



Desain dan Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Angin Berbasis Turbin Savonius sebagai Solusi Energi Berkelanjutan Di Wilayah Pedesaan

Aris Palinggi¹, Dedy Nataniel Ullly^{1,*}, Bernadus S. Wuwur¹, Irene Budayawati¹, Desi Natalia Ratu¹, Purnawarman Ginting¹, Paula Rita¹

¹ Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Kupang, Nusa Tenggara Timur, Indonesia

Kata kunci

Desain
Pembangkit Listrik
Tenaga Angin
Savonius
Energi Berkelanjutan

ABSTRAK

Energi listrik merupakan faktor penting dalam meningkatkan kualitas hidup masyarakat, terutama di daerah pedesaan. Namun, banyak daerah pedesaan di Indonesia masih belum memiliki listrik karena keterbatasan infrastruktur, kondisi geografis yang sulit, dan biaya pasokan energi yang tinggi. Ketiadaan listrik membatasi aktivitas ekonomi dan menghambat kemajuan pendidikan, kesehatan, dan akses informasi. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang pembangkit listrik tenaga angin menggunakan turbin angin Savonius untuk mengatasi kekurangan listrik di daerah pedesaan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimen nyata dengan melakukan uji lapangan dengan menerapkan turbin angin di daerah dengan kecepatan angin rendah hingga sedang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya keluaran turbin angin Savonius 3 bilah meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan angin, mencapai puncaknya pada kecepatan 5 m/s dengan daya 180,8 W dan efisiensi 68,4%. Setelah melewati titik ini, efisiensi sedikit menurun karena peningkatan turbulensi dan kehilangan gesekan mekanis pada poros dan bantalan turbin. Namun, dalam pengujian turbin angin Savonius 2 sudu, terlihat bahwa peningkatan kecepatan angin memiliki efek langsung pada peningkatan daya keluaran turbin, karena energi kinetik angin berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan angin ($P \propto v^3$). Namun, pada kecepatan di atas 5 m/s, efisiensi sedikit menurun karena turbulensi udara dan kehilangan mekanis pada poros dan bantalan.

* **Corresponding author:**

Dedy Nataniel Ullly (email: dedy.ully@gmail.com)

Diterima: 7 Februari 2026

Disetujui: 24 Februari 2026

Dipublikasikan: 26 Februari 2026

1 Pendahuluan

Ketiadaan listrik di daerah pedesaan masih menjadi permasalahan nyata di beberapa wilayah Indonesia, khususnya di daerah kepulauan dan terpencil. Di Kabupaten Sabu Raijua, keterbatasan jaringan listrik dipengaruhi oleh kondisi geografis kepulauan, jarak antarpulau, serta biaya investasi jaringan yang relatif tinggi. Selain itu, karakteristik wilayah dengan kepadatan penduduk rendah menyebabkan perluasan jaringan listrik konvensional menjadi kurang ekonomis.

Dari sisi sumber daya alam, wilayah Sabu Raijua memiliki potensi energi angin dengan karakteristik kecepatan rendah hingga menengah yang relatif konsisten sepanjang tahun, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan skala kecil. Namun, pemanfaatan energi angin di wilayah pedesaan masih terbatas akibat kurangnya sistem pembangkit yang dirancang khusus untuk kondisi angin rendah dan fluktuatif. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan pembangkit listrik tenaga angin yang sederhana, adaptif terhadap karakteristik angin lokal, dan layak diterapkan di wilayah pedesaan [1]. Pemanfaatan energi angin ini dengan menggunakan alat konversi energi yakni turbin angin Savonius di mana memiliki keunggulan karena tidak bergantung pada arah angin dan dapat memulai putaran secara mandiri [2]. Energi kinetik angin yang melaju dengan kecepatan tertentu ditangkap oleh sudu-sudu turbin dengan geometri dan luasan tertentu, sehingga menghasilkan gerak rotasi untuk memutar rotor turbin. Putaran rotor turbin mampu memutar poros generator

untuk menghasilkan energi listrik. Karena itu, energi angin mampu menggantikan peran bahan bakar fosil sebagai sumber tenaga penggerak generator listrik. Energi angin merupakan pilihan yang menjanjikan pada sektor pembangkit listrik karena produksi listrik yang bebas polusi dan ketersediaan sumber energi angin di semua daerah [3].

Penelitian tentang perancangan dan usaha peningkatan kinerja turbin angin Savonius telah menjadi isu yang sangat menarik baik di luar maupun di dalam negeri. Beberapa rancangan pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan turbin angin Savonius telah dikembangkan di luar negeri. Perancangan dan usaha peningkatan kinerja ini dilakukan dengan berbagai cara, semata-mata untuk meningkatkan nilai efisiensi sehingga nantinya dapat diterapkan sebagai pembangkit listrik tenaga bayu [4, 5, 6, 7, 8]. Pada kondisi tertentu, usaha peningkatan *performance* turbin angin Savonius dengan rancangan dan geometri yang memungkinkan terjadinya peningkatan efisiensi. Modifikasi dilakukan pada bentuk rotor Savonius konvensional pada kecepatan yang berbeda mulai dari 2 m/s hingga 8 m/s. Efek pada torsi yang dihasilkan diteliti dan dibandingkan dengan rotor Savonius konvensional. Dengan perubahan kecil pada bentuk rotor Savonius konvensional, ternyata ada perubahan drastis dalam pembangkitan daya melalui perhitungan teoritis dan analisa perangkat lunak [9, 10, 11, 12]. Namun demikian, usaha peningkatan *performance* turbin angin Savonius yang dilakukan pada skala laboratorium memiliki keterbatasan karena angin yang diarahkan hanya dari satu arah melalui terowongan angin buatan, namun ini merupakan salah satu cara untuk mencari tahu *performance* turbin angin Savonius.

Sebagai langkah perbaikan terhadap usaha peningkatan *performance* turbin angin Savonius dilakukan perancangan melalui desain dan optimasi turbin angin Savonius sebagai pembangkit listrik [13, 14, 15]. Usaha peningkatan terhadap *performance* turbin angin Savonius tentunya terus dilakukan baik dari desain maupun jumlah sudu rotor. Hal ini dilakukan untuk mencari desain dan jumlah sudu rotor yang dapat menghasilkan *performance* maksimum, sehingga dapat diterapkan menjadi pembangkit listrik tenaga bayu [16, 17, 18, 19].

Beberapa penelitian terdahulu tentang uji keandalan prototipe turbin angin savonius tipe U sebagai pembangkit listrik alternatif [20]; efisiensi prototype turbin angin savonius pada kecepatan angin rendah [21]; analisa dan pengujian kinerja turbin angin savonius 4 sudu [22]; pengaruh jumlah sudu terhadap unjuk kerja turbin angin savonius tipe I [23]; karakteristik turbin angin savonius 2 dan 3 *blade* dengan menggunakan bantuan *guide vane* [24]. Lain halnya dengan desain turbin dalam penelitian ini di mana desain dan dimensinya seperti dalam penerapan yang sesungguhnya, sehingga langsung didapatkan dimensi yang cocok dengan potensi angin pada suatu daerah (dusun Banni Anna) sebagai rujukan tempat pengambilan data. Selain itu, listrik yang dihasilkan dari pembangkit ini dapat disimpan pada baterai sebagai cadangan energi untuk dipakai sebagai penerangan di malam hari atau kebutuhan lainnya.

Penelitian tentang turbin angin Savonius telah banyak dilakukan untuk mencari geometri yang cocok untuk jenis turbin: studi perbandingan rotor savonius tiga sudu dengan rotor gabungan savonius tiga sudu dan darrieus tiga sudu, studi eksperimental turbin angin savonius bilah gabungan dan mengoptimalkan kinerja turbin angin Savonius: analisis pengaruh jumlah bilah [25, 26]. Variasi jumlah sudu rotor pada turbin angin Savonius yakni 2, 3 dan sudu mempengaruhi karakteristik kinerja turbin seperti torsi, kecepatan rotasi dan kestabilan putaran [27].

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan desain dan optimasi turbin Savonius yang disesuaikan dengan karakteristik angin rendah dan tidak stabil di wilayah pedesaan, melalui modifikasi geometri sudu, rasio overlap, serta integrasi sistem transmisi dan generator berdaya rendah yang efisien. Selain itu, penelitian ini menggabungkan analisis kinerja aerodinamis dengan pengujian lapangan berbasis kebutuhan energi lokal, sehingga menghasilkan sistem pembangkit listrik tenaga angin yang tidak hanya optimal secara teknis, tetapi juga aplikatif, berbiaya rendah, dan berkelanjutan untuk mendukung kemandirian energi pedesaan.

2 Metode Penelitian

a. Waktu dan Tempat Kegiatan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 6 bulan dan berlokasi di wilayah pedesaan yakni di Kabupaten Sabu Raijua, Provinsi Nusa Tenggara Timur.

b. Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian ini dimaksudkan untuk menentukan tahapan-tahapan atau proses yang akan ditempuh untuk memecahkan persoalan yang akan diteliti:

- Observasi
Melakukan observasi atau pengamatan langsung terhadap ketersediaan energi listrik dan sumber energi alternatif berupa potensi energi angin di daerah pedesaan yang akan dijadikan sebagai obyek penelitian.
- Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah menjadi langkah krusial agar isu yang diangkat dalam penelitian benar-benar relevan dan tepat sasaran. Proses ini dilakukan dengan mempertimbangkan sejumlah parameter, seperti tingkat ketertarikan topik, manfaat yang dihasilkan, unsur kebaruan, kemudahan pengukuran, kelayakan pelaksanaan, serta kesesuaian dengan prinsip etika penelitian. Dengan demikian, masalah yang ditetapkan dapat memberikan arah penelitian yang jelas dan memiliki nilai kontribusi nyata. Melakukan identifikasi masalah ketersediaan energi listrik bagi masyarakat di daerah terpencil dan mencari solusinya.

- Studi Pustaka

Studi pustaka dilakukan dengan menelusuri berbagai sumber ilmiah yang relevan, seperti buku teks, makalah, dan jurnal penelitian, guna memperoleh dasar teori yang kuat terkait permasalahan dalam penelitian terapan ini. Melalui analisis literatur tersebut, diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif untuk mendukung arah penelitian serta meningkatkan efektivitas dan efisiensi pelaksanaannya. Selain itu, dilakukan studi literatur terhadap konsep atau teori tentang syarat pengembangan pembangkit listrik tenaga angin dan pemilihan jenis turbin angin sesuai dengan kecepatan angin yang ada.

- Perencanaan Alat

Melakukan perencanaan dan pembuatan turbin angin Savonius berupa pembangkit listrik tenaga angin dengan variasi desain dan bentuk sudu terhadap performance turbin angin Savonius dua dan tiga sudu. Perencanaan alat pada penelitian ini difokuskan pada perancangan pembangkit listrik tenaga angin berbasis turbin Savonius yang sederhana, modular, dan sesuai dengan kondisi wilayah pedesaan. Tahapan perencanaan meliputi penentuan dimensi dan geometri sudu turbin, pemilihan material yang mudah diperoleh dan tahan terhadap lingkungan luar, perancangan poros serta sistem transmisi, dan integrasi generator berdaya rendah. Selain itu, direncanakan pemasangan instrumen pengukuran seperti anemometer, tachometer, dan multimeter untuk mengevaluasi kinerja turbin terhadap variasi kecepatan angin, sehingga alat yang dikembangkan dapat diuji secara optimal dan aplikatif sebagai solusi energi berkelanjutan.

- Pembuatan Alat

Setelah tahap perencanaan dan desain ditetapkan sesuai kriteria penelitian, proses selanjutnya adalah pembuatan prototipe turbin angin Savonius sebagai pembangkit listrik tenaga angin dengan beberapa variasi desain dan bentuk sudu. Variasi tersebut difokuskan pada perbandingan kinerja turbin Savonius dua sudu dan tiga sudu untuk menganalisis pengaruh jumlah serta geometri sudu terhadap performa turbin, seperti kecepatan putar, torsi, dan daya yang dihasilkan, sehingga diperoleh konfigurasi turbin yang paling optimal untuk kondisi angin di wilayah pedesaan.

- Pengujian dan Pengambilan Data

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen terkontrol dengan pendekatan semi-lapangan. Pengujian kinerja turbin angin Savonius dilakukan menggunakan blower terkontrol untuk menghasilkan variasi kecepatan angin sebesar 2–6 m/s, yang merepresentasikan rentang kecepatan angin tipikal di wilayah pedesaan Kabupaten Sabu Raijua.

Pengujian dilakukan di area terbuka tanpa halangan signifikan, sehingga aliran udara dari blower dapat berinteraksi langsung dengan rotor turbin. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh kondisi pengujian yang terkontrol sekaligus mendekati kondisi lapangan, sehingga data yang dihasilkan tetap relevan untuk aplikasi di wilayah pedesaan.

- Pengolahan Analisis Data

Melakukan pengolahan dan analisa data, ini dilakukan setelah semua data telah terkumpul. Selanjutnya, data ini dihitung dengan persamaan yang ada, kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik, sehingga berdasarkan kecenderungan pada grafik maka dapat dianalisis dan ditarik sebuah kesimpulan.

- Analisis Data

Analisa data dapat dilakukan setelah mengolah data hasil pengujian dengan persamaan yang ada. Performance turbin angin Savonius ini didasarkan pada beberapa parameter yaitu daya angin (Watt), daya turbin Savonius (Watt), torsi (N.m) dan efisiensi turbin Savonius (%). Analisa data akan dibuat dengan menggunakan program *microsof exel* dalam bentuk tabel dan grafik pada tiap-tiap variasi besar sudut pengarah. Dari grafik tersebut akan terlihat perbedaan pada tiap-tiap

perlakuan sehingga dapat diketahui hubungan sebab akibat dan dapat ditarik beberapa kesimpulannya.

c. Variabel Penelitian

- Variabel Bebas: Kecepatan angin yakni 2, 3, 4, 5 dan 6 m/s serta jumlah sudu rotor yakni 2 dan 3 sudu.
- Variabel Terikat: putaran poros (rpm), torsi (N.m), daya output (Watt) dan efisiensi konversi energi (%).

Beberapa persamaan yang dipakai untuk menghitung kinerja atau performance turbin angin Savonius seperti diperlihatkan di bawah ini:

1. Putaran Poros

Turbin angin Savonius akan berputar ketika ada angin dengan kecepatan tertentu, sehingga putaran poros yang dihasilkan rotor turbin Savonius dapat langsung diukur dengan menggunakan *tachometer digital* ketika rotor berputar.

2. Tip Speed Ratio

Tip speed ratio (rasio kecepatan ujung) adalah perbandingan kecepatan pada ujung rotor terhadap kecepatan udara bebas. *Tip speed ratio* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\pi D n}{60 \cdot v} \dots\dots\dots(1)$$

Di mana: D = diameter rotor (m);

n = putaran poros (rpm);

v = kecepatan aliran udara (m/s).

3. Daya Angin

Daya angin dapat didefinisikan sebagai energi yang dihasilkan per satuan waktu yaitu sebagai berikut:

$P_w = E$ per satuan waktu

$$= \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2)$$

$$= \frac{N \cdot m}{dtk} = \frac{Joule}{dtk} = Watt$$

Di mana:

P_w = daya angin (Watt);

ρ = kerapatan massa udara (kg/m^3);

v = kecepatan aliran udara (m/s);

A = luas penampang (m^2).

4. Brake Horse Power

Brake Horse Power adalah daya dari turbin yang diukur setelah mengalami pembebanan yang disebabkan oleh generator, *gearbox*, pompa ataupun perangkat tambahan lainnya. *Brake* yang dimaksud adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memberikan beban pada turbin sehingga putarannya dapat terjaga secara konstan. Dalam percobaan nantinya BHP diukur dengan menggunakan generator listrik. Dengan mengukur besarnya arus dan tegangan yang dihasilkan, maka dapat mengetahui besarnya daya generator, seperti pada rumus :

$$P_{generator} = V \cdot I \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(3)$$

Di mana: $P_{generator}$ adalah daya generator listrik (Watt),

V adalah tegangan yang dihasilkan oleh generator listrik (Volt),

I adalah kuat arus listrik yang dihasilkan oleh generator listrik (Ampere).

Besarnya *BHP* dapat dihitung setelah didapatkan harga $P_{generator}$ dengan rumus sebagai berikut :

$$BHP = \frac{P_{generator}}{\eta_{generator}} \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (4)$$

Di mana: BHP adalah *brake horse power* (Watt),

$P_{generator}$ adalah daya yang dihasilkan oleh generator listrik (Watt),

$\eta_{generator}$ adalah efisiensi generator (%).

5. Torsi

Torsi biasa disebut juga momen atau gaya yang menyatakan benda berputar pada suatu sumbu. Torsi juga bisa didefinisikan ukuran keefektifan gaya tersebut dalam menghasilkan putaran atau rotasi mengelilingi sumbu tersebut. Besar torsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$T = \frac{P_{generator}}{2 \pi \frac{n_{generator}}{60}} \dots\dots\dots (5)$$

Di mana: T adalah torsi (N.m),

$P_{generator}$ adalah daya yang dihasilkan oleh generator listrik (Watt),

$n_{generator}$ adalah putaran generator (rpm).

6. Efisiensi

Untuk menyatakan performansi suatu mesin biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara efek manfaat yang digunakan dengan pengorbanan yang dilakukan. Rumus efisiensi adalah sebagai berikut :

$$\eta = \frac{BHP}{P_w} \times 100 \% \dots\dots\dots (5)$$

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Turbin angin Savonius yang dirancang memiliki diameter 1 m, tinggi 2 m, dan tiga sudu berbentuk setengah silinder. Desain ini dipilih karena mampu berputar pada kecepatan angin rendah (*low wind speed*) dan tidak membutuhkan sistem pengarah angin (*yaw system*). Uji coba dilakukan pada variasi kecepatan angin 2–6 m/s menggunakan blower terkontrol untuk mensimulasikan kondisi angin di lapangan. Pengujian difokuskan pada parameter putaran poros (rpm), tegangan (V), arus (A), dan daya keluaran (W) yang dihasilkan oleh rotor dan generator DC yang terhubung ke sistem turbin.

Adapun hasil penelitian yang diperoleh dari hasil pengukuran terkait judul rancang bangun pembangkit listrik tenaga bayu dengan menggunakan turbin angin Savonius untuk mengatasi ketiadaan energi listrik di daerah pedesaan seperti disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Data hasil pengujian kecepatan angin terhadap putaran poros

Kecepatan Angin	Putaran poros rotor 2 sudu	Putaran poros rotor 3 sudu
(m/s)	rpm	rpm
2	110	120
3	160	180
4	220	250
5	280	380
6	346	395

Tabel 1 merupakan data hasil pengujian kecepatan angina terhadap besarnya putaran poros rotor baik pada turbin dengan rotor 2 sudu maupun 3 sudu. Di sini terlihat rotor 3 sudu dapat menghasilkan putaran poros lebih tinggi pada setiap kecepatan angin yang diberikan. Hal ini terjadi karena jumlah massa udara yang diterima rotor 3 sudu lebih besar jika dibandingkan dengan rotor 2 sudu. Pengujian selanjutnya dilakukan pada turbin angin Savonius 2 dan 3 sudu dengan variasi kecepatan angin antara 2 m/s hingga 6 m/s di lingkungan terbuka yang mewakili kondisi tipikal di daerah pedesaan Indonesia. Parameter yang diukur adalah tegangan (V), arus (A), dan daya listrik (W) yang dihasilkan generator DC, serta efisiensi konversi energi (%).

Tabel 2. Data hasil pengujian kecepatan angin terhadap daya output dan efisiensi pada rotor 2 sudu

Kecepatan Angin	Tegangan	Arus	Daya Ouput	Ef. Konversi Energi
(m/s)	(V)	(A)	(W)	(%)
2	26	0.4	1.40	35.5
3	49	0.7	33.3	48.7
4	75	1.1	82.5	56.8
5	98	1.4	137.2	61.4
6	112	1.6	179.2	59.2

Tabel 2 merupakan data hasil pengujian tegangan listrik (V), kuat arus listrik (A), daya output (W) dan efisiensi konversi energi (%) dari rotor 2 sudu. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi kecepatan angina, di mana tegangan, arus dan daya yang dihasilkan terlihat mengalami peningkatan secara linear seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang diatur.

Tabel 3. Data hasil pengujian kecepatan angin terhadap daya output dan efisiensi pada rotor 3 sudu

Kecepatan Angin	Tegangan	Arus	Daya Ouput	Ef. Konversi Energi
(m/s)	(V)	(A)	(W)	(%)
2	32	0.05	16	42.5
3	58	0.9	52.2	55.2
4	89	1.2	106.8	63.7
5	113	1.6	180.8	68.4
6	136	1.8	244.8	65.9

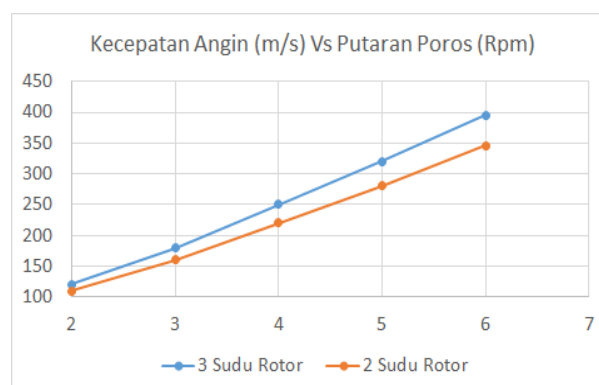
Tabel 3 merupakan data hasil pengujian tegangan listrik (V), kuat arus listrik (A), daya output (W) dan efisiensi konversi energi (%) dari rotor 3 sudu. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi kecepatan angina, di mana tegangan, arus dan daya yang dihasilkan terlihat mengalami peningkatan secara linear seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang diatur. Dari tabel 2 dan 3 juga terlihat bahwa pada setiap variabel kecepatan angin, hasil pengujian tegangan, kuat arus, output daya dan efisiensi terlihat pada rotor 3 sudu menghasilkan nilai output yang lebih besar jika dibandingkan dengan rotor 2 sudu.

3.2 Pembahasan

Ada beberapa variabel terikat yang menjadi indikator penting terkait kinerja dari desain turbin angina Savonius 2 dan 3 sudu rotor yang dibuat untuk desa terpencil yakni :

a. Hubungan antara kecepatan angin terhadap putaran poros

Putaran yang dihasilkan oleh poros turbin angin Savonius sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin yang mengenainya.



Gambar 1. Grafik kecepatan angin vs putaran poros

Berdasarkan grafik hasil pengujian, terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan angin (m/s), maka semakin besar pula putaran poros rotor (RPM). Hubungan ini menunjukkan kecenderungan linear positif, terutama pada rentang kecepatan angin rendah hingga sedang, di mana peningkatan kecepatan angin secara langsung meningkatkan energi kinetik yang mengenai bilah turbin. Fenomena ini terjadi karena ketika kecepatan angin meningkat, massa udara yang melewati bidang sapuan rotor per satuan waktu juga bertambah. Akibatnya, gaya

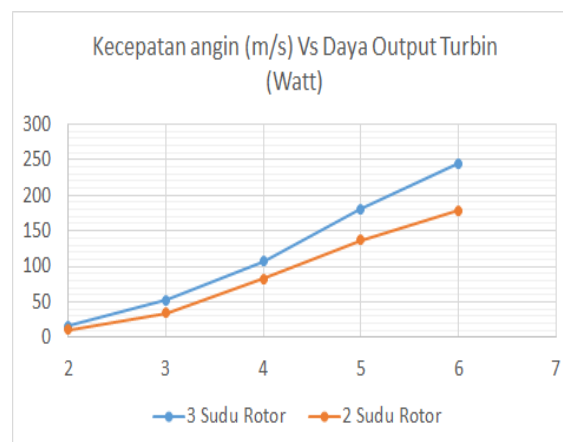
dorong (gaya hambat) yang bekerja pada bilah turbin menjadi lebih besar. Dorongan ini menghasilkan torsi dan momen puntir yang lebih tinggi, sehingga poros rotor berputar dengan kecepatan yang semakin meningkat.

Selain itu, peningkatan kecepatan angin tidak hanya menambah jumlah energi kinetik yang tersedia, tetapi juga meningkatkan tekanan dinamis pada permukaan bilah. Hal ini menyebabkan perbedaan tekanan antara sisi bilah yang menerima angin langsung dan sisi yang membelakangi angin menjadi semakin besar, sehingga gaya pendorong bersih yang memutar rotor semakin kuat. Namun demikian, pada kecepatan angin yang sangat tinggi, hubungan ini dapat mulai menyimpang dari linearitas. Hal tersebut disebabkan oleh kerugian aerodinamis seperti turbulensi aliran udara, peningkatan gaya hambat, serta keterbatasan efisiensi aerodinamis bilah. Selain itu, faktor mekanis seperti gesekan pada poros dan beban generator juga dapat membatasi peningkatan kecepatan putar maksimum yang dapat dicapai.

Dari gambar grafik di atas juga terlihat bahwa rotor 3 sudu dapat menghasilkan putaran poros yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan rotor 2 sudu. Perbedaan putaran poros antara rotor 2 sudu dan 3 sudu bukan disebabkan oleh perbedaan massa udara yang melewati area sapuan rotor, melainkan oleh perbedaan interaksi aerodinamis antara aliran udara dan permukaan sudu. Penambahan jumlah sudu pada rotor Savonius meningkatkan frekuensi interaksi drag antara bilah dan aliran udara, serta memperbaiki kontinuitas gaya dorong selama satu siklus putaran. Akibatnya, rotor 3 sudu cenderung menghasilkan putaran yang lebih stabil dan nilai rpm yang lebih tinggi dibandingkan rotor 2 sudu pada kecepatan angin yang sama. Selain itu, dari gambar grafik juga terlihat bahwa putaran poros terus mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin yang diberikan.

b. Hubungan antara kecepatan angin terhadap daya output

Dari gambar 2 yakni grafik kecepatan angin terhadap daya output terlihat bahwa daya output meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan angin, hingga mencapai puncaknya pada 5 m/s dengan daya 180,8 W dengan efisiensi sebesar 68,4%. Setelah melewati titik ini, efisiensi sedikit menurun akibat meningkatnya turbulensi dan rugi gesekan mekanis pada poros serta bantalan turbin. Pola ini menggambarkan bahwa turbin Savonius bekerja optimal pada kecepatan angin menengah, sesuai dengan karakteristik daerah pedesaan Indonesia yang rata-rata memiliki kecepatan angin 3–5 m/s.

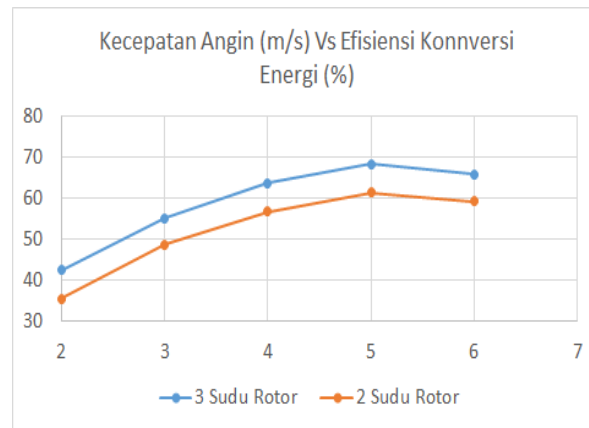


Gambar 2. Grafik kecepatan angin vs daya output

Namun pada pengujian turbin angin Savonius 2 sudu terlihat bahwa peningkatan kecepatan angin memberikan efek langsung terhadap peningkatan daya keluaran turbin, karena energi kinetik angin berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan angin ($P \propto v^3$). Namun, pada kecepatan di atas 5 m/s, efisiensi mengalami sedikit penurunan akibat turbulensi udara dan rugi mekanis pada poros serta bantalan. Turbin dua sudu ini menunjukkan performa optimal di rentang kecepatan 3–5 m/s, yang cocok dengan kondisi angin di daerah pedesaan pesisir dan dataran rendah Indonesia.

c. Hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi konversi energi

Selanjutnya untuk melihat efisiensi konversi energi pada pembangkit listrik tenaga angin adalah dengan cara melihat seberapa besar energi kinetik dari angin yang dapat diubah menjadi energi listrik oleh sistem turbin dan generator. Secara umum, efisiensi ini menggambarkan seberapa efektif seluruh komponen PLTB (turbin, poros, transmisi, generator, dan sistem kontrol) bekerja dalam memanfaatkan energi angin. Di bawah ini diperlihatkan grafik hubungan antara kecepatan dengan efisiensi konversi energi kedua desain turbin angin baik yang menggunakan 3 sudu maupun yang menggunakan 2 sudu rotor yakni:



Gambar 3. Grafik kecepatan angin vs efisiensi konversi energi

Berdasarkan gambar 3 yakni grafik kecepatan angin terhadap efisiensi konversi energi terlihat bahwa peningkatan efisiensi secara parabolik di mana pada kecepatan angin 2 hingga 4 m/s peningkatannya masih secara linear, namun pada kecepatan 5 dan 6 m/s cenderung mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena terjadi turbulensi yang tinggi dan kerugian mekanik, sehingga energi angin tidak dapat dikonversi secara maksimal. Selain itu, Turbin angin Savonius 3 sudu terlihat bahwa output daya meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan angin, hingga mencapai puncaknya pada 5 m/s dengan daya 180.8 W dan efisiensi 68,4%. Pemilihan bahan seperti aluminium untuk sudu dan poros terbukti menekan biaya produksi hingga 40% lebih hemat dibandingkan turbin komersial sejenis atau penelitian lainnya. Selain ringan, bahan ini tahan terhadap korosi, sehingga cocok untuk lingkungan tropis lembab. Sistem transmisi langsung antara poros turbin dan generator DC memberikan keunggulan efisiensi mekanik, namun pada kecepatan angin tinggi, sistem ini memerlukan penambahan gear reduction atau sistem kontrol kecepatan untuk menjaga kestabilan tegangan output.

Desain dua sudu terbukti mampu menghasilkan torsi awal yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi tiga sudu, meskipun daya puncak yang dihasilkan sedikit lebih kecil. Keunggulan lain dari turbin dua sudu adalah berat struktur yang lebih ringan, biaya material lebih rendah, dan kemudahan dalam proses perakitan dan perawatan. Namun demikian, dari grafik juga terlihat bahwa turbin Savonius 3 sudu dapat menghasilkan efisiensi konversi energi lebih tinggi, jika dibandingkan dengan turbin Savonius 2 sudu pada berbagai variasi kecepatan angin, hal ini terjadi karena turbin 3 sudu memiliki luasan tangkapan angin yang lebih luas, sehingga cenderung unggul dalam hal output daya turbin dan efisiensi yang dihasilkan.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu maka desain turbin angina ini dapat menghasilkan efisiensi konversi energi yang cukup tinggi yakni 68.4 %, ini membuktikan bahwa desain turbin angin khususnya yang menggunakan 3 sudu ini dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi pada kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi yakni pada kecepatan angina 5 m/s. Selain itu, pemilihan bahan dari sudu rotor berupa aluminium juga menjadi kunci utama, karena memiliki keunggulan yakni ringan dan tahan terhadap cuaca yang ekstrim sehingga tidak mudah rusak dan berkarat.

4 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat ditarik dari pembahasan di atas yakni :

1. Turbin angin Savonius 3 sudu terlihat bahwa output daya meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan angin, hingga mencapai puncaknya pada 5 m/s dengan daya 180.8 W dan efisiensi 68,4%. Setelah melewati titik ini, efisiensi sedikit menurun akibat meningkatnya turbulensi dan rugi gesekan mekanis pada poros serta bantalan turbin.
2. Pada pengujian turbin angin Savonius 2 sudu terlihat bahwa peningkatan kecepatan angin memberikan efek langsung terhadap peningkatan daya keluaran turbin, karena energi kinetik angin berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan angin ($P \propto v^3$). Namun, pada kecepatan di atas 5 m/s, efisiensi mengalami sedikit penurunan akibat turbulensi udara dan rugi mekanis pada poros serta bantalan.

5 Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini peneliti ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang sangat berperan dalam riset dan penelitian ini yakni :

1. Bapak Prof. Dr. Deddy Lasfeto, ST.,MT, selaku Kepala Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Politeknik Negeri Kupang, atas dukungan dan fasilitasi yang diberikan sehingga penelitian dosen pemula ini dapat terlaksana.
2. Bapak I Ketut Adnyana, selaku Direktur Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan atas dukungan pendanaan yang memungkinkan pelaksanaan penelitian dosen pemula ini.
3. Bapak/Ibu Teknisi Laboratorium dan petugas lapangan atas kontribusi dan dukungannya dalam penyelesaian riset dan pengembangan ini.
4. Teman-teman sejawat yang telah memberikan usul dan saran terkait pelaksanaan riset dan pengembangan ini.

6 Referensi

- [1] Hand, B, Kelly, G., dan Cashman A., 2021. Aerodynamic design and performance parameters of a lift-type vertical axis wind turbine : A comprehensive review. *Renewable and sustainable Energy Reviews*. Volume 139, April 2021, 110699. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110699>.
- [2] Noman, A. A. et al., 2022. Towards next generation Savonius wind turbine : Artificial intelligence in blade design trends and framework. *Renewable and sustainable Energy Reviews*. Volume 168, October 2022, 112531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112531>.
- [3] Tasneem, Z. et al., 2020. An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges. *Developments in the Built Enviroment*. Volume 4, Vovember 2020, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100033>.
- [4] Saad, A. S. et al., 2020. Performance enhancement of twisted-blade Savonius vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*. Volume 209, 1 April 2020, 112673. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112673>.
- [5] Prabowoputra, D. M dan Prabowo, A. R. (2022). Effect of the Phase-Shift Angle on the vertical axis Savonius turbine performance as a renewable-energy harvesting instrument. *Energy Reports*. Volume 8, Supplement 9, November 2022, pages 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.eryr.2022.06.092>.
- [6] Tores, S et al., 2020. Geometric design optimization of a Savonius wind turbine. *Energy Conversion and Management*. Volume 262, 15 June 2022, 115679. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115679>.
- [7] Antar, E dan Elkhoury, M. (2019). Casing optimization of a Savonius wind turbine. *Eneyg Reports*. Volume 6, Suplement 1, February 2020, pages 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.040>.
- [8] Cuevas-Carvajal, N. et al., 2022. Effect of geometrical parameters on the performance of conventional Savonius VAWT: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. 161, 112314.
- [9] Ahire, V. V. et al., 2014. Optimization of Savonius Rotor Wind Turbine. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Sept.,ISSN : 22311963.
- [10] Roy, S., dan Saha, U. K. (2013). Review of experimental investigations into the design, performance and optimization of the Savonius rotor. *Procedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A Journal of Power and Energy*, 227(4). 528-542.
- [11] Mohamed, M. H. et al., 2010. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. *Renewable Energy*, 35(11), 2618-2626.
- [12] Roy, S. et al., 2018. An inverse method for optimization of geometric parameters of a Savonius-stile wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 155, 116-127.
- [13] Baz, A. M. et al., 2015. Optimization of two and three rotor Savonius wind turbine. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air* (Vol. 56802, p. V009T4A026). American Society of Mechanical Engineers.
- [14] Engineers Altmimi, A. I. et al., 2021. Design and optimization of vertical axis wind turbine using Q Blabe. *Applied System Innovation*, 4(4), 74.
- [15] Ananda, M. R. (2024). Optimization Savonius Wind Turbine Performance: Analysis of Blade Number's Influence. *Jurnal Mekintek: Jurnal Mekanikal, Energi, Industri dan Teknologi*, 15(1), 19-26.
- [16] Alom, N dan Saha, U. K. (2019). Evolution and progress in the development of Savonius wind turbine

- rotor blade profiles and shapes. *Journal of Solar Energy Engineering*. 14(30), 030801.
- [17] Chan, C. M., et al., 2018. Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm. *Applied Energy*. 213, 148-157.
- [18] AR, S. M. et al., 2019. Performance evolution of Savonius wind turbine based on a new design of blade shape. *Int. J. Mech. Eng. Technol*, 10(01), 837-846.
- [19] Saeed, H. A. H. et al., 2019. Numerical study of improving Savonius turbine power coefficient by various blade shapes. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 429-441.
- [20] Siregar, A. M dan Lubis, F. 2019. Uji Keandalan Prototype Turbin Angin Savonius Tipe U Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif. *Jurnal Mekanik*, 5(1), 329186.
- [21] Latif, M. 2013. Efisiensi Prototype Turbin Angin Savonius Pada Kecepatan Angin Rendah. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 10(3), 147-152.
- [22] Tuapetel, J. V. et al., 2019. Analisa dan Pengujian KInerja Turbin Angin Savonius 4 Sudu. *Jurnal Teknik Mesin ITI*, 3(2),46.
- [23] Mahendra, B. et al., 2013. Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius Type I. *Jurnal Teknik Mesin*, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.
- [24] Fitrandi, R. I., 2014. Karakteristik Turbin Angin Savonius 2 dan 3 Blade Dengan Menggunakan Bantuan Guide Vane. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(02).
- [25] Gupta, R. et al., 2008. Comparativ study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius-three-bladed Darreeus rotor. *Renewable Energy*, 33(9), 1974-1981.
- [26] Sanusi, A. et al., 2016. Experimental study of combined blade Savonius wind turbine. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 6(2), 614-619.
- [27] Hassanzadeh, R. et al., 2021. Comparison of Various blade profiles in a two-blade convetional Savonius Wind turbine. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(2), 021301.