,6	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
5.	3,18	23	3,8	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
6.	3,26	24	3,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
7.	3,38	25	4,0	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
8.	3,72	31	4,1	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
9.	4,11	35	4,2	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
10.	4,13	35	4,2	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
11.	4,44	38	4,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
12.	4,53	41	6,4	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5
13.	4,81	42	6,9	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
14.	5,31	48	7,8	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
15.	5,43	50	7,9	0,00	0	12,6	0,69	8,7	12,5	0,68	8,5

B

\*Kec – Kecepatan; Teg – Tegangan; Gen – Generator; Bat – Baterai; Beban – Beban

No	Kec* Angin (m/s)	RPM Turbin	Teg* Gen	Arus Gen (A)	Daya Gen (W)	Teg Bat* (V)	Arus Bat (A)	Daya Bat (W)	Teg Beb* (V)	Arus Beb (A)	Daya Beb (W)
----	------------------------	---------------	-------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------



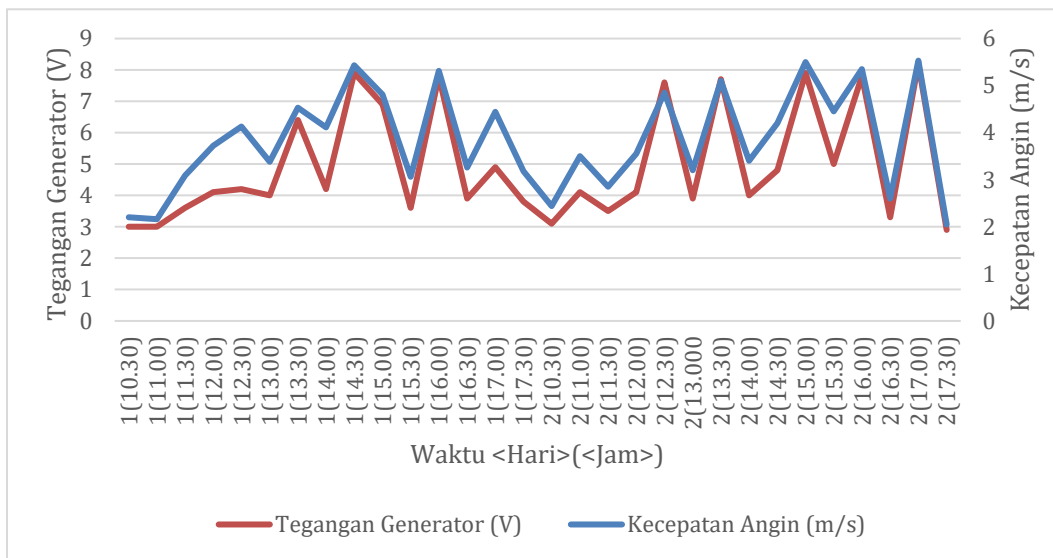
*											
(V)											
1.	2,05	10	2,9	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
2.	2,44	17	3,1	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
3.	2,60	18	3,3	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
4.	2,85	20	3,5	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
5.	3,20	24	3,9	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
6.	3,40	26	4,0	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
7.	3,50	29	4,0	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
8.	3,55	30	4,1	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
9.	4,20	36	4,8	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
10.	4,45	40	5,0	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
11.	4,85	43	7,6	0,00	0	12,5	0,68	8,5	12,4	0,67	8,3
12.	5,10	46	7,7	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
13.	5,35	48	7,8	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
14.	5,50	50	7,9	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8
15.	5,53	54	8,2	0,00	0	12,4	0,65	8	12,3	0,64	7,8

\*Kec – Kecepatan; Teg – Tegangan; Gen – Generator; Bat – Baterai; Beb – Beban

Hari pertama pengujian PLTB dengan turbin angin Darrieus tipe-H berbeban yang menunjukkan bahwa kecepatan angin tercatat antara 2,16 hingga 5,43 m/s, dengan kecepatan putar turbin meningkat dari 15 hingga 50 RPM. Tegangan keluaran generator naik secara perlahan dari 3,0 V hingga 7,9 V, namun arus tetap 0,00 A dan daya 0 W di seluruh rentang data, menandakan belum ada energi listrik yang benar-benar mengalir dari generator. Meski begitu, baterai menunjukkan tegangan stabil di 12,5 V – 12,6 V dan arus 0,68 A – 0,69 A, serta beban mencatat daya tetap sebesar 8,3 W – 8,5 W, menandakan bahwa sistem tetap memasok energi ke beban, kemungkinan dari penyimpanan sebelumnya. Hari kedua mencatat kecepatan angin dari 2,05 m/s hingga 5,53 m/s, dan kecepatan putar turbin antara 10 RPM – 54 RPM. Tegangan generator meningkat dari 2,9 V hingga 8,2 V, tetapi serupa dengan hari pertama, arus dan daya dari generator masih 0, yang artinya belum terjadi aliran listrik dari turbin ke sistem. Namun, baterai dan beban tetap aktif seperti hari pertama, dengan tegangan dan arus yang konsisten, menunjukkan



*supply* daya tetap berjalan meskipun bukan berasal langsung dari turbin angin. Kedua hari pengujian menunjukkan bahwa beban tetap menyala dan stabil, namun generator belum memberikan kontribusi nyata karena arus masih nol walaupun tegangan perlahan meningkat. Hari kedua memiliki kecepatan angin dan RPM yang lebih tinggi (hingga 5,53 m/s dan 54 RPM), dan tegangan generator juga sedikit lebih tinggi (hingga 8,2 V), menandakan kinerja mekanis lebih baik. Meskipun demikian, tegangan keluaran belum cukup tinggi untuk melampaui tegangan baterai, sehingga belum ada aliran arus dari generator ke baterai, dan *supply* daya berasal dari penyimpanan daya sebelumnya.



**Gambar 8.** Grafik Pengujian PLTB Jenis Darrieus Tipe-H Berbeban

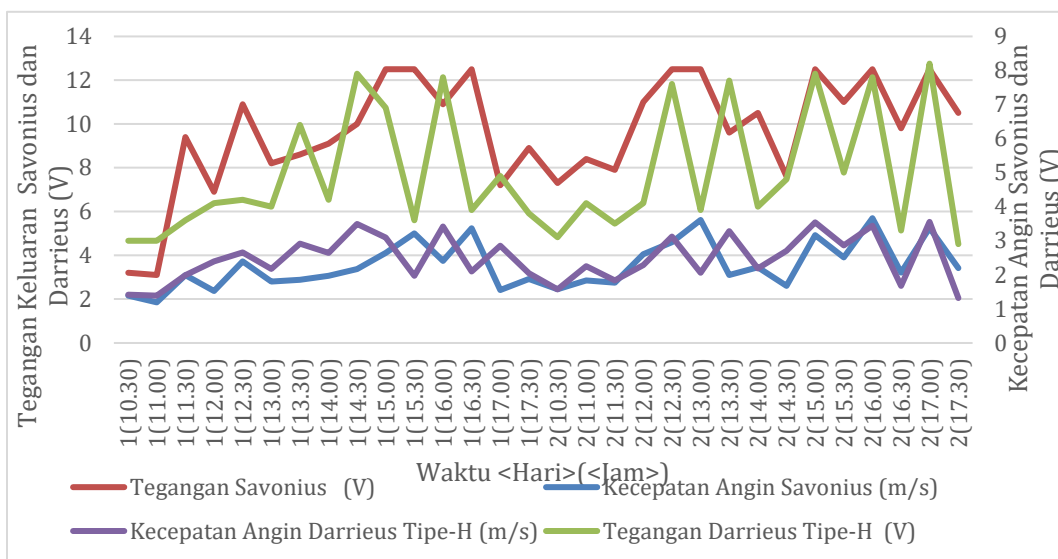
Gambar 8 memperlihatkan hubungan antara kecepatan angin dan tegangan keluaran generator pada sistem PLTB Darrieus tipe-H dalam kondisi berbeban. Terlihat bahwa tegangan keluaran berada di kisaran 3 hingga 8 V, dan umumnya mengikuti pola perubahan kecepatan angin. Tegangan maksimum yang dicapai adalah sekitar 8 V saat kecepatan angin mencapai 5,32 m/s, namun nilai ini lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa beban. Fluktuasi tegangan yang cukup sering terjadi menunjukkan bahwa beban memengaruhi kestabilan output generator. Meskipun demikian, pola yang selaras antara tegangan dan kecepatan angin tetap menunjukkan bahwa turbin Darrieus tetap mampu merespons perubahan angin secara efektif, meskipun performanya menurun dalam kondisi berbeban.

### Perbandingan Kedua Sistem PLTB

Berdasarkan hasil pengujian tanpa beban, turbin angin Savonius menunjukkan performa yang lebih responsif pada kecepatan angin rendah jika dibandingkan turbin



Darrieus tipe-H. Savonius mampu mulai berputar pada kecepatan angin di bawah 2,0 m/s dan menghasilkan tegangan hingga 21,8 V saat mencapai 68 RPM, sedangkan Darrieus baru efektif berputar di atas 2,8 m/s dan menghasilkan tegangan maksimum sebesar 17,0 V pada 49 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa dari sisi kemampuan *self-starting* dan kinerja mekanis pada angin rendah, Savonius unggul dibandingkan Darrieus tipe-H. Pada kondisi berbeban, kedua sistem tetap menunjukkan bahwa beban dapat menyala secara stabil, namun hanya turbin Savonius yang mampu mulai menghasilkan arus dari generator pada kecepatan angin sekitar 4,11 m/s. Di sisi lain, pada turbin Darrieus tipe-H, meskipun tegangan generator meningkat secara bertahap, arus tetap nol karena tegangan belum cukup untuk melampaui tegangan baterai dan mengalirkan arus ke sistem. Hal ini menunjukkan bahwa dalam kondisi angin di lokasi penelitian, sistem Savonius memiliki kemampuan konversi energi listrik yang lebih baik dalam mengisi baterai dan menyuplai beban.



**Gambar 9.** Perbandingan Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Savonius dan Darrieus

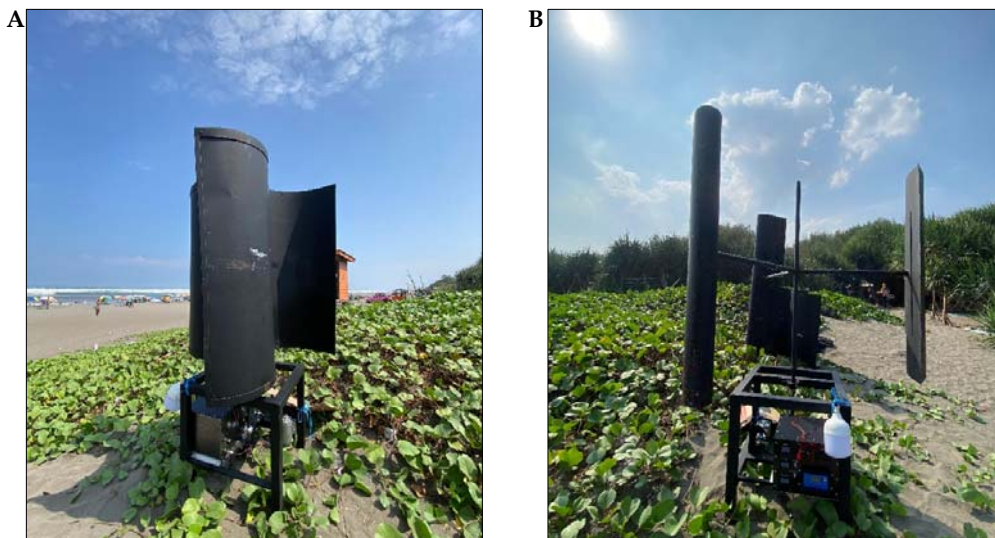
Sistem PLTB dengan turbin angin Savonius lebih cocok digunakan pada lokasi dengan kecepatan angin rendah, seperti di Pantai Parangtritis, karena desainnya yang mampu menangkap angin dari berbagai arah. Sementara turbin Darrieus tipe-H memiliki potensi kinerja yang baik di kecepatan angin sedang hingga tinggi, namun kurang optimal dalam kondisi rendah tanpa bantuan eksternal. Selain itu, tegangan keluaran dari turbin Savonius secara konsisten lebih tinggi dibandingkan Darrieus pada hampir seluruh waktu pengambilan data. Tegangan maksimum yang dicapai turbin Savonius mendekati 13 V, sedangkan Darrieus hanya sekitar 7 V, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Hal ini juga didukung oleh data kecepatan angin, di mana kecepatan angin



yang diterima oleh turbin Savonius berkisar antara 2 hingga 4 m/s, namun tetap mampu menghasilkan tegangan tinggi, sementara Darrieus membutuhkan kecepatan angin lebih dari 5 m/s untuk menghasilkan tegangan yang setara, menunjukkan bahwa Savonius lebih responsif terhadap angin rendah dan berfluktuasi.

## PEMBAHASAN

Pengujian sistem yang telah dilaksanakan bertujuan untuk mengetahui serta membandingkan kinerja dari kedua turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dengan jenis Darrieus tipe-H. Selain sebagai sarana perbandingan hasil kinerjanya, pengujian sistem juga berfungsi untuk mengidentifikasi berbagai permasalahan teknis yang mungkin terjadi selama sistem beroperasi. Hasil tersebut dapat menjadi acuan dalam proses evaluasi dan perbaikan sistem kedepannya, baik dari segi desain, konstruksi, sistem kelistrikan, dan mekanis lainnya, guna meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan.



**Gambar 10.** (A) hasil akhir sistem PLTB Savonius, dan  
(B) hasil akhir sistem PLTB Darrieus tipe-H

Perancangan sistem PLTB dengan turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dan jenis Darrieus tipe-H terdapat beberapa komponen seperti, penampang, ass penyangga, rangka penopang, dan kotak di dalam rangka yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan atau penempatan generator dan komponen elektronik lainnya. Pengujian dilaksanakan di Pantai Parangtritis, Bantul, Yogyakarta yang mempunyai kondisi kecepatan angin rendah karena hanya berkisar  $\pm 1$  m/s hingga  $\pm 4,8$  m/s sehingga cocok untuk pengujian turbin jenis Savonius dan Darrieus tipe-H. Secara struktural, penampang turbin ini terbuat dari galvalum berukuran 0,3mm, ass penyangga berbahan besi, dan



rangka penopang menggunakan besi hollow kotak. Fungsi utama sistem ini adalah mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik, kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator melalui sistem pulley dan *timing belt*. Keluaran energi listrik tersebut kemudian dikontrol menggunakan SCC sebelum disimpan dalam baterai atau digunakan langsung untuk beban DC. Penelitian ini menguji antara turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dengan jenis Darrieus tipe-H, baik tanpa beban maupun dengan beban yang berfungsi untuk membandingkan RPM, tegangan, arus, dan daya keluaran. Dari hasil perbandingan tersebut, maka peneliti dapat mengetahui turbin mana yang kinerjanya lebih baik dalam kondisi angin rendah seperti di Pantai Parangtritis.

## KESIMPULAN

Penelitian mengenai perancangan dan pengujian Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius dan Darrieus tipe-H menunjukkan bahwa kedua jenis turbin memiliki karakteristik kinerja yang berbeda. Turbin angin sumbu vertikal jenis Savonius menunjukkan kinerja yang lebih unggul pada kecepatan angin rendah. Turbin Savonius mampu mulai berputar lebih awal, menghasilkan tegangan yang lebih tinggi, dan mulai menghasilkan arus pada kecepatan angin sekitar 4,11 m/s. Sebaliknya, ketika pengujian turbin Darrieus tipe-H belum mampu menghasilkan arus karena tegangan keluarannya belum cukup untuk memasok baterai, meskipun putaran dan tegangannya meningkat. Hasil ini menunjukkan bahwa dari segi kinerja, kemampuan *self-starting*, dan konversi energi kinetik angin menjadi energi listrik pada kondisi angin rendah, turbin Savonius lebih cocok untuk diterapkan seperti di wilayah Pantai Parangtritis yang memiliki kecepatan angin cenderung rendah dan arah angin tidak menentu. Selain itu, sistem PLTB dengan turbin Savonius mampu mempertahankan pasokan daya secara stabil untuk beban listrik skala kecil.

Berdasarkan hasil penelitian ini, sebaiknya dilakukan pengembangan sistem lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja sistem PLTB, terutama pada kecepatan angin rendah. Pengembangan tersebut meliputi modifikasi jumlah dan bentuk sudu agar dapat menangkap angin lebih efektif, pemilihan jenis generator yang lebih tepat agar arus dapat mengalir meskipun pada putaran rendah. Meskipun tercatat daya yang dihasilkan oleh generator tergolong rendah, namun selama pengujian baterai tidak menunjukkan penurunan tegangan yang signifikan. Hal ini menimbulkan dugaan bahwa sebenarnya generator menghasilkan daya yang lebih tinggi pada rentang waktu saat tidak dilakukan pencatatan. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan sistem melalui penambahan sistem monitoring yang terintegrasi agar pencatatan data dapat dilakukan secara lebih akurat dan menyeluruh. Penerapan desain *hybrid* Savonius–Darrieus juga dapat menjadi solusi



untuk mengatasi kelemahan *self-starting* pada Darrieus tipe-H, sehingga sistem tetap dapat beroperasi meskipun kondisi kecepatan angin rendah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Rancang Bangun dan Komparasi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan Menggunakan Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Savonius dan Jenis Darrieus Tipe-H.” Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Bapak Rizki Nurilyas Ahmad, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing skripsi; Bapak Heru Supriyono, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing akademik; kedua orang tua tercinta, Bapak Sukisno dan Ibu Dwi Marganingsih; saudari Ardiyanti Resita Ayuningtyas selaku kakak penulis; saudara Dzaky Novika Ramadhan selaku teman dekat penulis, serta Laboratorium Teknik Elektro, yang telah mendukung dan memberikan fasilitas dalam penyelesaian penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. M. Putra, K. Kananda, and A. Muhtar, “Sistem Pembangkitan PLTB Vertical Axis Wind Turbine Tipe Savonius 3 Sudu,” *J. Sci. Appl. Technol.*, vol. xx, no. xx, pp. 2–7, 2019, doi: 10.35472/x0xx0000.
- [2] F. Al Muhajir and N. Sinaga, “Tinjauan Pemanfaatan Energi Bayu Sebagai Pembangkit Listrik di Provinsi Sulawesi Selatan,” *J. Tek.*, vol. 15, no. 1, pp. 55–61, 2021.
- [3] M. K. Johari, M. A. A. Jalil, and M. F. M. Shariff, “Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT),” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 74–80, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.13.21333.
- [4] M. Ismail Yusuf, A. Hiendro, and P. Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro, “Rancang Bangun Prototype Turbin Angi Tipe Darrieus Dengan Kecepatan Angin Di Desa Temajuk Kecamatan Paloh Kabupaten Sambas,” 2021.
- [5] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, “An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades,” *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 297–304, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.259.
- [6] M. Abdy and W. Sanusi, “Karakteristik Kategori Kecepatan Angin di Kota Majene dengan Pendekatan Rantai Markov,” *Saintifik*, vol. 6, no. 1, pp. 85–90, 2020, doi: 10.31605/saintifik.v6i1.305.
- [7] A. Allen, U. States, and C. Guard, “Review of Leeway :,” no. October, 2014.
- [8] R. Samosir, M. Pane, and J. H. Lumbantoruan, “Perancangan Turbin Angin Vertikal



Modifikasi Gabungan Savonius dan Darrieus Menggunakan Geometri Naca 0018," *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 69–77, 2021, doi: 10.31289/jmemme.v5i1.4108.

- [9] M. Nasution, M. R. Yanhar, and R. T. Putra, "Pengujian Turbin Angin Darrieus Di Pantai Matematik Deli Serdang Dengan Variasi Jumlah Blade," *Bul. Utama Tek.*, vol. 18, no. 3, pp. 307–313, 2023, doi: 10.30743/but.v18i3.7643.
- [10] M. Casini, "Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56–65, 2015, doi: 10.7763/jocet.2016.v4.254.

