

OPTIMASI KINERJA GENERATOR TURBIN ANGIN VERTIKAL SAVONIUS YANG DIMODIFIKASI

Junaidi ¹, Aswir Premadi ²

Fakultas Teknik

Institut Teknologi Padang

junaidinedi82@gmail.com

Abstract (English)

The development of renewable energy, particularly wind energy, is a key solution to the global energy crisis caused by the decline of fossil fuel reserves. Wind energy offers a clean and environmentally friendly alternative, without causing pollution during its production process. The potential for wind energy in Indonesia is huge, with average wind speeds between 1 to 2,5 m/s, making it ideal for the development of wind power plants. Along with the increasing demand for electrical energy in Indonesia, which continues to grow in line with economic and population growth, the utilisation of wind energy as a renewable energy source is becoming increasingly relevant. Analysis of the calculation results shows a clear relationship between wind speed and the power output generated by the wind energy generation system. The table presented illustrates that the power output increases significantly as the wind speed increases. At a wind speed of about 0,9 m/s, the power output generated is 0,59 W, and increases gradually with increasing wind speed. The peak power output is recorded at a wind speed of 2,5 m/s with a value of 14,11 W. This phenomenon indicates that the wind power generation system has an efficiency that increases exponentially at higher wind speeds. This non-linear increase in power reflects the potential of the system to make the most of optimal wind conditions, and underscores the importance of proper design and operation to improve efficiency and power output. Understanding these characteristics is important for more effective planning and implementation of wind energy generation systems in Indonesia.

Abstrak (Indonesia)

Pengembangan energi terbarukan, khususnya energi angin, menjadi solusi utama dalam menghadapi krisis energi global yang diakibatkan oleh penurunan cadangan bahan bakar fosil. Energi angin menawarkan alternatif yang bersih dan ramah lingkungan, tanpa menimbulkan polusi selama proses produksinya. Potensi energi angin di Indonesia sangat besar, dengan kecepatan angin rata-rata antara 1 hingga 2,5 m/s, menjadikannya ideal untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik di Indonesia, yang terus berkembang sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan jumlah penduduk, pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi terbarukan menjadi semakin relevan. Analisis hasil perhitungan menunjukkan hubungan yang jelas antara kecepatan angin dan output daya yang dihasilkan oleh sistem pembangkit energi angin. Tabel yang disajikan menggambarkan bahwa output daya meningkat secara signifikan seiring dengan kenaikan kecepatan angin. Pada kecepatan angin sekitar 0,9 m/s, output daya yang dihasilkan adalah 0,59 W, dan meningkat secara bertahap dengan bertambahnya kecepatan angin. Puncak output daya tercatat pada kecepatan angin 2,5 m/s dengan nilai 14,11 W. Fenomena ini menunjukkan bahwa sistem pembangkit daya angin memiliki efisiensi yang meningkat secara eksponensial pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Peningkatan daya yang tidak linier ini mencerminkan potensi sistem untuk memanfaatkan kondisi angin yang optimal secara maksimal, dan menggarisbawahi pentingnya desain dan pengoperasian yang tepat untuk meningkatkan efisiensi dan output daya. Pemahaman karakteristik ini penting untuk perencanaan dan implementasi sistem pembangkit energi angin yang lebih efektif di Indonesia.

Article History

Submitted: 5 Desember 2024

Accepted: 8 Desember 2024

Published: 15 Desember 2024

Key Words

Renewable Energy, Wind Energy, Wind Speed, Wind Power Plant

Sejarah Artikel

Submitted: 5 Desember 2024

Accepted: 8 Desember 2024

Published: 15 Desember 2024

Kata Kunci

Energi Terbarukan, Energi Angin, Kecepatan Angin, Pembangkit Listrik tenaga Angin.

Pendahuluan

Pengembangan energi terbarukan menjadi salah satu solusi utama dalam menghadapi krisis energi yang mengancam ketersediaan bahan bakar fosil. Seiring dengan semakin menipisnya cadangan bahan bakar minyak, pemanfaatan energi terbarukan, seperti energi angin, menjadi sangat penting. Energi angin merupakan sumber energi yang bersih, ramah lingkungan, dan tidak menimbulkan polusi selama proses produksinya (Nakhoda dan Saleh, 2016). Potensi energi angin di Indonesia sangat besar, terutama dengan kecepatan angin rata-rata antara 3,5 hingga 7 m/s, yang ideal untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin (Hemdi, Baejah et al.).

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat sejalan dengan perkembangan ekonomi dan bertambahnya jumlah penduduk. Peningkatan ini menambah tekanan terhadap sumber daya energi fosil yang masih menjadi sumber utama energi di Indonesia. Penggunaan bahan bakar fosil secara terus-menerus tidak hanya menyebabkan ketergantungan yang berlebihan tetapi juga menimbulkan masalah lingkungan yang serius. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif, seperti pembangkit listrik tenaga angin, menjadi sangat relevan. Indonesia, dengan garis pantainya yang panjang, memiliki potensi besar untuk memanfaatkan energi angin sebagai sumber energi terbarukan yang bisa dikembangkan lebih lanjut (Hartanto and Sartini 2019).

Sejak lama, berbagai macam desain turbin angin telah ditemukan dan dikembangkan, baik dalam bentuk turbin horizontal maupun vertikal. Turbin angin vertikal tipe Savonius merupakan salah satu jenis turbin yang memiliki kelebihan dalam operasi pada kecepatan angin rendah, mampu menangkap angin dari berbagai arah, dan memiliki konstruksi yang sederhana. Bentuk sudu pada turbin Savonius dirancang sedemikian rupa sehingga mampu menghasilkan gaya dorong yang optimal untuk memutar generator. Meskipun energi yang dihasilkan oleh turbin angin masih kalah jika dibandingkan dengan sumber energi lainnya seperti batu bara atau nuklir, pembangkit listrik tenaga angin dengan kecepatan rendah menjadi solusi yang murah dan berisiko rendah untuk diimplementasikan di Indonesia (Susanto, Mulyadi et al. 2019).

Diharapkan, dengan diberdayakannya pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia, dapat menjadi salah satu solusi untuk menghadapi masa krisis energi yang semakin dekat. Pengembangan teknologi ini juga mendukung tujuan pemerintah dalam diversifikasi energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil (Sudirman dkk., 2020).

Berdasarkan penelitian yang telah ada, penulis berupaya untuk melakukan optimasi kinerja generator dalam menghasilkan output listrik yang maksimal. Dengan mengacu pada permasalahan dan studi pustaka yang telah dilakukan, dirancang sebuah pembangkit listrik tenaga angin menggunakan turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius dengan generator magnet permanen. Kebanyakan penelitian yang ada hanya menyoroti pengaruh kecepatan angin terhadap daya keluaran turbin. Padahal, dalam konteks pembangkitan listrik tenaga angin, generator merupakan komponen yang sangat penting. Saat ini, telah banyak tipe generator yang digunakan dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga angin, seperti generator tipe radial fluks dan aksial fluks.

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada "**Optimasi Kinerja Generator Turbin Angin Vertikal Savonius yang Dimodifikasi**". Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai kinerja generator pada turbin angin vertikal Savonius dan menjadi landasan bagi pengembangan penelitian berikutnya.

Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan perbandingan dari data teori yang ada dengan dibandingkan dengan alat yang akan diuji. Dari hasil pengujian itu akan di dapatkan hasil kinerja dari generator yang optimal. Dalam penelitian ini akan dilakukan pada pembangkit Listrik

menghasilkan beberapa data diantaranya kecepatan angin, kecepatan putar, tegangan listrik, dan arus listrik dari turbin angin sumbu vertikal savonius.

Hasil dan Pembahasan

Spesifikasi Turbin Angin Savonius

Berikut spesifikasi dan desain yang digunakan untuk pembuatan turbin angin Savonius yang dimodifikasi dengan generator magnet permanen :

1. Spesifikasi Turbin Angin

Tipe Turbin:

- Jenis Turbin: Savonius (Vertical Axis Wind Turbine - VAWT)
- Bahan: PVC untuk sudu dan tiang
- Tinggi Turbin: 100 cm
- Diameter Rotor: 85 cm
- Jumlah Sudu: 2 (untuk turbin Savonius klasik)
- Kecepatan Angin Minimum: 0,5 m/s
- Kecepatan Angin Maksimum: 3 m/s
- Kecepatan Putar: 60 - 120 RPM (bergantung pada kecepatan angin)
- Daya Output Maksimum: 500 watt (pada kecepatan angin optimal)



Gambar 3.1 generator turbin



Gambar 3.2 turbin angin savonius

2. Spesifikasi Generator

Tipe Generator:

- Jenis Generator: Generator Magnet Permanen (PMG)
- Kapasitas Daya: 500 watt
- Tegangan Output: 12-24 V DC (bisa dihubungkan ke pengatur daya atau inverter)
- Arus Output: 20-30 A (pada beban puncak)
- Kecepatan Putar Minimum: 60 RPM untuk menghasilkan daya
- Efisiensi: 85-90%
- Bahan Rotor: Baja dengan magnet neodymium N52 (untuk daya tinggi)
- Bahan Stator: Kumparan tembaga

Sistem Listrik:

- a. Pengatur Daya: Regulator atau MPPT (Maximum Power Point Tracker)

3. Desain Sudu (Bilah Turbin)

Desain Turbin Savonius

- a. Bentuk Sudu: Semi-silindris, dibagi menjadi dua bagian yang dipasang secara asimetris pada rotor vertikal
- b. Material Sudu: Aluminium atau baja ringan (tahan korosi dan ringan)
- c. Tebal Sudu: 2 mm (agar ringan namun kuat)
- d. Diameter Sudu: 85 cm
- e. Tinggi Sudu: 100 cm
- f. Sudut Pemasangan: 90 derajat antara dua sudu untuk memaksimalkan tangkapan angin

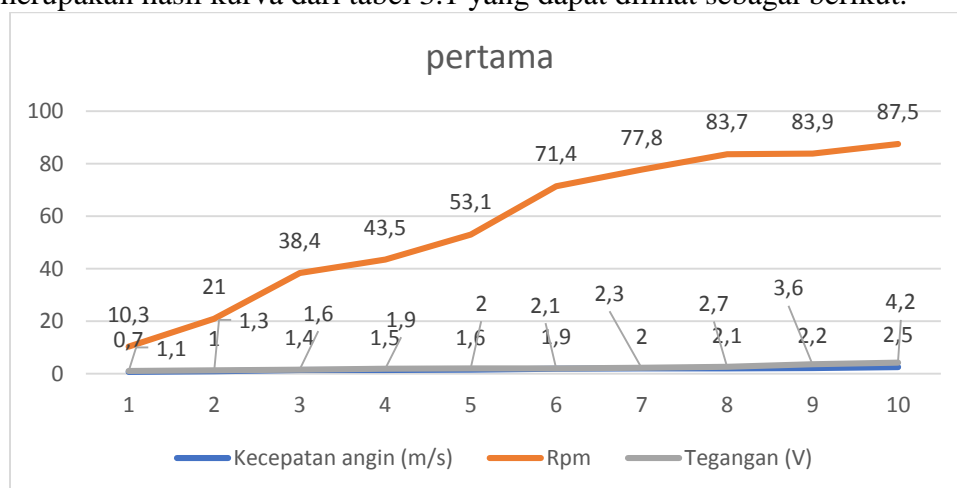
Pengujian Turbin angin Savonius

Pengujian Turbin angin Savonius bertujuan untuk Mengukur sejauh mana turbin mampu mengubah energi angin menjadi energi mekanis (rotasi) dan akhirnya energi listrik dengan efisien. Lalu dengan mengevaluasi bagaimana variasi desain, seperti ukuran, bentuk, jumlah bilah, dan rasio aspek, memengaruhi kinerja turbin. Tabel dibawah ini merupakan hasil pengujian Rpm dan kecepatan angin pada turbin savonius.

Tabel 3.1 Pengujian pertama turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,7	10,3	1,1
2	1	21,0	1,3
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,2	83,9	3,6
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.1 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.3 Kurva Pengujian turbin savonius pertama

Berdasarkan data dalam tabel, terdapat hubungan antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,7 m/s,

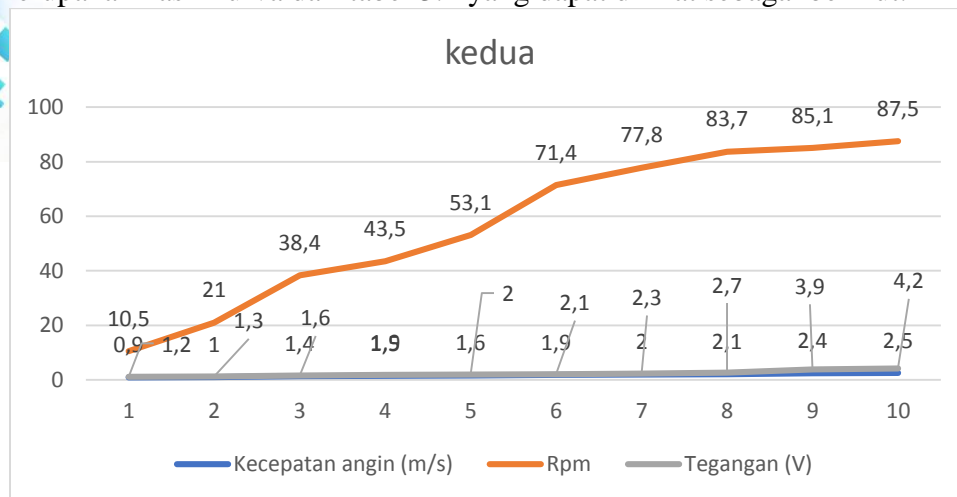
RPM yang dihasilkan adalah 10,3 dengan tegangan sebesar 1,1 V. Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 1 m/s, RPM naik signifikan menjadi 21,0 dengan tegangan sebesar 1,3 V. Peningkatan ini terus berlanjut seiring bertambahnya kecepatan angin, di mana pada kecepatan 2,5 m/s, RPM mencapai 87,5 dan tegangan yang dihasilkan mencapai 4,2 V. Hal ini menunjukkan bahwa ada korelasi positif antara kecepatan angin dengan RPM dan tegangan yang dihasilkan. Secara umum, peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan RPM dan tegangan, yang menandakan peningkatan efisiensi dan kinerja turbin angin pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada titik tertentu, peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan yang lebih signifikan dalam tegangan, yang terlihat jelas pada kecepatan 2,2 m/s hingga 2,5 m/s, di mana tegangan meningkat dari 3,6 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM tidak sebesar sebelumnya. Analisis ini mengindikasikan bahwa turbin angin memiliki kinerja yang optimal pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM.

Analisis ini juga memberikan wawasan penting mengenai performa turbin Savonius, yang diketahui lebih efektif pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, pada batas tertentu, efisiensi turbin ini dapat dimaksimalkan, dan daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putarannya. Dengan kata lain, ada titik di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM, yang dapat disebabkan oleh desain turbin yang mampu menangkap dan mengonversi energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin tertentu. Kesimpulannya, pengujian ini menegaskan pentingnya memilih kecepatan angin optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja turbin angin, serta menunjukkan bahwa turbin Savonius memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan di wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang, tanpa mengorbankan efisiensi energi yang dihasilkan.

Tabel 3.2 Pengujian kedua turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,9	10,5	1,2
2	1	21,0	1,3
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,4	85,1	3,9
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.2 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.4 Kurva Pengujian turbin savonius kedua

Terdapat korelasi yang jelas antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,9 m/s, turbin menghasilkan RPM sebesar 10,5 dan tegangan sebesar 1,2 V. Saat kecepatan angin meningkat menjadi 1 m/s, RPM naik menjadi 21,0 dengan tegangan sebesar 1,3 V. Peningkatan lebih lanjut dalam kecepatan angin hingga 2,5 m/s menyebabkan kenaikan RPM menjadi 87,5 dan tegangan mencapai 4,2 V. Terlihat bahwa setiap peningkatan kecepatan angin menyebabkan kenaikan RPM dan tegangan yang cukup signifikan. Khususnya, pada kecepatan angin 2,4 m/s hingga 2,5 m/s, terjadi lonjakan tegangan yang cukup tajam dari 3,9 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, efisiensi turbin meningkat, terutama dalam menghasilkan tegangan listrik. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa turbin angin lebih efektif pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan tegangan yang dihasilkan meningkat secara proporsional terhadap kenaikan RPM dan kecepatan angin.

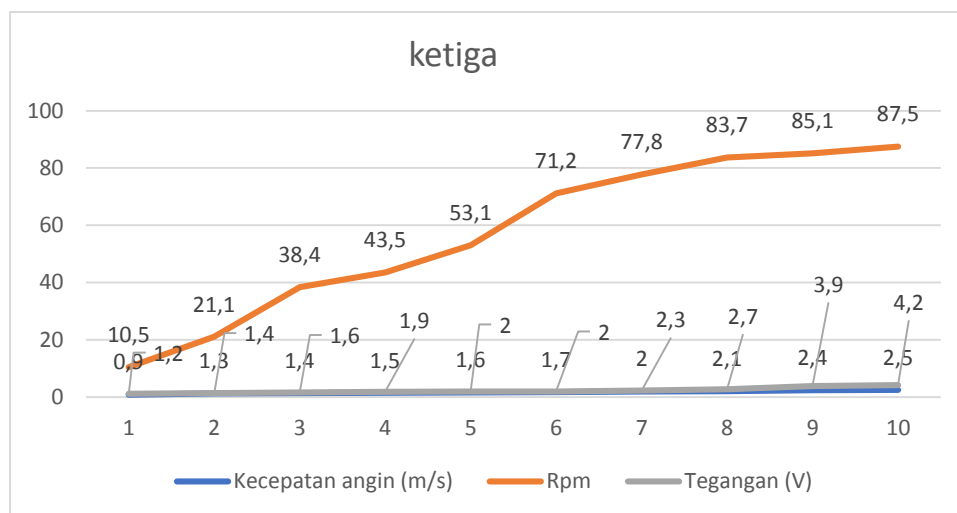
Analisis ini juga memberikan wawasan penting mengenai performa turbin Savonius, yang diketahui lebih efektif pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, pada batas tertentu, efisiensi turbin ini dapat dimaksimalkan, dan daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putarannya. Dengan kata lain, ada titik di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM, yang dapat disebabkan oleh desain turbin yang mampu menangkap dan mengonversi energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin tertentu. Kesimpulannya, pengujian ini menegaskan pentingnya memilih kecepatan angin optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja turbin angin, serta menunjukkan bahwa turbin Savonius memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan di wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang, tanpa mengorbankan efisiensi energi yang dihasilkan. Selain itu, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa desain turbin angin Savonius mampu beradaptasi dengan berbagai kondisi angin, terutama pada kecepatan angin yang bervariasi. Pada kecepatan angin rendah, turbin ini masih mampu menghasilkan tegangan yang cukup untuk berbagai aplikasi skala kecil, sementara pada kecepatan angin yang lebih tinggi, efisiensi pengkonversian energi angin ke energi listrik meningkat secara signifikan. Hal ini membuat turbin Savonius menjadi solusi yang efektif untuk penggunaan di daerah yang tidak memiliki angin kencang secara konsisten, seperti daerah perkotaan atau pedesaan dengan sumber angin yang fluktuatif. Selanjutnya, peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan kenaikan RPM pada kecepatan angin tertentu juga bisa diartikan sebagai adanya optimalisasi aerodinamika pada desain bilah turbin.

Bilah-bilah turbin Savonius didesain untuk menangkap aliran angin dengan sudut yang lebih efektif, sehingga energi kinetik angin dapat dimanfaatkan lebih maksimal tanpa harus meningkatkan kecepatan putaran rotor secara drastis.

Tabel 3.3 Pengujian ketiga turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,9	10,5	1,2
2	1,3	21,1	1,4
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,7	71,2	2,0
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,4	85,1	3,9
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.3 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.5 Kurva Pengujian turbin savonius ketiga

Berdasarkan tabel yang didapatkan, dapat dianalisis bahwa terdapat hubungan linier antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,9 m/s, turbin menghasilkan RPM sebesar 10,5 dengan tegangan sebesar 1,2 V. Peningkatan kecepatan angin hingga 1,3 m/s menghasilkan peningkatan RPM menjadi 21,1 dan tegangan menjadi 1,4 V. Data menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar pula RPM dan tegangan yang dihasilkan. Hal ini dapat dilihat secara konsisten hingga kecepatan angin 2,5 m/s, di mana RPM mencapai 87,5 dan tegangan mencapai 4,2 V. Menarik untuk dicatat bahwa ada peningkatan yang lebih tajam dalam tegangan ketika kecepatan angin mendekati 2,4 m/s hingga 2,5 m/s, meskipun kenaikan RPM relatif kecil. Ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, turbin mampu menghasilkan tegangan yang lebih besar meskipun tidak selalu diiringi dengan kenaikan RPM yang signifikan. Fenomena ini dapat disebabkan oleh peningkatan efisiensi aerodinamis dari turbin pada kecepatan angin tertentu, yang memungkinkan konversi energi angin menjadi energi listrik yang lebih efektif. Selain itu, pada kecepatan angin 1,7 m/s, terlihat bahwa

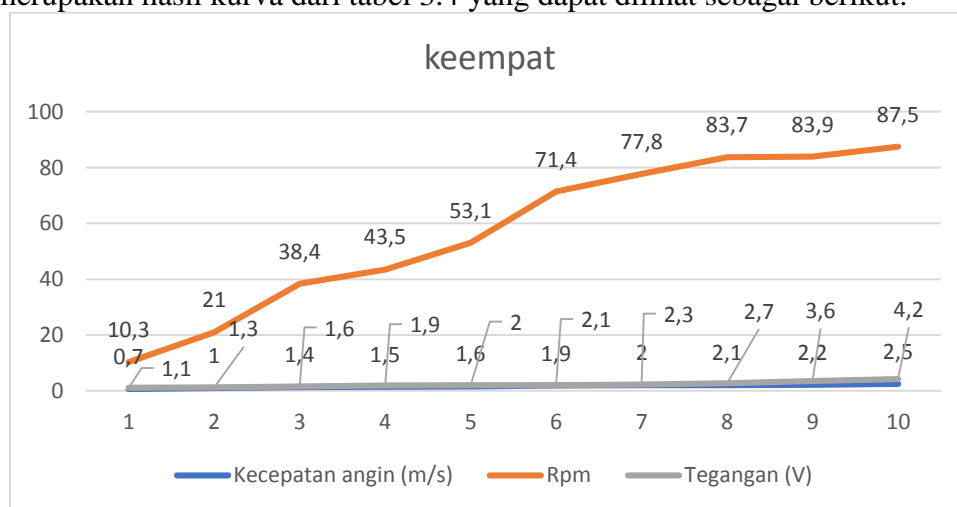
meskipun RPM naik signifikan hingga 71,2, tegangan yang dihasilkan tetap konstan di 2,0 V, menunjukkan bahwa pada titik tertentu, faktor lain seperti desain turbin atau batasan sistem listrik mungkin mempengaruhi output tegangan. Secara keseluruhan, data ini menggambarkan bahwa kecepatan angin yang lebih tinggi cenderung meningkatkan efisiensi konversi energi pada turbin, yang tercermin dari peningkatan tegangan yang dihasilkan.

Analisis ini juga memberikan wawasan penting mengenai performa turbin Savonius, yang diketahui lebih efektif pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, pada batas tertentu, efisiensi turbin ini dapat dimaksimalkan, dan daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putarannya. Dengan kata lain, ada titik di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM, yang dapat disebabkan oleh desain turbin yang mampu menangkap dan mengonversi energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin tertentu. Kesimpulannya, pengujian ini menegaskan pentingnya memilih kecepatan angin optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja turbin angin, serta menunjukkan bahwa turbin Savonius memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan di wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang, tanpa mengorbankan efisiensi energi yang dihasilkan. Hal ini membuat turbin Savonius menjadi solusi yang efektif untuk penggunaan di daerah yang tidak memiliki angin kencang secara konsisten, seperti daerah perkotaan atau pedesaan dengan sumber angin yang fluktuatif. Selanjutnya, peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan kenaikan RPM pada kecepatan angin tertentu juga bisa diartikan sebagai adanya optimalisasi aerodinamika pada desain bilah turbin.

Tabel 3.4 Pengujian keempat turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,7	10,3	1,1
2	1	21,0	1,3
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,2	83,9	3,6
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.4 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.6 Kurva Pengujian turbin savonius keempat

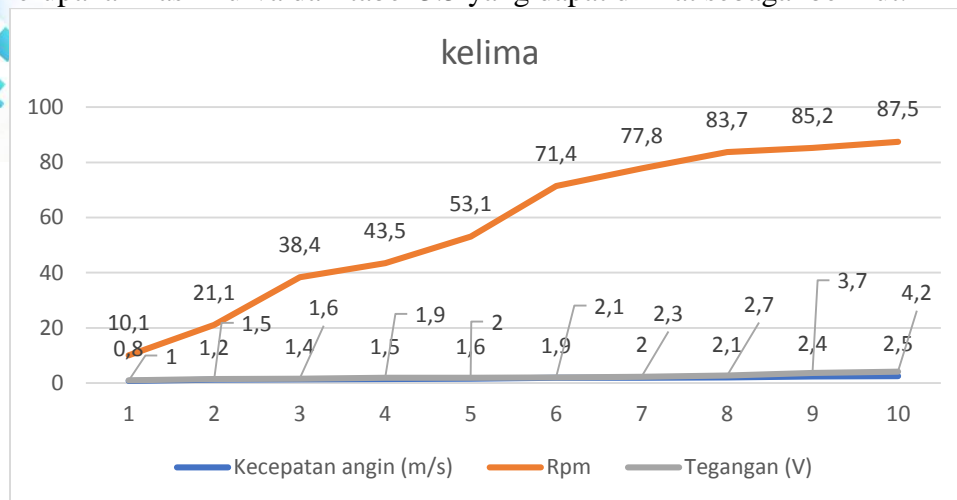
Berdasarkan data dalam tabel, terdapat hubungan antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,7 m/s, RPM yang dihasilkan adalah 10,3 dengan tegangan sebesar 1,1 V. Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 1 m/s, RPM naik signifikan menjadi 21,0 dengan tegangan sebesar 1,3 V. Peningkatan ini terus berlanjut seiring bertambahnya kecepatan angin, di mana pada kecepatan 2,5 m/s, RPM mencapai 87,5 dan tegangan yang dihasilkan mencapai 4,2 V. Hal ini menunjukkan bahwa ada korelasi positif antara kecepatan angin dengan RPM dan tegangan yang dihasilkan. Secara umum, peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan RPM dan tegangan, yang menandakan peningkatan efisiensi dan kinerja turbin angin pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada titik tertentu, peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan yang lebih signifikan dalam tegangan, yang terlihat jelas pada kecepatan 2,2 m/s hingga 2,5 m/s, di mana tegangan meningkat dari 3,6 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM tidak sebesar sebelumnya. Analisis ini mengindikasikan bahwa turbin angin memiliki kinerja yang optimal pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM.

Analisis ini juga memberikan wawasan penting mengenai performa turbin Savonius, yang diketahui lebih efektif pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, pada batas tertentu, efisiensi turbin ini dapat dimaksimalkan, dan daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putarannya. Dengan kata lain, ada titik di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM, yang dapat disebabkan oleh desain turbin yang mampu menangkap dan mengonversi energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin tertentu. Kesimpulannya, pengujian ini menegaskan pentingnya memilih kecepatan angin optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja turbin angin, serta menunjukkan bahwa turbin Savonius memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan di wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang, tanpa mengorbankan efisiensi energi yang dihasilkan. Hal ini membuat turbin Savonius menjadi solusi yang efektif untuk penggunaan di daerah yang tidak memiliki angin kencang secara konsisten, seperti daerah perkotaan atau pedesaan dengan sumber angin yang fluktuatif. Selanjutnya, peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan kenaikan RPM pada kecepatan angin tertentu juga bisa diartikan sebagai adanya optimalisasi aerodinamika pada desain bilah turbin.

Tabel 3.5 Pengujian kelima turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,8	10,1	1,0
2	1,2	21,1	1,5
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,4	85,2	3,7
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.5 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.7 Kurva Pengujian turbin savonius kelima

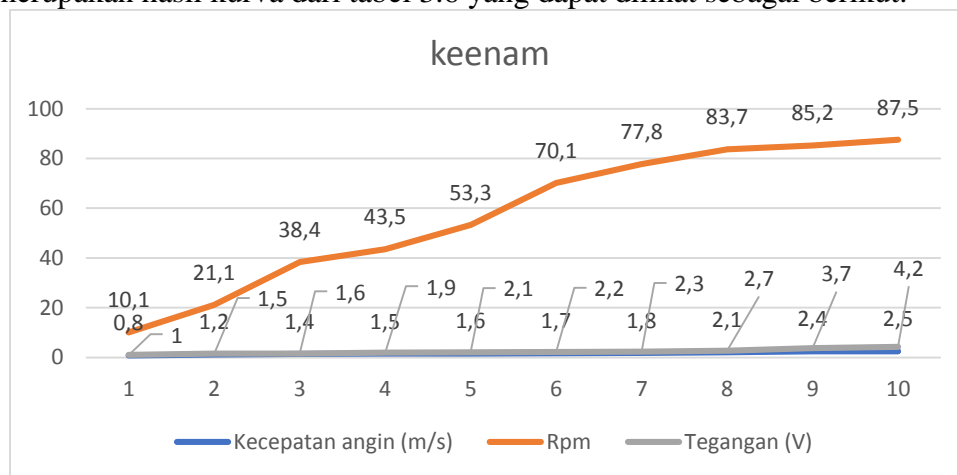
Dari data tabel 3.5, dapat terlihat bahwa ada korelasi positif antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,8 m/s, turbin menghasilkan RPM sebesar 10,1 dengan tegangan 1,0 V. Saat kecepatan angin meningkat menjadi 1,2 m/s, RPM bertambah menjadi 21,1 dengan tegangan 1,5 V, menunjukkan peningkatan yang signifikan baik dalam RPM maupun tegangan. Seiring dengan peningkatan kecepatan angin, data menunjukkan bahwa RPM dan tegangan terus meningkat. Misalnya, pada kecepatan angin 2,5 m/s, RPM mencapai 87,5 dan tegangan mencapai 4,2 V. Peningkatan signifikan dalam tegangan terutama terlihat pada kecepatan angin di atas 2,0 m/s, di mana tegangan meningkat lebih tajam dibandingkan dengan peningkatan sebelumnya. Misalnya, dari 2,1 m/s ke 2,4 m/s, tegangan melonjak dari 2,7 V menjadi 3,7 V, dan kemudian mencapai 4,2 V pada kecepatan 2,5 m/s. Analisis ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, turbin menjadi lebih efisien dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Selain itu, kenaikan tegangan yang lebih tajam pada kecepatan angin di atas 2,0 m/s menunjukkan bahwa turbin bekerja lebih optimal dalam kondisi angin yang lebih kencang. Peningkatan efisiensi ini dapat disebabkan oleh faktor aerodinamis turbin yang lebih efektif pada kecepatan angin yang lebih tinggi, sehingga mampu menghasilkan lebih banyak energi listrik meskipun peningkatan RPM mungkin tidak sebanding dengan peningkatan tegangan.

Analisis ini juga memberikan wawasan penting mengenai performa turbin Savonius, yang diketahui lebih efektif pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, pada batas tertentu, efisiensi turbin ini dapat dimaksimalkan, dan daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putarannya. Dengan kata lain, ada titik di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM, yang dapat disebabkan oleh desain turbin yang mampu menangkap dan mengonversi energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin tertentu. Kesimpulannya, pengujian ini menegaskan pentingnya memilih kecepatan angin optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja turbin angin, serta menunjukkan bahwa turbin Savonius memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan di wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang, tanpa mengorbankan efisiensi energi yang dihasilkan. Hal ini membuat turbin Savonius menjadi solusi yang efektif untuk penggunaan di daerah yang tidak memiliki angin kencang secara konsisten, seperti daerah perkotaan atau pedesaan dengan sumber angin yang fluktuatif. Selanjutnya, peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan kenaikan RPM pada kecepatan angin tertentu juga bisa diartikan sebagai adanya optimalisasi aerodinamika pada desain bilah turbin.

Tabel 3.6 Pengujian keenam turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,8	10,1	1,0
2	1,2	21,1	1,5
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,3	2,1
6	1,7	70,1	2,2
7	1,8	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,4	85,2	3,7
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.6 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.8 Kurva Pengujian turbin savonius keenam

Data dalam tabel 3.6 menunjukkan adanya korelasi positif antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,8 m/s, turbin menghasilkan RPM sebesar 10,1 dengan tegangan 1,0 V. Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 1,2 m/s, RPM meningkat lebih dari dua kali lipat menjadi 21,1, dengan tegangan yang naik menjadi 1,5 V. Peningkatan ini berlanjut seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, yang menghasilkan kenaikan bertahap dalam RPM dan tegangan. Pada kecepatan angin 1,7 m/s, turbin mencapai RPM sebesar 70,1 dengan tegangan 2,2 V, dan ketika kecepatan angin naik menjadi 2,5 m/s, RPM maksimum tercatat sebesar 87,5 dengan tegangan tertinggi sebesar 4,2 V. Peningkatan tegangan yang signifikan terjadi terutama pada kecepatan angin di atas 2,1 m/s, di mana tegangan naik dari 2,7 V pada 2,1 m/s menjadi 3,7 V pada 2,4 m/s, sebelum mencapai 4,2 V pada 2,5 m/s. Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa turbin angin menunjukkan efisiensi yang meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, terutama dalam hal tegangan yang dihasilkan. Peningkatan efisiensi ini mungkin disebabkan oleh optimisasi aerodinamis dari turbin yang lebih efektif pada kecepatan angin yang lebih tinggi, memungkinkan konversi energi angin menjadi energi listrik yang lebih besar. Kenaikan tegangan yang lebih tajam dibandingkan dengan kenaikan RPM pada kecepatan angin yang lebih tinggi menunjukkan bahwa sistem turbin bekerja lebih optimal pada kondisi angin yang lebih kencang.

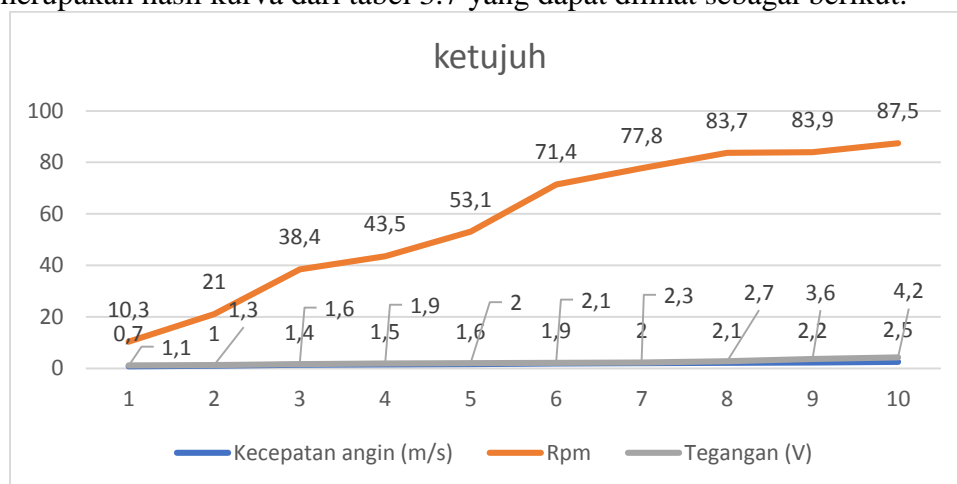
Analisis ini juga memberikan wawasan penting mengenai performa turbin Savonius, yang diketahui lebih efektif pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, pada batas

tertentu, efisiensi turbin ini dapat dimaksimalkan, dan daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putarannya. Dengan kata lain, ada titik di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM, yang dapat disebabkan oleh desain turbin yang mampu menangkap dan mengonversi energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin tertentu. Kesimpulannya, pengujian ini menegaskan pentingnya memilih kecepatan angin optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja turbin angin, serta menunjukkan bahwa turbin Savonius memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan di wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang, tanpa mengorbankan efisiensi energi yang dihasilkan. Hal ini membuat turbin Savonius menjadi solusi yang efektif untuk penggunaan di daerah yang tidak memiliki angin kencang secara konsisten, seperti daerah perkotaan atau pedesaan dengan sumber angin yang fluktuatif. Selanjutnya, peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan kenaikan RPM pada kecepatan angin tertentu juga bisa diartikan sebagai adanya optimalisasi aerodinamika pada desain bilah turbin.

Tabel 3.7 Pengujian ketujuh turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,7	10,3	1,1
2	1	21,0	1,3
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,2	83,9	3,6
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.7 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.9 Kurva Pengujian turbin savonius ketujuh

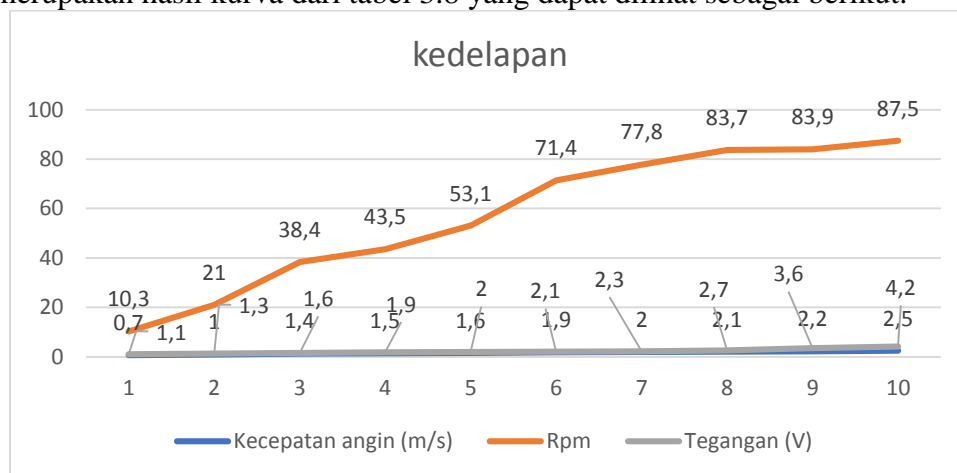
Berdasarkan data dalam tabel, terdapat hubungan antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,7 m/s, RPM yang dihasilkan adalah 10,3 dengan tegangan sebesar 1,1 V. Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 1 m/s, RPM naik signifikan menjadi 21,0 dengan tegangan sebesar 1,3 V. Peningkatan ini terus berlanjut seiring bertambahnya kecepatan angin, di mana pada kecepatan

2,5 m/s, RPM mencapai 87,5 dan tegangan yang dihasilkan mencapai 4,2 V. Hal ini menunjukkan bahwa ada korelasi positif antara kecepatan angin dengan RPM dan tegangan yang dihasilkan. Secara umum, peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan RPM dan tegangan, yang menandakan peningkatan efisiensi dan kinerja turbin angin pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada titik tertentu, peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan yang lebih signifikan dalam tegangan, yang terlihat jelas pada kecepatan 2,2 m/s hingga 2,5 m/s, di mana tegangan meningkat dari 3,6 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM tidak sebesar sebelumnya. Analisis ini mengindikasikan bahwa turbin angin memiliki kinerja yang optimal pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM.

Tabel 3.8 Pengujian kedelapan turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,7	10,3	1,1
2	1	21,0	1,3
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,2	83,9	3,6
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.8 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.10 Kurva Pengujian turbin savonius kedelapan

Berdasarkan data dalam tabel, terdapat hubungan antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,7 m/s, RPM yang dihasilkan adalah 10,3 dengan tegangan sebesar 1,1 V. Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 1 m/s, RPM naik signifikan menjadi 21,0 dengan tegangan sebesar 1,3 V. Peningkatan ini terus berlanjut seiring bertambahnya kecepatan angin, di mana pada kecepatan 2,5 m/s, RPM mencapai 87,5 dan tegangan yang dihasilkan mencapai 4,2 V. Hal ini menunjukkan bahwa ada korelasi positif antara kecepatan angin dengan RPM dan tegangan yang dihasilkan. Secara umum, peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan RPM dan tegangan, yang menandakan peningkatan efisiensi dan kinerja turbin angin pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada titik tertentu, peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan yang lebih signifikan dalam tegangan, yang terlihat jelas pada kecepatan 2,2 m/s hingga 2,5 m/s, di mana tegangan meningkat dari 3,6 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM tidak sebesar sebelumnya.

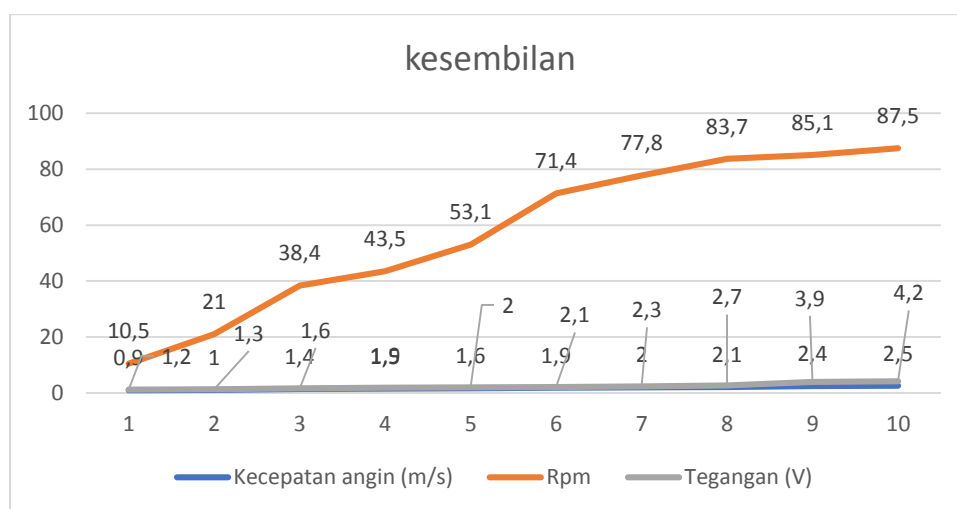
peningkatan yang lebih signifikan dalam tegangan, yang terlihat jelas pada kecepatan 2,2 m/s hingga 2,5 m/s, di mana tegangan meningkat dari 3,6 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM tidak sebesar sebelumnya. Analisis ini mengindikasikan bahwa turbin angin memiliki kinerja yang optimal pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM.

Analisis ini juga memberikan wawasan penting mengenai performa turbin Savonius, yang diketahui lebih efektif pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Namun, pada batas tertentu, efisiensi turbin ini dapat dimaksimalkan, dan daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putarannya. Dengan kata lain, ada titik di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan kenaikan RPM, yang dapat disebabkan oleh desain turbin yang mampu menangkap dan mengonversi energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin tertentu. Kesimpulannya, pengujian ini menegaskan pentingnya memilih kecepatan angin optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja turbin angin, serta menunjukkan bahwa turbin Savonius memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan di wilayah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang, tanpa mengorbankan efisiensi energi yang dihasilkan.

Tabel 3.9 Pengujian kesembilan turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,9	10,5	1,2
2	1	21,0	1,3
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,4	85,1	3,9
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.9 yang dapat dilihat sebagai berikut.



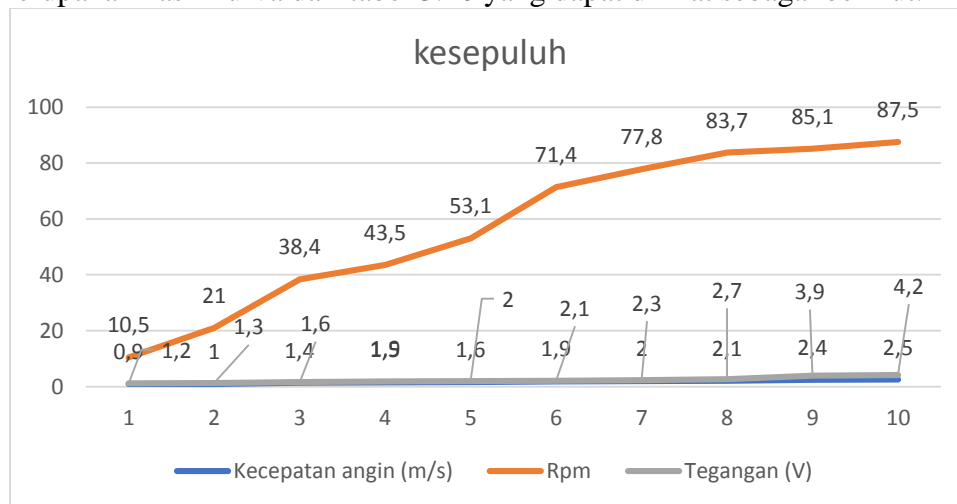
Gambar 3.11 Kurva Pengujian turbin savonius kesembilan

Data dalam tabel 3.9 terdapat korelasi yang jelas antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,9 m/s, turbin menghasilkan RPM sebesar 10,5 dan tegangan sebesar 1,2 V. Saat kecepatan angin meningkat menjadi 1 m/s, RPM naik menjadi 21,0 dengan tegangan sebesar 1,3 V. Peningkatan lebih lanjut dalam kecepatan angin hingga 2,5 m/s menyebabkan kenaikan RPM menjadi 87,5 dan tegangan mencapai 4,2 V. Terlihat bahwa setiap peningkatan kecepatan angin menyebabkan kenaikan RPM dan tegangan yang cukup signifikan. Khususnya, pada kecepatan angin 2,4 m/s hingga 2,5 m/s, terjadi lonjakan tegangan yang cukup tajam dari 3,9 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, efisiensi turbin meningkat, terutama dalam menghasilkan tegangan listrik. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa turbin angin lebih efektif pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan tegangan yang dihasilkan meningkat secara proporsional terhadap kenaikan RPM dan kecepatan angin.

Tabel 3.10 Pengujian kesepuluh turbin savonius

No	Kecepatan angin (m/s)	Rpm	Tegangan (V)
1	0,9	10,5	1,2
2	1	21,0	1,3
3	1,4	38,4	1,6
4	1,5	43,5	1,9
5	1,6	53,1	2,0
6	1,9	71,4	2,1
7	2	77,8	2,3
8	2,1	83,7	2,7
9	2,4	85,1	3,9
10	2,5	87,5	4,2

Berikut merupakan hasil kurva dari tabel 3.10 yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.12 Kurva Pengujian turbin savonius kesepuluh

Dari data tabel 3.10, terdapat korelasi yang jelas antara kecepatan angin, RPM (rotasi per menit), dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada kecepatan angin 0,9 m/s, turbin menghasilkan RPM sebesar 10,5 dan tegangan sebesar 1,2 V. Saat kecepatan angin meningkat menjadi 1 m/s, RPM naik menjadi 21,0 dengan tegangan sebesar 1,3 V. Peningkatan lebih lanjut dalam kecepatan angin hingga 2,5 m/s menyebabkan kenaikan RPM menjadi 87,5 dan tegangan mencapai 4,2 V. Terlihat bahwa setiap peningkatan kecepatan angin menyebabkan kenaikan RPM dan tegangan yang cukup signifikan. Khususnya, pada kecepatan angin 2,4 m/s hingga 2,5 m/s, terjadi lonjakan tegangan yang cukup tajam dari 3,9 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, efisiensi turbin meningkat, terutama dalam menghasilkan tegangan listrik. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa turbin angin lebih efektif pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan tegangan yang dihasilkan meningkat secara proporsional terhadap kenaikan RPM dan kecepatan angin.

tegangan mencapai 4,2 V. Terlihat bahwa setiap peningkatan kecepatan angin menyebabkan kenaikan RPM dan tegangan yang cukup signifikan. Khususnya, pada kecepatan angin 2,4 m/s hingga 2,5 m/s, terjadi lonjakan tegangan yang cukup tajam dari 3,9 V menjadi 4,2 V, meskipun kenaikan RPM relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, efisiensi turbin meningkat, terutama dalam menghasilkan tegangan listrik. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa turbin angin lebih efektif pada kecepatan angin yang lebih tinggi, dengan tegangan yang dihasilkan meningkat secara proporsional terhadap kenaikan RPM dan kecepatan angin.

Pengujian generator tanpa beban

Pengujian generator tanpa beban adalah tahap penting dalam mengevaluasi kinerja generator, terutama dalam memastikan tegangan keluaran sesuai dengan spesifikasi desain. Pada kondisi ini, generator dioperasikan tanpa adanya beban listrik yang terhubung, sehingga hanya menghasilkan tegangan akibat medan magnet yang dibentuk oleh rotor yang berputar. Pengujian ini dilakukan untuk mengukur tegangan output pada berbagai kecepatan rotor, yang kemudian dibandingkan dengan nilai-nilai yang diharapkan. Hasil dari pengujian tanpa beban dapat memberikan informasi penting tentang karakteristik generator, seperti stabilitas tegangan dan respons generator terhadap variasi kecepatan putar. Pengujian ini juga membantu mengidentifikasi potensi masalah pada generator sebelum dioperasikan dengan beban sebenarnya, sehingga mencegah kerusakan lebih lanjut dan memastikan performa optimal saat digunakan dalam kondisi beban.

Pada pengujian generator turbin, tegangan yang dihasilkan pada berbagai putaran rotor (RPM) menunjukkan pola kenaikan yang konsisten seiring dengan peningkatan kecepatan putaran. Pengukuran yang dilakukan pada rentang RPM dari 3 hingga 80 menunjukkan bahwa tegangan output generator meningkat secara linear dengan bertambahnya RPM. Pada kecepatan 3 RPM, generator menghasilkan tegangan sekitar 1 volt. Ketika kecepatan meningkat menjadi 5 RPM, tegangan output juga meningkat menjadi 1,3 volt, menunjukkan kenaikan yang sesuai dengan peningkatan kecepatan. Dengan kecepatan putaran sebesar 10 RPM, tegangan yang dihasilkan mencapai 2,5 volt. Seiring dengan bertambahnya kecepatan menjadi 25 RPM, tegangan output generator meningkat menjadi 3,7 volt. Pada kecepatan 29 RPM, tegangan mencapai 4,1 volt, dan pada 31 RPM, tegangan output sedikit meningkat menjadi 4,3 volt.

Ketika kecepatan putaran naik menjadi 38 RPM, tegangan output generator mencapai 4,9 volt, dan pada 47 RPM, tegangan output sedikit meningkat menjadi 5,1 volt. Pengukuran pada 62 RPM menunjukkan tegangan 6,9 volt, yang menunjukkan tren peningkatan yang signifikan dengan bertambahnya kecepatan putaran. Pada kecepatan tertinggi yang diuji, yaitu 80 RPM, tegangan output generator mencapai 8,1 volt. Data ini menunjukkan bahwa generator turbin menghasilkan tegangan yang semakin tinggi dengan meningkatnya RPM, dengan pola pertumbuhan yang hampir linear, mencerminkan efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik dalam rentang kecepatan putaran yang diuji. Dengan memahami hubungan ini, kita dapat memperkirakan performa generator pada kecepatan yang berbeda dan mengoptimalkan penggunaannya dalam aplikasi pembangkit listrik.

Pengembangan energi terbarukan, khususnya energi angin, merupakan langkah strategis untuk mengatasi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang semakin menipis. Energi angin yang bersih dan ramah lingkungan ini memiliki potensi besar di Indonesia, mengingat kecepatan angin rata-rata yang cukup memadai untuk pembangkit listrik. Dalam penelitian ini, fokus utama adalah pada optimasi kinerja generator yang digunakan pada turbin angin vertikal Savonius, yang dikenal efektif pada kecepatan angin rendah.

1. Pengujian Kecepatan Angin yang Dihasilkan Turbin Angin Vertikal Savonius

Hasil pengujian kecepatan angin menunjukkan bahwa turbin angin vertikal Savonius mampu memanfaatkan kecepatan angin yang rendah untuk menghasilkan rotasi pada porosnya.

Data yang dikumpulkan dari berbagai titik pengukuran memperlihatkan bahwa turbin ini efektif dalam menangkap angin dari berbagai arah, sesuai dengan desainnya. Kecepatan angin yang masuk dan keluar dari turbin memberikan indikasi efisiensi konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Analisis menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar pula rotasi yang dihasilkan, namun turbin ini tetap berfungsi dengan baik pada kecepatan angin rendah, sesuai dengan karakteristik desainnya.

2. Pengujian Tegangan Listrik Output yang Dihasilkan Generator Turbin Angin Vertikal Savonius

Pengujian tegangan output menunjukkan bahwa generator menghasilkan tegangan yang sebanding dengan kecepatan rotasi turbin. Tegangan yang dihasilkan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang memutar turbin. Ini menunjukkan bahwa generator magnet permanen yang digunakan cukup efisien dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Namun, pada kecepatan angin yang sangat rendah, tegangan yang dihasilkan cenderung kecil, yang sesuai dengan harapan mengingat batasan fisik dari generator tersebut. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa untuk mencapai tegangan output yang optimal, kecepatan angin harus berada dalam rentang tertentu yang mendukung rotasi turbin secara konsisten.

3. Pengujian Arus Listrik Output yang Dihasilkan Generator Turbin Angin Vertikal Savonius

Pengujian arus listrik output mengungkapkan bahwa arus yang dihasilkan oleh generator berkorelasi positif dengan tegangan dan kecepatan angin. Arus yang dihasilkan meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan angin, namun dengan laju yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan. Hal ini disebabkan oleh faktor resistansi beban yang konstan, yang membatasi arus maksimum yang dapat dihasilkan. Pada kecepatan angin yang lebih tinggi, generator mampu menghasilkan arus yang cukup untuk mendukung beban listrik tertentu, tetapi pada kecepatan angin rendah, arus yang dihasilkan mungkin tidak cukup signifikan, mengindikasikan kebutuhan untuk optimasi lebih lanjut dalam desain generator.

3. Pengujian Daya Listrik Output yang Dihasilkan Generator Turbin Angin Vertikal Savonius

Pengujian daya listrik output menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh generator merupakan hasil kali antara tegangan dan arus yang dihasilkan. Data menunjukkan bahwa daya listrik yang dihasilkan meningkat dengan bertambahnya kecepatan angin, sesuai dengan peningkatan tegangan dan arus. Namun, daya output maksimum hanya dapat dicapai pada kecepatan angin yang mendekati optimal untuk desain turbin dan generator. Pada kecepatan angin rendah, daya yang dihasilkan mungkin cukup untuk aplikasi skala kecil, tetapi tidak untuk aplikasi yang membutuhkan daya besar. Analisis ini menunjukkan bahwa untuk memaksimalkan daya output, perlu ada keseimbangan antara desain turbin, karakteristik generator, dan kondisi angin di lokasi pengujian.

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa turbin angin vertikal Savonius yang dipadukan dengan generator magnet permanen memiliki potensi untuk menghasilkan energi listrik yang memadai, terutama pada kecepatan angin rendah yang umum di Indonesia. Meskipun demikian, optimasi lebih lanjut pada desain turbin dan pemilihan generator yang tepat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan daya output, sehingga dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif yang andal dan berkelanjutan di masa depan.

Analisa Perhitungan

Setelah melakukan pengujian kecepatan angin, rpm dan tegangan, model perhitungan matematis untuk mencari keluaran daya turbin angin sebagai berikut.

$$P_m = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v w^3$$

Dimana :

P_m = output power mekanikal turbin (W)

ρ = Air density (kg/m³)

A = turbine swept area (m²)

v_w^3 = kecepatan angin (m/s)

1. Perhitungan pengujian pertama turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 1 (m/s)

$$P_m = 0,2508 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 1$$

$$P_m = 0,59 \text{ W}$$

2. Perhitungan pengujian kedua turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 1,4 (m/s)

$$P_m = 0,2776 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 2,744$$

$$P_m = 1,8 \text{ W}$$

3. Perhitungan pengujian ketiga turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 1,5 (m/s)

$$P_m = 0,3441 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 3,375$$

$$P_m = 2,75 \text{ W}$$

4. Perhitungan pengujian keempat turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 1,6 (m/s)

$$P_m = 0,3583 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 4,096$$

$$P_m = 3,48 \text{ W}$$

5. Perhitungan pengujian kelima turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 1,9 (m/s)

$$P_m = 0,37 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 6,859$$

$$P_m = 6,05 \text{ W}$$

6. Perhitungan pengujian keenam turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 2 (m/s)

$$P_m = 0,3759 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 8$$

$$P_m = 7,14 \text{ W}$$

7. Perhitungan pengujian ketujuh turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 2,1 (m/s)

$$P_m = 0,3829 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 9,261$$

$$P_m = 8,42 \text{ W}$$

8. Perhitungan pengujian kedelapan turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 2,2 (m/s)

$$P_m = 0,3841 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 10,648$$

$$P_m = 9,71 \text{ W}$$

9. Perhitungan pengujian kesembilan turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 2,4 (m/s)

$$P_m = 0,3835 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 13,824$$

$$P_m = 12,58 \text{ W}$$

10. Perhitungan pengujian kesepuluh turbin angin savonius

Diketahui nilai kecepatan angin 2,5 (m/s)

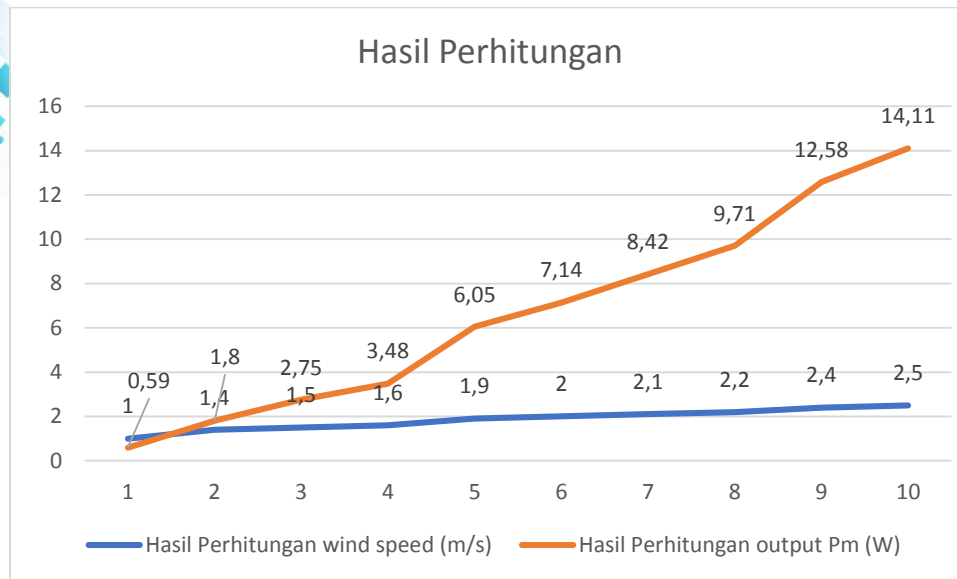
$$P_m = 0,3805 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 3,877 \times 15,625$$

$$P_m = 14,11 \text{ W}$$

Analisis perhitungan dari pengujian turbin angin Savonius menunjukkan hasil yang konsisten dan memberikan wawasan yang berharga tentang kinerja turbin pada berbagai kecepatan angin. Pada pengujian pertama, dengan kecepatan angin 1 m/s, daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,59 W. Saat kecepatan angin meningkat menjadi 1,4 m/s pada pengujian kedua, daya yang dihasilkan juga meningkat secara signifikan menjadi 1,8 W. Ini menunjukkan bahwa turbin mulai beroperasi lebih efisien seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Pada pengujian ketiga, dengan kecepatan angin 1,5 m/s, daya yang dihasilkan meningkat lebih jauh menjadi 2,75 W, menunjukkan adanya korelasi positif antara kecepatan angin dan daya yang dihasilkan. Selanjutnya, pada pengujian keempat di mana kecepatan angin mencapai 1,6 m/s, daya maksimum meningkat menjadi 3,48 W. Pada pengujian kelima, dengan kecepatan angin 1,9 m/s, daya yang dihasilkan melonjak drastis menjadi 6,05 W, yang mencerminkan respons turbin yang semakin baik terhadap peningkatan kecepatan angin. Pada kecepatan 2 m/s (pengujian keenam), daya yang dihasilkan mencapai 7,14 W, menunjukkan bahwa turbin terus beradaptasi dan meningkatkan kinerjanya. Pengujian ketujuh dengan kecepatan angin 2,1 m/s menghasilkan daya 8,42 W, dan pada kecepatan 2,2 m/s (pengujian kedelapan), daya meningkat menjadi 9,71 W. Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan kecepatan angin berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan oleh turbin. Pada pengujian kesembilan, di mana kecepatan angin adalah 2,4 m/s, daya mencapai 12,58 W. Setelah melakukan perhitungan berikut merupakan tabel hasil perhitungan turbin :

Tabel 3.11 Hasil Perhitungan Turbin Angin

No	Hasil Perhitungan	
	wind speed (m/s)	output Pm (W)
1	1	0,59
2	1,4	1,8
3	1,5	2,75
4	1,6	3,48
5	1,9	6,05
6	2	7,14
7	2,1	8,42
8	2,2	9,71
9	2,4	12,58
10	2,5	14,11



Gambar 3.13 Kurva hasil perhitungan

Pembahasan

Tabel diatas menunjukkan analisis data hasil perhitungan output daya turbin angin berdasarkan kecepatan angin memberikan wawasan yang mendalam tentang hubungan antara kecepatan angin dan energi yang dihasilkan. Dari tabel yang diberikan, terlihat bahwa output daya (P_m) yang dihasilkan oleh turbin angin meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya kecepatan angin.

Pada kecepatan angin 1 m/s, output daya turbin adalah 0,59 W, yang merupakan nilai yang relatif rendah. Ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang sangat rendah, turbin angin hanya menghasilkan energi yang sangat terbatas. Ketika kecepatan angin sedikit meningkat menjadi 1,4 m/s, output daya meningkat menjadi 1,8 W. Peningkatan ini menunjukkan bahwa meskipun ada sedikit peningkatan dalam output daya, daya yang dihasilkan masih tergolong rendah, mencerminkan kebutuhan untuk kecepatan angin yang lebih tinggi untuk meningkatkan efisiensi energi.

Saat kecepatan angin mencapai 1,5 m/s, output daya mengalami kenaikan lebih lanjut menjadi 2,75 W. Kenaikan daya ini memperlihatkan bahwa turbin mulai lebih efektif dalam menangkap energi dari angin. Dengan kecepatan angin sebesar 1,6 m/s, output daya meningkat menjadi 3,48 W, menunjukkan tren pertumbuhan yang konsisten.

Perubahan signifikan mulai terlihat pada kecepatan angin 1,9 m/s, di mana output daya melonjak menjadi 6,05 W. Peningkatan ini menunjukkan bahwa turbin angin menjadi jauh lebih efektif dalam menghasilkan daya ketika kecepatan angin mendekati tingkat optimalnya. Pada kecepatan angin 2 m/s, output daya mencapai 7,14 W, dan terus meningkat dengan kecepatan angin 2,1 m/s yang menghasilkan 8,42 W. Ini mengindikasikan bahwa turbin angin lebih baik dalam memanfaatkan energi angin yang lebih cepat.

Pada kecepatan angin 2,2 m/s, output daya meningkat lebih jauh menjadi 9,71 W, dan pada kecepatan angin 2,4 m/s, output daya mencapai 12,58 W. Pada kecepatan angin tertinggi dalam data, yaitu 2,5 m/s, output daya mencapai 14,11 W. Peningkatan output daya ini secara konsisten mengikuti pola pertumbuhan eksponensial seiring dengan peningkatan kecepatan angin.

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa ada hubungan positif yang kuat antara kecepatan angin dan output daya turbin angin. Output daya meningkat secara signifikan dengan setiap kenaikan kecil dalam kecepatan angin, menggambarkan bagaimana turbin angin menjadi jauh lebih efektif dalam mengubah energi angin menjadi energi listrik pada kecepatan

angin yang lebih tinggi. Tren ini menekankan pentingnya memiliki kecepatan angin yang memadai untuk memaksimalkan produksi energi turbin angin. Data ini juga menunjukkan bahwa untuk mencapai efisiensi maksimum dalam sistem turbin angin, kecepatan angin yang optimal harus dipertimbangkan dalam perencanaan dan desain sistem tenaga angin.

Perilaku output daya yang meningkat secara dramatis pada kecepatan angin yang lebih tinggi dapat dihubungkan dengan desain aerodinamis sistem, efisiensi konversi energi, atau karakteristik material yang digunakan. Peningkatan daya yang tidak linier ini juga menunjukkan pentingnya perencanaan yang tepat dalam mengoperasikan sistem, terutama dalam konteks pembangkit energi terbarukan seperti turbin angin. Dengan mengetahui karakteristik ini, dapat dilakukan optimasi dalam desain dan pengoperasian sistem untuk memaksimalkan efisiensi dan output daya pada berbagai kondisi kecepatan angin.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem pembangkit daya angin memiliki potensi yang signifikan dalam menghasilkan daya pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Analisis ini dapat digunakan untuk merancang strategi pengoperasian yang lebih baik dan mengoptimalkan performa sistem dalam berbagai kondisi angin, memastikan bahwa sistem dapat berfungsi pada kapasitas maksimalnya untuk menghasilkan energi yang efisien dan efektif. Hasil pengujian turbin angin Savonius menunjukkan bahwa daya maksimum yang dihasilkan bervariasi tergantung pada kecepatan angin, dengan nilai tertinggi mencapai 14,11 W pada kecepatan 2,5 m/s. Ketika dibandingkan dengan spesifikasi generator magnet permanen (PMG) yang memiliki kapasitas daya 500 watt, hasil ini mencerminkan bahwa turbin Savonius masih berada jauh di bawah kapasitas maksimal yang dapat dihasilkan oleh generator tersebut. Meskipun turbin Savonius dapat menghasilkan daya yang signifikan pada kecepatan angin yang bervariasi, terutama dengan peningkatan daya yang cukup jelas di atas kecepatan 1,9 m/s, daya yang dihasilkan tetap rendah dibandingkan dengan kapasitas maksimum generator.

Spesifikasi generator menyebutkan bahwa tegangan outputnya berkisar antara 12-24 V DC dan arus output mencapai 20-30 A pada beban puncak, yang jauh lebih tinggi daripada daya yang dihasilkan oleh turbin Savonius dalam pengujian ini. Selain itu, kecepatan putar minimum 60 RPM untuk menghasilkan daya menunjukkan bahwa turbin Savonius perlu mencapai kecepatan angin yang cukup tinggi untuk dapat memberikan output daya yang lebih mendekati kapasitas generator. Dengan efisiensi antara 85-90%, generator ini dirancang untuk memaksimalkan konversi energi, sementara efisiensi turbin Savonius, yang lebih rendah, menunjukkan perlunya pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan performanya. Desain sudu turbin Savonius yang semi-silindris dan asimetris bertujuan untuk meningkatkan tangkapan angin, tetapi material yang digunakan, seperti aluminium atau baja ringan, juga memberikan batasan pada daya yang dapat dihasilkan. Meskipun desain ini optimal untuk kecepatan angin rendah hingga sedang, untuk mencapai daya yang lebih mendekati kapasitas 500 watt dari generator PMG, turbin perlu ditingkatkan baik dari segi desain maupun material yang digunakan. Dengan demikian, ada potensi untuk meningkatkan performa turbin Savonius agar lebih sesuai dengan spesifikasi generator yang ada, memungkinkan sistem ini untuk berfungsi secara lebih efisien dalam menghasilkan energi dari sumber angin.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis kecepatan angin dan output daya, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Korelasi Positif Signifikan antara Kecepatan Angin dan Output Daya Terdapat korelasi positif yang signifikan antara kecepatan angin dan output daya. Seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, output daya yang dihasilkan meningkat secara substansial. Ini menunjukkan bahwa sistem pembangkit daya mampu memanfaatkan angin dengan lebih efektif untuk menghasilkan daya yang lebih tinggi ketika kecepatan angin meningkat.

2. Peningkatan Output Daya Tidak Linier dengan Kecepatan Angin Kenaikan output daya tidak bersifat linier melainkan mengalami percepatan yang lebih besar pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Hal ini terlihat dari lonjakan output daya yang lebih tajam pada kecepatan angin tinggi, terutama setelah kecepatan angin mencapai sekitar 2,5 m/s. Ini menunjukkan bahwa sistem pembangkit daya memiliki efisiensi yang meningkat secara eksponensial dengan kecepatan angin yang lebih besar.
3. Potensi Maksimum Output Daya Terlihat pada Kecepatan Angin Tinggi Output daya mencapai puncaknya pada kecepatan angin yang sangat tinggi, yaitu 2,5 m/s, dengan nilai maksimum sebesar 14,11 W. Ini menandakan bahwa sistem ini memiliki potensi besar dalam menghasilkan daya pada kecepatan angin optimal. Untuk memanfaatkan potensi ini secara maksimal, penting untuk mempertimbangkan desain dan pengoperasian sistem agar dapat berfungsi pada kapasitas maksimal dalam kondisi angin yang kuat.

Saran

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, beberapa saran untuk meningkatkan efisiensi dan output daya dari sistem pembangkit energi angin adalah sebagai berikut. Pertama, penting untuk mengoptimalkan desain sistem agar dapat berfungsi secara optimal pada kecepatan angin tinggi. Mengingat bahwa output daya meningkat secara signifikan pada kecepatan angin yang lebih besar, desain turbin dan komponen mekanis perlu diperkuat untuk menangani beban angin yang lebih besar, serta menggunakan material yang tahan terhadap kondisi ekstrem. Kedua, melakukan pemeliharaan dan pemantauan secara rutin terhadap sistem untuk memastikan bahwa semua komponen berfungsi dengan baik dan efisien. Kondisi mekanis yang optimal dan minimnya kerusakan dapat meningkatkan performa sistem secara keseluruhan. Terakhir, mempertimbangkan penerapan teknologi kontrol canggih yang dapat menyesuaikan operasi sistem berdasarkan kecepatan angin yang terukur, untuk memaksimalkan konversi energi dan menghindari kerusakan akibat kecepatan angin ekstrem. Dengan langkah-langkah ini, sistem pembangkit energi angin dapat memanfaatkan potensi maksimum dalam menghasilkan daya, bahkan pada kecepatan angin yang sangat tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alqodri, M. F., et al. (2015). Rancang bangun generator fluks aksial putaran rendah magnet permanen jenis Neodymium (NdFeB) untuk turbin angin sumbu vertikal tipe double-stage savonius. Prosiding seminar nasional fisika (e-journal).
- Hartanto, B. and S. J. J. B. H. Sartini (2019). "kebijakan pemanfaatan energi dan sumberdaya energi mineral kelautan Indonesia." 2(2): 90-106.
- Hemdi, A. J., et al. "Kebijakan Multi-Energi: Angin dan Surya Sebagai Sumber Energi Terbarukan di Indonesia."
- Medi, A. and S. J. A. Rizal (2015). "Desain optimasi sudu kipas sentrifugal." 7(2).
- Nakhoda, Y. and C. J. S. S. K.-T.-e.-t.-k. Saleh (2016). "Rancang bangun generator magnet permanen untuk pembangkit tenaga listrik skala kecil menggunakan kincir angin savonius portabel." 5(2): 71-76.
- Nurdiyanto, A. and S. I. J. J. T. E. Haryudo (2020). "Rancang bangun prototype pembangkit listrik tenaga angin menggunakan turbin angin savonius." 9(1).
- Ptacek, M., et al. (2016). Modelling of small wind power plant with savonius-darrieus rotor in the PSCAD. 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), IEEE.
- Sembodo, B. P. J. W. (2018). "Rancang Bangun Generator Turbin Angin Putaran Rendah Sebagai Pembangkit Energi Listrik Alternatif Di Daerah Pesisir." 70(1): 25-33.
- Susanto, D., et al. (2019). "Rancang Bangun dan Analisa Kinerja Generator Fluks Aksial Magnet Permanen Putaran Rendah untuk Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Savonius." 2(1): 289673.

- Widyanto, S. W., et al. (2018). "Pemanfaatan Tenaga Angin Sebagai Pelapis Energi Surya pada WJAYA, A. A., et al. (2016). "Perancangan Generator Magnet Permanen dengan Arah Fluks Aksial untuk Aplikasi Pembangkit Listrik." 4(2).