DESAIN TURBIN ANGIN VERTIKAL SAVONIUS 2 SUDU S-HELIKS DENGAN KECEPATAN ANGIN RENDAH DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA

[1]*Wendi Suryana, , [2]Eva Magdalena Silalahi,[3]Stepanus*
[1,2,3]*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia*
[1,2,3]*Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang, Jakarta Timur 13630, DKI Jakarta*
[2]eva.silalahi@uki.ac.id, [3]stepanus@uki.ac.id,
[1]**Corresponding author*: wendisuryana08@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengujian turbin angin sumbu vertikal Savonius 2 sudu tipe S-Heliks yang ditujukan untuk kondisi kecepatan angin rendah di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia. Tujuan utama adalah menghasilkan prototipe yang mampu mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik dengan target daya 5 W menggunakan generator Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). Metode penelitian mencakup perancangan mekanik turbin, pemilihan material sudu polypropylene (PP), integrasi sistem konversi energi, serta pengujian eksperimental dengan variasi kecepatan angin 0,31–5,65 m/s. Hasil pengujian menunjukkan turbin mulai beroperasi pada cut-in speed sekitar 1,7–2 m/s, dengan daya keluaran maksimum ±2 W pada kecepatan 4–5 m/s, sehingga belum mencapai target desain. Peningkatan kecepatan angin dari 2–5 m/s meningkatkan putaran rotor dari 100 RPM menjadi lebih dari 200 RPM, dengan tegangan keluaran relatif stabil pada kisaran 6–8 Volt. Nilai Tip Speed Ratio (TSR) berada pada rentang 0,5–1,9 dengan performa optimal pada 4 m/s, sedangkan koefisien daya (Cp) berkisar 0,2–0,6. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan potensi turbin Savonius S-Heliks sebagai pembangkit listrik tenaga bayu di lingkungan perkotaan berkecepatan angin rendah, sekaligus menjadi dasar untuk optimasi desain dan peningkatan efisiensi sistem pada penelitian berikutnya.

***Kata kunci**: Turbin Savonius, S-Heliks, VAWT, PLTB.*

Abstract

This research focuses on the design and testing of a vertical axis wind turbine (VAWT) Savonius type with two blades in an S-Helix configuration, intended to operate under low wind speed conditions at the Faculty of Engineering, Universitas Kristen Indonesia. The primary objective is to develop a prototype capable of converting wind kinetic energy into electrical energy with a target output of 5 W using a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). The methodology includes mechanical design of the turbine, selection of polypropylene (PP) blades, integration of the energy conversion system, and experimental testing with wind speed variations ranging from 0.31 to 5.65 m/s. The experimental results indicate that the prototype begins operation at a cut-in speed of approximately 1.7–2 m/s, with maximum output power reaching ±2 W at wind speeds of 4–5 m/s, which falls short of the design target. Increasing wind speed from 2–5 m/s raises rotor speed from 100 RPM to over 200 RPM, while output voltage remains relatively stable between 6–8 V. The Tip Speed Ratio (TSR) ranges from 0.5–1.9, with optimal performance at 4 m/s, and the power coefficient (Cp) varies between 0.2–0.6. Overall, the study demonstrates that the Savonius S-Helix turbine has potential as an urban wind energy generator under low wind conditions, providing a foundation for future design optimization and efficiency improvements.

***Keywords**: Savonius Turbine, S-Helix, VAWT, PLTB.*

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental dalam kehidupan modern dan berperan penting dalam mendukung aktivitas rumah tangga, pendidikan, industri, maupun pelayanan publik. Di Indonesia, konsumsi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi, sehingga kebutuhan energi di masa depan diproyeksikan semakin besar (ANTARA News, 2024; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), 2023). Namun, sebagian besar pembangkitan energi listrik masih bergantung pada sumber fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam, yang menimbulkan keterbatasan cadangan serta dampak lingkungan berupa emisi karbon (Larassita Damayanti, 2025). Oleh karena itu, pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) menjadi langkah strategis dalam transisi energi menuju target Net Zero Emission.

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang besar, termasuk energi surya, air, panas bumi, biomassa, dan angin (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2024). Sayangnya, pemanfaatan energi terbarukan masih belum optimal dibandingkan dengan potensi yang tersedia (Lathifah et al., 2023). Energi angin, khususnya, memiliki peluang besar untuk dikembangkan pada lokasi dengan karakteristik kecepatan angin memadai (Swardika, 2019). Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia (FT UKI) memiliki potensi angin rata-rata sekitar 5 m/s pada ketinggian 50 meter, yang termasuk kategori rendah hingga menengah. Kondisi ini kurang optimal untuk turbin angin sumbu horizontal konvensional (Witono Hardi et al., 2024), sehingga diperlukan turbin yang efektif pada kecepatan rendah dan tidak bergantung pada arah angin.

Perancangan turbin angin vertical Savonius pada gedung bertingkat menjadi salah satu solusi pemanfaatan energi terbarukan di Jakarta, melengkapi studi sistem PLTB *off-grid* yang telah dilakukan sebelumnya di wilayah regional Jakarta (Jonsen et al., 2024). Selain berfokus pada desain mekanis turbin angin Savonius, karakteristik performa daya yang dihasilkan juga dapat diproyeksikan melalui pendekatan simulasi perangkat lunak (Yosep Cristian et al., 2024).

Turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius menjadi solusi yang sesuai. Turbin ini berbasis gaya hambat (drag force), memiliki kemampuan self-starting yang baik, serta dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah (Riza Jaka Ariazena et al., 2021). Penelitian ini difokuskan pada pencapaian daya keluaran maksimum sebesar 5 W sebagai parameter evaluasi kinerja sistem. Secara konstruksi, turbin Savonius sederhana, tidak memerlukan mekanisme pengarah angin, serta mudah dalam instalasi dan perawatan (Marchelino Siboro et al., 2025). Prinsip kerjanya adalah memanfaatkan perbedaan gaya hambat pada dua sisi sudu sehingga menghasilkan putaran rotor yang dikonversi menjadi energi listrik melalui generator (Harianto & Mochamad Karjadi, 2024).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi performa turbin Savonius. Satriatama dkk. (2025) melakukan simulasi aerodinamika menggunakan CFD dan memperoleh koefisien daya maksimum 0,27 setelah optimasi geometri sudu (Calvin Yudees Satriatama et al., 2025). Arqam dkk. (2025) merancang turbin Savonius heliks untuk meningkatkan kestabilan torsi pada kecepatan rendah, meskipun penelitian

masih terbatas pada analisis teoritis (Muh. Azhami Arqam, 2025). Prabowo dkk. (2023) menguji variasi jumlah sudu dan sudut *twist rotor*, menemukan bahwa konfigurasi tiga sudu dengan sudut 180° menghasilkan cut-in speed 1,51 m/s (Prabowo et al., 2023). Butar-Butar dkk. (2021) menegaskan bahwa kecepatan angin dan posisi baling-baling lebih berpengaruh terhadap daya dibanding jumlah sudu (Ivander Butar-Butar et al., 2021).

Meskipun hasil penelitian tersebut menunjukkan potensi turbin Savonius, sebagian besar masih berfokus pada optimasi desain umum dan pengujian laboratorium. Penelitian berbasis lokasi nyata, khususnya di lingkungan perkotaan, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan pada rancang bangun dan pengujian langsung di Gedung Fakultas Teknik UKI, yang memiliki kecepatan angin rata-rata 0,31 m/s dan maksimum 5,65 m/s dengan rata rata 2,91 m/s berdasarkan data NASA Power (NASA POWER, 2026).

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh data karakteristik putaran rotor dan daya keluaran turbin pada kondisi angin nyata sebagai dasar pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga bayu skala kecil dengan judul: "Desain Turbin Angin Vertikal Savonius 2 Sudu Tipe S-Heliks dengan Beban 5 W pada Kecepatan Angin Rendah di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia".

KERANGKA TEORI

A. Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari pergerakan massa udara akibat perbedaan tekanan dan temperatur di atmosfer. Energi kinetik yang dimiliki angin dapat dimanfaatkan dan dikonversi menjadi energi mekanik melalui turbin angin, kemudian diubah menjadi energi listrik menggunakan generator. Pemanfaatan energi angin terus berkembang karena bersifat ramah lingkungan, tersedia secara alami, dan tidak menghasilkan emisi gas buang selama proses pembangkitan energi (Mukhrijal, 2021).

$$P_w = \frac{1}{2}\rho A v^3 \qquad (1)$$

dimana:

P_w = Daya angin (W)

ρ = Densitas udara (ρ = 1,184 kg/m^3)

A = Luas penampang turbin (m^2)

v = Kecepatan angin (m/s)

B. Turbin Angin

Turbin angin merupakan perangkat yang digunakan untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik berupa putaran rotor, yang selanjutnya dikonversikan menjadi energi listrik melalui generator. Pada masa awal perkembangannya, turbin angin dimanfaatkan untuk kebutuhan mekanis seperti penggilingan biji-bijian, pemompaan air, serta irigasi pertanian. Seiring berkembangnya teknologi energi terbarukan, turbin angin kini lebih diarahkan pada pembangkitan energi listrik sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Berdasarkan orientasi sumbu rotornya, turbin angin dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu:

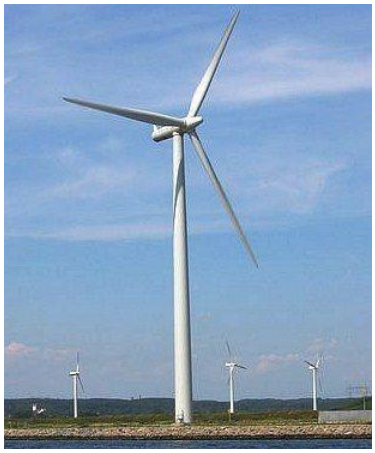
i. Turbin Angin Sumbu Horizontal (HAWT)

Turbin angin sumbu horizontal memiliki poros rotor sejajar dengan arah aliran angin. Jenis ini merupakan teknologi yang paling banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin skala besar. Sudu turbin HAWT biasanya berbentuk *airfoil* menyerupai sayap pesawat, sehingga menghasilkan gaya

angkat (*lift force*) yang menyebabkan rotor berputar.

Keunggulan HAWT:
a. Efisiensi tinggi pada kecepatan angin sedang hingga tinggi.
b. Cocok untuk pembangkit listrik skala besar di daerah terbuka (pesisir, dataran tinggi).

Kelemahan HAWT:
a. Membutuhkan sistem pengarah angin.
b. Kurang optimal pada kecepatan angin rendah.



Gambar 2.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

ii. Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)

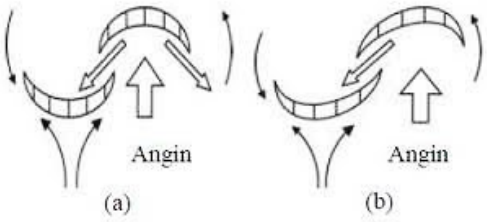
Turbin angin sumbu vertikal memiliki poros rotor tegak lurus terhadap permukaan tanah. Keunggulan utama VAWT adalah kemampuannya menerima angin dari berbagai arah tanpa memerlukan sistem pengarah. Posisi generator dapat ditempatkan di bagian bawah, sehingga memudahkan instalasi dan perawatan.

Jenis VAWT:
a. Turbin Darrieus: menggunakan sudu melengkung yang berputar mengelilingi poros vertikal, bekerja dengan gaya angkat. Efisiensinya tinggi, tetapi membutuhkan kecepatan angin awal yang besar.



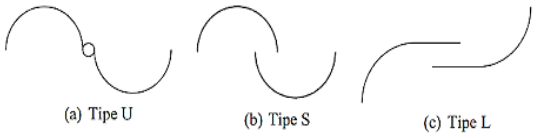
Gambar 2.2 Turbin Angin Darrieus

b. Turbin Savonius: bekerja berdasarkan gaya hambat (*drag force*), dengan rotor berbentuk huruf "S". Keunggulannya adalah konstruksi sederhana, kemampuan self-starting, dan cocok untuk kecepatan angin rendah.



Gambar 2.3 Tipe Turbin Savonius

Dalam perkembangannya, turbin Savonius memiliki beberapa variasi desain rotor:
a. Savonius tipe U: konstruksi kuat karena sudu terpusat pada poros utama, namun efisiensinya relatif rendah.
b. Savonius tipe S: desain paling sederhana, mudah dirancang, dan sedikit lebih efisien dibanding tipe U.
c. Savonius tipe L: efisiensi lebih baik karena mampu memanfaatkan aliran udara secara lebih efektif.



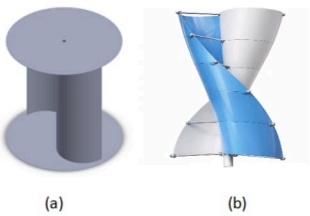
Gambar 2.4 Tipe Rotor Savonius (U, S, L)

Turbin angin sumbu vertikal memiliki keunggulan berupa konstruksi sederhana, tingkat kebisingan rendah, kemampuan bekerja pada kondisi turbulen, serta dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah. Oleh karena itu, VAWT banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga bayu skala kecil di lingkungan perkotaan.

C. Savonius S-Heliks

Turbin Savonius S-Heliks merupakan salah satu pengembangan dari turbin Savonius konvensional yang memiliki sudu diputar secara spiral sepanjang tinggi rotor. Desain heliks bertujuan meningkatkan kestabilan putaran rotor serta mengurangi fluktuasi torsi yang sering terjadi pada turbin Savonius dengan sudu lurus. Dengan konfigurasi spiral, aliran angin mengenai permukaan sudu secara bertahap sepanjang rotor sehingga distribusi gaya lebih merata. Kondisi ini menghasilkan putaran yang lebih stabil dan meningkatkan performa turbin terutama pada kecepatan angin rendah dan aliran turbulen.

Oleh karena itu, turbin Savonius S-Heliks banyak digunakan dalam penelitian pengembangan turbin angin skala kecil, khususnya pada aplikasi pembangkit listrik tenaga bayu di lingkungan perkotaan.



Gambar 2.5 (a) Savonius Konvensional dan (b) Savonius Heliks

D. Bagian Turbin Angin Savonius

Turbin Savonius terdiri dari beberapa komponen utama yang berfungsi mendukung proses konversi energi angin menjadi energi listrik. Putaran sudu akibat aliran angin diteruskan ke poros, kemudian ke generator, sehingga menghasilkan energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Bagian-bagian tersebut meliputi:

i. Sudu (Baling-Baling)
   Sudu berfungsi menangkap energi kinetik angin dan mengubahnya menjadi energi mekanik berupa putaran rotor. Ketika angin mengenai permukaan sudu, timbul gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*) yang menyebabkan rotor berputar. Pada penelitian ini sudu dirancang menggunakan material *polypropylene* (PP) karena ringan, mudah dibentuk, ekonomis, serta cukup tahan terhadap kondisi lingkungan luar.



Gambar 2.6 Sudu (*Blade*)

ii. Poros
   Poros berfungsi meneruskan putaran rotor menuju generator. Material yang digunakan adalah baja karbon (*carbon steel*) dengan kekuatan tarik >58 kg/mm², sehingga mampu menahan beban puntir dan lentur akibat gaya angin.

iii. Rangka Penyangga

Rangka penyangga menopang seluruh komponen turbin (rotor, poros, generator) dan menjaga kestabilan sistem selama beroperasi. Dimensi rangka pada prototipe adalah 40 cm × 30 cm × 50 cm, disesuaikan agar mampu menopang beban rotor dan generator tanpa deformasi berlebih.



Gambar 2.7 Rangka Penyangga

iv. Bearing

Bearing berfungsi mengurangi gesekan pada poros sehingga rotor dapat berputar lebih halus dan efisien. Komponen ini juga menopang beban poros agar sistem bekerja optimal pada kecepatan angin rendah.



Gambar 2.8 *Bearing*

E. Parameter Kinerja Turbin Angin

Kinerja turbin angin dapat dianalisis melalui beberapa parameter penting yang menunjukkan efektivitas turbin dalam mengubah energi angin menjadi energi mekanik maupun energi listrik. Berikut ini parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performa turbin serta menentukan desain yang optimal:

i. Koefisien Daya Turbin (Cp)

Rumus ini mengukur seberapa efektif turbin mengekstraksi energi dari angin menjadi daya mekanik (F. Sigernes, 2013), (Raj Kamal et al., 2017).

$$C_p = \frac{P_{mekanik}}{P_{angin}} = \frac{P_{mekanik}}{\frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3} \quad (2)$$

dimana:

$P_{mekanik}$: Daya pada poros (Torsi × Kecepatan Sudut).

ρ : Massa jenis udara ($\approx 1,184\ kg/m^3$).

A : Luas sapuan turbin ($D \times H$).

ν : Kecepatan angin (m/s).

ii. *Tip Speed Ratio* (TSR)

Penting untuk dianalisis guna melihat apakah turbin berputar pada rasio yang optimal (target λ≈0,8) (Ucok Mulyo Sugeng et al., 2023).

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{v} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60})R}{v} \quad (3)$$

Keterangan:

n : Putaran rotor (RPM).

RPM : Kecepatan putaran turbin

iii. Simpangan Baku

Perhitungan simpangan baku digunakan untuk menggambarkan penyebaran data terhadap nilai rata-rata. Menurut *Karl Person*, nilai ini dinyatakan dengan rumus.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental. Data yang dikumpulkan meliputi kecepatan angin, putaran rotor (RPM), tegangan keluaran, arus listrik, serta daya listrik yang dihasilkan oleh prototipe turbin Savonius S-Heliks. Pengukuran dilakukan secara langsung di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia (UKI) pada ketinggian ±12 meter.

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia (UKI), Jakarta Timur, pada ketinggian ±12 meter dari permukaan tanah. Lokasi ini dipilih karena memiliki potensi angin dengan kecepatan rata-rata 3,23 m/s berdasarkan data NASA POWER. Waktu penelitian dilaksanakan pada periode Januari–Maret 2026, dengan pengambilan data primer berupa kecepatan angin, putaran rotor, dan daya keluaran turbin.

B. Tahapan Detail Metodologi

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari studi literatur hingga pengujian prototipe. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang meliputi:

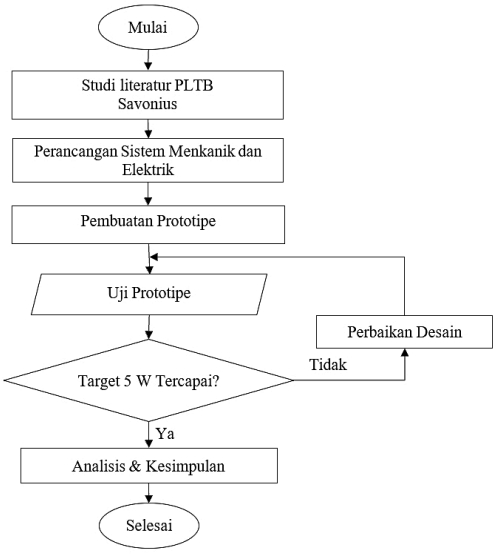
i. Tahap Perancangan:
Menghitung diameter dan tinggi turbin Savonius 2 sudu S-Heliks serta pemilihan material.

ii. Tahap Fabrikasi:
Meliputi proses fabrikasi sudu heliks, perakitan poros, rangka penyangga, dan integrasi dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG).

iii. Tahap Pengujian:
Pengujian prototipe di atap Gedung Fakultas Teknik UKI pada ketinggian ±12 meter, yang terdiri atas uji tanpa beban untuk mengukur tegangan keluaran generator pada variasi kecepatan angin, serta uji berbeban menggunakan beban resistif untuk memperoleh data tegangan, arus, dan daya listrik.

iv. Parameter Pengukuran:
Parameter yang diukur meliputi kecepatan angin, putaran rotor (RPM), tegangan keluaran (Volt), arus listrik (Ampere), serta daya listrik (Watt).

v. Teknik Analisis Data:
Data dianalisis menggunakan parameter kinerja turbin, yaitu *Tip Speed Ratio* (TSR), Koefisien Daya (Cp), dan Efisiensi Sistem Total.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

C. Alat dan Bahan

i. Anemometer: mengukur kecepatan angin secara real-time.



Gambar 3.2 Anemometer

ii. Tachometer: mengukur putaran poros per menit (RPM).



Gambar 3.3 Tachometer

iii. Multimeter Digital: mengukur tegangan dan arus listrik.



Gambar 3.4 Multimeter Digital

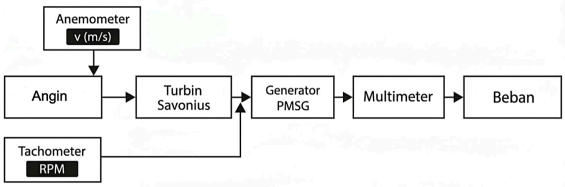
iv. Stopwatch: mencatat interval waktu pengambilan data.



Gambar 3.5 *Stopwatch*

D. Visualisasi Prototipe

Prototype turbin Savonius S-Heliks divisualisasikan dalam bentuk desain vertikal dua sudu yang bekerja berdasarkan prinsip gaya hambat (drag force), di mana konfigurasi sudu heliks meningkatkan kestabilan torsi dan mengurangi fluktuasi putaran rotor. Poros turbin dihubungkan langsung dengan generator PMSG untuk menghasilkan daya listrik sebesar 5 W sesuai target penelitian. Visualisasi sistem kerja prototipe ditunjukkan dalam diagram blok yang menggambarkan alur konversi energi dari angin hingga menjadi energi listrik.



Gambar 3.7 Diagram Blok Visualisasi Desain Prototipe PLTB Savonius

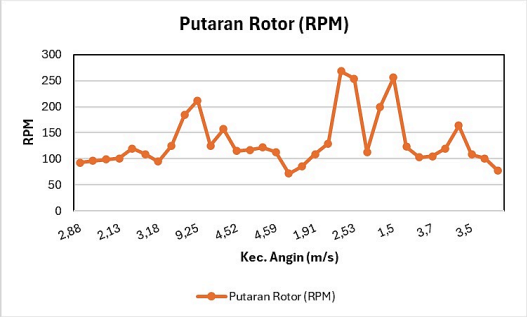
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pengolahan data, diperoleh sejumlah parameter penting yang digunakan untuk menganalisis performa turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius 2 sudu S-Heliks pada kondisi kecepatan angin rendah. Parameter yang dianalisis meliputi hubungan kecepatan angin terhadap putaran rotor (RPM), hubungan RPM terhadap tegangan keluaran generator, karakteristik *Tip Speed Ratio* (TSR), koefisien daya turbin (Cp), serta efisiensi sistem keseluruhan. Data hasil pengolahan kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah analisis karakteristik kerja turbin selama pengujian berlangsung.

A. Analisis Kecepatan Putaran Rotor (RPM) terhadap Kecepatan Angin

1. Tanpa Beban

Analisis Kecepatan Putaran Rotor (RPM) terhadap Kecepatan Angin Tanpa Beban dilakukan untuk mengetahui respon awal turbin Savonius S-Heliks terhadap variasi kecepatan angin tanpa adanya beban listrik.



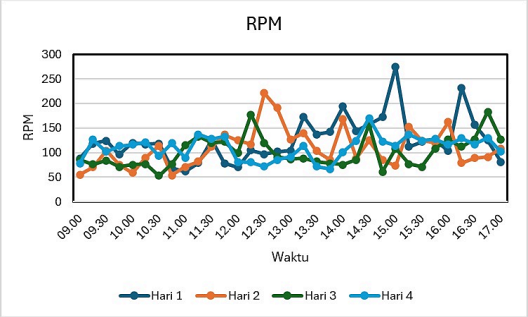
Gambar 4.1 Analisis Kecepatan Angin terhadap Putaran Rotor (RPM) Tanpa Beban

Pengujian tanpa beban menunjukkan bahwa kecepatan angin rendah 1,5–2,5 m/s, rotor berputar dengan kecepatan sekitar 70–120 RPM. Ketika kecepatan angin meningkat ke kisaran menengah 3–5 m/s, RPM naik menjadi 120–180 RPM. Pada kecepatan angin tinggi di atas 5 m/s, rotor dapat mencapai 200–275 RPM.

2. Berbeban

Analisis Kecepatan Putaran Rotor (RPM) terhadap Kecepatan Angin Berbeban dilakukan untuk mengetahui respon turbin Savonius S-Heliks terhadap variasi kecepatan angin ketika rotor terhubungdengan beban generator. Kondisi ini memberikan gambaran

performa turbin saat menghasilkan daya listrik



Gambar 4.2 Analisis Kecepatan Angin terhadap Putaran Rotor (RPM) Berbeban

i. Berbeban Hari Kamis

Pengujian pada hari Kamis menunjukkan bahwa rotor mulai berputar pada kecepatan angin sekitar 1,6 m/s (cut-in speed). Grafik memperlihatkan tren peningkatan RPM seiring bertambahnya kecepatan angin hingga 5 m/s. Pada kecepatan angin 4–5 m/s, RPM mencapai nilai tertinggi, namun terdapat fluktuasi akibat turbulensi lokal di sekitar gedung Fakultas Teknik. Hal ini menegaskan bahwa turbin Savonius S-Heliks mampu beroperasi pada kondisi angin rendah, meski kestabilan putaran masih dipengaruhi lingkungan.

ii. Berbeban Hari Senin

Data hari Senin menunjukkan pola yang relatif konsisten dengan Kamis, namun RPM maksimum sedikit lebih rendah. Pada kecepatan angin 2–3 m/s, rotor sudah menunjukkan peningkatan putaran yang stabil. Ketika angin mencapai 4,5 m/s, RPM meningkat tajam, tetapi grafik memperlihatkan adanya penurunan sesaat akibat arah angin yang berubah. Hal ini menandakan bahwa faktor turbulensi dan arah angin memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan rotor.

iii. Berbeban Hari Selasa

Pengujian hari Selasa memperlihatkan RPM yang lebih fluktuatif dibandingkan hari sebelumnya. Pada kecepatan angin rendah (≤2 m/s), rotor berputar dengan RPM kecil, namun saat angin meningkat ke 3–4 m/s, RPM melonjak cukup signifikan. Meski demikian, grafik menunjukkan adanya variasi tajam yang disebabkan oleh kondisi turbulensi di lokasi pengujian. Hal ini memperkuat karakteristik turbin Savonius sebagai turbin *drag-based* yang sensitif terhadap perubahan arah angin.

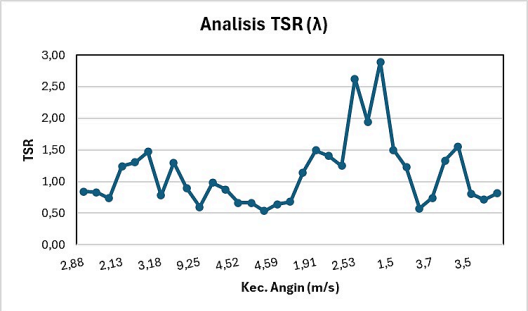
iv. Berbeban Hari Rabu

Hasil pengujian hari Rabu menunjukkan tren peningkatan RPM yang lebih stabil dibandingkan Selasa. *Cut-in speed* tercapai pada 1,5–2 m/s, dengan RPM meningkat secara linier hingga kecepatan angin 5 m/s. Pada kondisi angin mendekati maksimum, RPM mencapai nilai tertinggi dengan fluktuasi yang lebih kecil dibandingkan hari sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi angin pada hari Rabu relatif lebih stabil sehingga menghasilkan putaran rotor yang lebih konsisten.

B. Analisis *Tip Speed Ratio* (TSR)

1. Tanpa Beban

Analisis *Tip Speed Ratio* (TSR) tanpa beban dilakukan untuk mengetahui rasio kecepatan sudu terhadap kecepatan angin ketika rotor berputar bebas tanpa adanya beban listrik. Kondisi ini memberikan gambaran respon awal turbin Savonius S-Heliks terhadap variasi kecepatan angin.

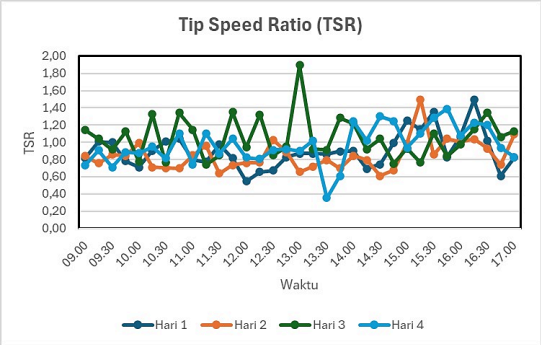


Gambar 4.3 *Analisis Tip Speed Ratio* (TSR) Tanpa Beban

Data hasil pengujian menunjukkan variasi nilai TSR (λ) sepanjang waktu pengukuran 09.00–17.00. Nilai TSR berada pada kisaran 3,7–10,6, dengan rata-rata sekitar 7,6. Pola ini berbeda dengan kondisi berbeban, karena rotor berputar lebih cepat sehingga rasio kecepatan sudu terhadap angin meningkat signifikan.

2. Berbeban

Analisis *Tip Speed Ratio* (TSR) berbeban dilakukan untuk mengetahui rasio kecepatan sudu terhadap kecepatan angin ketika rotor terhubung dengan beban generator. Kondisi ini memberikan gambaran performa turbin Savonius S-Heliks pada saat menghasilkan daya listrik.



Gambar 4.4 *Analisis Tip Speed Ratio* (TSR) Berbeban

i. Berbeban Hari Kamis

Pengujian hari Kamis menunjukkan nilai TSR meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin. Pada *cut-in speed* 1,5–2 m/s, TSR masih berada di bawah 0,5. Ketika kecepatan angin mencapai 4–5 m/s, TSR mendekati nilai maksimum sekitar 0,8. Grafik memperlihatkan tren yang relatif stabil, meskipun terdapat sedikit fluktuasi akibat turbulensi lokal.

ii. Berbeban Hari Senin

Data hari Senin memperlihatkan pola TSR yang mirip dengan Kamis, namun dengan nilai maksimum sedikit lebih rendah. Pada kecepatan angin menengah (3–4 m/s), TSR meningkat tajam hingga mendekati 0,7. Fluktuasi terlihat pada kecepatan angin tinggi, menandakan adanya pengaruh arah angin yang berubah-ubah di sekitar lokasi pengujian.

iii. Berbeban Hari Selasa

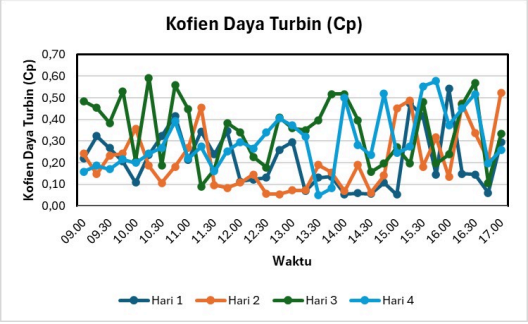
Pengujian hari Selasa menunjukkan nilai TSR yang lebih fluktuatif dibandingkan hari sebelumnya. Pada kecepatan angin rendah, TSR berada di kisaran 0,3–0,4. Ketika angin meningkat ke 4–5 m/s, TSR sempat mencapai 0,8 namun grafik memperlihatkan variasi tajam. Hal ini menunjukkan sensitivitas turbin Savonius terhadap kondisi turbulensi dan arah angin.

iv. Berbeban Hari Rabu

Hasil pengujian hari Rabu menunjukkan tren TSR yang lebih stabil. *Cut-in speed* tercapai pada 1,5–2 m/s dengan TSR awal sekitar 0,4. Seiring bertambahnya kecepatan angin, TSR meningkat secara linier hingga mencapai 0,8 pada kecepatan angin maksimum. Fluktuasi relatif kecil dibandingkan hari Selasa, menandakan kondisi angin lebih stabil.

C. Analisis Koefisien Daya Turbin (Cp)

Analisis Koefisien Daya Turbin (Cp) dilakukan untuk mengetahui efisiensi konversi energi angin menjadi energi mekanik pada rotor turbin Savonius S-Heliks.



Gambar 4.5 Analisis Koefisien Daya Turbin (Cp)

i. Hari Kamis

Pengujian hari Kamis menunjukkan nilai Cp bervariasi antara 0,05 hingga 0,40 dengan rata-rata sekitar 0,30. Nilai minimum tercatat pada pukul 13:30 dengan Cp sekitar 0,05 meskipun kecepatan angin cukup tinggi, menandakan adanya turbulensi lokal atau sudut sudu yang kurang optimal. Nilai maksimum dicapai pada kecepatan angin 3–4 m/s dengan Cp mendekati 0,40, menunjukkan kondisi turbin berada pada titik efisiensi terbaik.

ii. Hari Senin

Data hari Senin memperlihatkan kisaran Cp antara 0,10 hingga 0,36 dengan rata-rata sekitar 0,28. Pada pagi hari Cp relatif stabil di kisaran 0,20–0,25, kemudian meningkat menjelang siang dengan puncak sekitar 0,36. Setelah itu terjadi penurunan drastis akibat anomali aliran angin sebelum kembali stabil di sore hari. Pola ini konsisten dengan karakteristik turbin Savonius yang lebih efisien pada angin menengah.

iii. Hari Selasa

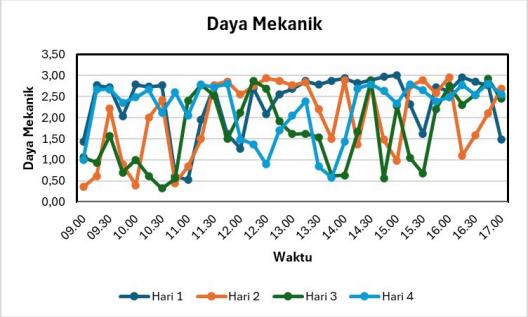
Pengujian hari Selasa menunjukkan Cp berada pada kisaran 0,12–0,38 dengan rata-rata sekitar 0,29. Nilai maksimum dicapai pada kecepatan angin sekitar 3,5 m/s dengan rotor berputar stabil. Fluktuasi harian cukup terlihat, terutama pada siang hari ketika arah angin berubah-ubah. Hal ini menegaskan bahwa kondisi turbulensi di lingkungan gedung berpengaruh signifikan terhadap performa turbin.

iv. Hari Rabu

Hasil pengujian hari Rabu menunjukkan Cp relatif lebih stabil dibandingkan hari sebelumnya, dengan kisaran 0,15–0,35 dan rata-rata sekitar 0,27. Nilai maksimum dicapai pada kecepatan angin 4 m/s dengan Cp mendekati 0,35. Fluktuasi harian lebih kecil, menandakan kondisi angin lebih stabil sehingga turbin mampu mempertahankan efisiensi konversi energi.

D. Analisis Daya Mekanik

Analisis Daya Mekanik dilakukan untuk mengetahui kemampuan turbin Savonius S-Heliks dalam mengubah energi angin menjadi energi mekanik pada rotor.



Gambar 4.6 Analisis Daya Mekanik

i. Hari Kamis

Pengujian hari Kamis menunjukkan daya mekanik mulai terbentuk pada cut-in speed 1,5–2 m/s dengan nilai kecil (<0,5 W). Ketika kecepatan angin mencapai 4–5 m/s, daya mekanik meningkat hingga ±1,8 W. Grafik memperlihatkan tren kenaikan yang jelas, meskipun terdapat penurunan sesaat akibat turbulensi lokal. Hal ini menegaskan bahwa turbin mampu memanfaatkan energi angin rendah, meski belum optimal.

ii. Hari Senin

Data hari Senin memperlihatkan pola daya mekanik yang relatif stabil. Pada kecepatan angin 2–3 m/s, daya mekanik berada di kisaran 0,8–1,2 W. Nilai maksimum dicapai pada kecepatan angin 4,5 m/s dengan daya sekitar 1,6 W. Fluktuasi terlihat lebih kecil dibandingkan Kamis, menandakan kondisi angin lebih stabil pada hari tersebut.

iii. Hari Selasa

Pengujian hari Selasa menunjukkan daya mekanik yang lebih fluktuatif. Pada kecepatan angin rendah (≤2 m/s), daya mekanik hanya sekitar 0,3–0,5 W. Ketika

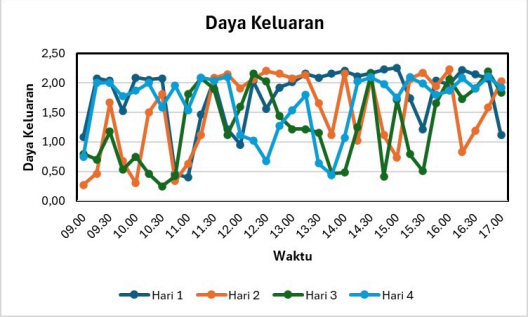
angin meningkat ke 3–4 m/s, daya melonjak hingga ±1,5 W, namun grafik menunjukkan variasi tajam akibat arah angin yang berubah-ubah. Hal ini menegaskan sensitivitas turbin Savonius terhadap kondisi turbulensi.

iv. Hari Rabu

Hasil pengujian hari Rabu menunjukkan tren daya mekanik yang lebih stabil. *Cut-in speed* tercapai pada 1,5–2 m/s dengan daya awal sekitar 0,4 W. Seiring bertambahnya kecepatan angin, daya meningkat secara linier hingga mencapai ±1,7 W pada kecepatan angin maksimum. Fluktuasi relatif kecil dibandingkan Selasa, menandakan kondisi angin lebih konsisten.

E. Analisis Daya Keluaran

Analisis Daya Keluaran dilakukan untuk mengetahui kemampuan turbin Savonius S-Heliks dalam mengubah energi mekanik rotor menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan.



Gambar 4.7 Analisis Daya Keluaran

i. Hari Kamis

Pengujian hari Kamis menunjukkan daya keluaran mulai terbentuk pada cut-in speed 1,5–2 m/s dengan nilai sekitar 0,2–0,3 W. Ketika kecepatan angin mencapai 4–5 m/s, daya keluaran meningkat hingga ±1,8 W. Grafik memperlihatkan tren kenaikan yang jelas, meskipun terdapat penurunan sesaat akibat fluktuasi arah angin. Hal ini menegaskan bahwa turbin mampu menghasilkan daya listrik pada kondisi angin rendah, meski belum optimal.

ii. Hari Senin

Data hari Senin memperlihatkan pola daya keluaran yang relatif stabil. Pada kecepatan angin 2–3 m/s, daya keluaran berada di kisaran 0,5–1 W. Nilai maksimum dicapai pada kecepatan angin 4,5 m/s dengan daya sekitar 1,6 W. Fluktuasi lebih kecil dibandingkan Kamis, menandakan kondisi angin lebih stabil sehingga tegangan keluaran relatif konsisten.

iii. Hari Selasa

Pengujian hari Selasa menunjukkan daya keluaran yang lebih fluktuatif. Pada kecepatan angin rendah (≤2 m/s), daya keluaran hanya sekitar 0,2–0,4 W. Ketika angin meningkat ke 3–4 m/s, daya melonjak hingga ±1,5 W, namun grafik menunjukkan variasi tajam akibat turbulensi. Hal ini menegaskan bahwa kondisi lingkungan berpengaruh signifikan terhadap kestabilan daya listrik yang dihasilkan.

iv. Hari Rabu

Hasil pengujian hari Rabu menunjukkan tren daya keluaran yang lebih stabil dibandingkan Selasa. *Cut-in speed* tercapai pada 1,5–2 m/s dengan daya awal sekitar 0,3 W. Seiring bertambahnya kecepatan angin, daya meningkat secara linier hingga mencapai ±1,7 W pada kecepatan angin maksimum. Fluktuasi relatif kecil, menandakan kondisi angin lebih konsisten sehingga tegangan keluaran lebih terjaga.

F. Analisi Pemilihan Profil Sudu NACA 3040

Pemilihan profil sudu merupakan faktor penting yang memengaruhi performa turbin angin Savonius tipe S-Heliks. Dalam penelitian ini digunakan profil NACA 3040 sebagai alternatif dari sudu konvensional berbentuk setengah silinder karena memiliki karakteristik aerodinamika yang lebih baik pada

kondisi kecepatan angin rendah. Profil ini memiliki camber maksimum 4% pada 30% *chord*, sehingga mampu menghasilkan gaya hambat dan gaya angkat yang cukup untuk memutar rotor pada kecepatan *cut-in* yang rendah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa profil NACA 3040 mampu meningkatkan koefisien daya (Cp) hingga ±0,2357, lebih tinggi dibandingkan sudu konvensional. Hal ini disebabkan oleh bentuk *airfoil* NACA 3040 yang dapat mengurangi separasi aliran dan pembentukan vorteks pada sisi sudu, sehingga menghasilkan putaran rotor yang lebih stabil. Selain itu, penggunaan NACA 3040 juga menurunkan kecepatan *cut-in* hingga kisaran 1,7–2 m/s, yang sesuai dengan kondisi lokasi penelitian di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia, di mana kecepatan angin rata-rata sekitar 2,91 m/s. Dengan demikian, turbin dapat mulai beroperasi lebih cepat dan menghasilkan daya keluaran yang lebih konsisten meskipun terdapat turbulensi akibat pengaruh bangunan sekitar. Secara keseluruhan, penerapan profil NACA 3040 pada sudu Savonius S-Heliks memberikan efisiensi yang lebih baik serta kestabilan tegangan keluaran yang lebih tinggi, meskipun daya maksimum prototipe PLTB eksperimental belum mencapai target 5 W. Profil ini dapat dijadikan dasar untuk penelitian lanjutan, seperti optimasi sudu dengan variasi sudut *twist* atau jumlah sudu pada desain berikutnya.

G. Validasi

Berikut ini tabel perbandingan antara hasil penelitian ini tehadap hasil penelitian-penelitian sebelumnya sesuai bidang penelitian ini.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Penelitian.

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
Calvin Yudees Satriatama dkk. (2025) - Simulasi CFD menunjukkan Cp maksimum 0,27, namun belum diuji prototipe secara langsung.	Validasi dilakukan dengan pengujian eksperimental di lokasi nyata. Cp maksimum 0,5, daya maksimum ±2 W, sesuai tren turbin *drag-based*.
Muh. Azhami Arqam dkk. (2025) - Desain heliks meningkatkan kestabilan torsi, tetapi belum diuji prototipe.	Prototipe heliks diuji langsung, terbukti mampu beroperasi pada angin rendah dengan *cut-in speed* 1,71 m/s.
Handy Prabowo dkk. (2023) - Cut-in speed 1,51 m/s pada konfigurasi 3 sudu dengan twist rotor 180°.	*cut-in speed* 1,71 m/s pada konfigurasi 2 sudu, memperkuat efektivitas desain heliks.
Ivander Butar-Butar dkk. (2021) - Jumlah sudu tidak signifikan terhadap efisiensi, faktor angin lebih dominan.	meski 2 sudu, efisiensi tetap terbatas oleh turbulensi lokal dan rugi mekanik.

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian prototipe turbin angin sumbu vertikal Savonius 2 sudu S-Heliks di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain turbin Savonius 2 sudu S-Heliks telah mampu mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik menggunakan generator PMSG pada kondisi kecepatan angin rendah (0,31–5,65 m/s). Prototipe menunjukkan kemampuan beroperasi pada cut-in speed sekitar 1,71–2 m/s, dengan tegangan keluaran relatif stabil. Meskipun target daya 5 Watt belum tercapai penuh, dimana daya yang dihasilkan sekitar ±2 Watt pada kecepatan angin 4-5 m/s.

2. Analisis karakteristik performa sistem PLTB Savonius melalui pengujian langsung di lokasi menunjukkan yaitu:
   a. Peningkatan kecepatan angin dari 2 m/s hingga 5 m/s meningkatkan putaran rotor dari sekitar 100 RPM menjadi lebih dari 200 RPM, dengan tegangan keluaran generator relatif stabil pada kisaran 6-8 Volt.
   b. Nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) berada pada kisaran 0,5-1,9, sesuai dengan karakteristik turbin Sarvonius, dengan performa optimal terjadi pada kecepatan angin sekitar 4 m/s.
   c. Koefisien daya (Cp) berada pada kisaran 0,2-0,6 dan efisiensi sistem total berkisar antara 0,05-0,40, menunjukan keterbatasan konversi energi akibat turbulensi angin, rugi-rugi mekanik, serta rugi-rugi Listrik pada generator.

Secara keseluruhan, turbin Sarvonius S-Heliks memiliki potensi sebagai pembangkit Listrik tenaga angin di lingkungan perkotaan, meskipun masih diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dan daya keluaran sistem

B. Saran

Beberapa saran dari penulis, berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh adalah untuk penelitian selanjutnya:

i. Melakukan optimasi desain sudu Savonius S-Heliks untuk meningkatkan nilai koefisien daya (Cp) dan efisiensi sistem turbin.
ii. Menggunakan generator dengan efisiensi lebih tinggi agar proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik lebih maksimal, atau menambahkan kontrol tambahan seperti MPPT untuk mengoptimalkan daya keluaran.
iii. Melakukan pengujian di lokasi berbeda dengan variasi kondisi angin untuk memperoleh data performa yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

ANTARA News. (2024). *Renewable energy mix target still 23%: Energy Minister*. ANTARA News. https://en.antaranews.com/news/304842/renewable-energy-mix-target-still-23-energy-minister

Alvin Yudees Satriatama, Ismoyo Haryanto, & Khoiri Rozi. (2025). Simulasi dan Analisis Aerodinamika Turbin Savonius. *Jurnal Teknik Mesin*, *13*(3), 203–206. https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/53207

Sigernes. (2013, April). *DRAFT: Savonius wind rotor basics*. University Centre in Svalbard (UNIS). https://kho.unis.no/doc/Savonius_windrotor_basics.pdf

Arianto, B., & Mochamad Karjadi. (2024). Pengembangan Turbin Angin Skala Kecil untuk Energi Terbarukan untuk Daerah Terpencil. *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, *7*(1), 468–476. https://doi.org/10.38035/rrj.v7i1.1216

Iander Butar-Butar, Prof. Dr. Ir. Bambang Purwantana, M. Agr. , & Dr. Radi, S. T. P. , M. Eng. ,. (2021). *Pengaruh Jumlah Sudu, Kecepatan Angin dan Posisi Baling-Baling terhadap Pembangkit Daya Listrik pada Prototipe Kincir Angin Savonius* [Skripsi, Universitas Gadjah Mada]. https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/200805

Hasen, Silalahi, E. M., Widodo, B., & Purba, R. (2024). Analysis of the PLTB off-grid system to meet the power demands of Tidung Island in the Jakarta area, based on homer. *SMART LIVING ENVIRONMENT IN SUSTAINABLE ARCHITECTURE*

AND ENGINEERING TECHNOLOGIES TOWARDS INDUSTRY 5.0 23–24 November 2022 Jakarta, Indonesia, 020003. https://doi.org/10.1063/5.0209808

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2023). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023*. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-and-economic-statistics-of-indonesia-2023.pdf

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2024, January 18). *Kinerja Subsektor EBTKE 2023 dan Program 2024: Diversifikasi Produk BBN dan Peningkatan Kapasitas Pembangkit EBT*. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.

Larassita Damayanti. (2025, July 13). *Mengejar Target Net Zero Emission Indonesia, Apa Kabar Sektor Energi?* CNBC Indonesia. https://www.cnbcindonesia.com/opini/20250711143950-14-648369/mengejar-target-net-zero-emission-indonesia-apa-kabar-sektor-energi

Lathifah, H., Sudarti, & Yushardi. (2023). Analisis Potensi Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Sumber Energi Listrik Di Indonesia. *Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, *2*(4), 1005–1009. https://doi.org/10.47233/jpst.v2i4.1330

Marchelino Siboro, Ismoyo Haryanto, & Gunawan Dwi Haryadi. (2025). Simulasi dan Analisis Sistem Mekanik dan Elektrik Turbin Savonius. *Jurnal Teknik Mesin*, *13*(3), 75–80. https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/52696

Muh. Azhami Arqam. (2025). *Perancangan Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Sistem Helical Savonius* [Tugas Akhir, Universitas Negeri Makassar]. https://lib.unm.ac.id/layanan/karya-ilmiah/perancangan-vertical-axis-wind-turbine-vawt-sistem-helical-savonius

ıkhrijal, T. Z. A. M. (2021). Analisis Potensi Energi Angin Sebagai Sumber Energi Listrik Untuk Menggerakkan Pompa Air Di Areal Persawahan Desa Blang Krueng Kecamatan Baitussalam. *Jurnal Ilmiah Teknik Unida*, *2*(1), 1–10. https://doi.org/10.55616/jitu.v2i1.167

ASA POWER. (2026). *Prediction of Worldwide Energy Resources*. NASA POWER. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

ıbowo, H., Wijayanto, D. S., Saputra, T. W., & Bakar, Mohd. S. Bin. (2023). The Optimization of Savonius Helix Wind Turbine Cut-in Speed with the Variation of Blades-twist Rotor and Number of Blades. *JIPTEK*, *16*(2), 81. https://doi.org/10.20961/jiptek.v16i2.71389

j Kamal, M. D., Harish Krishna, P., Jagadeesh Babu, G., Suresh, A., & Baskar, K. (2017). Vertical Axis Wind Turbine. *Asian Review of Mechanical Engineering*, *6*(2), 1–3. https://doi.org/10.51983/arme-2017.6.2.2434

za Jaka Ariazena, Ir. Agus Suprayitno, & Gunawan. (2021). Perancangan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) Savonius 3 Sudu. *Jurnal Teknologika*, *11*(2), 133–142.

ardika, I. K. (2019). Karakteristik Potensi Angin Sebagai Sumber Energi Terbarukan Di Indonesia Dari Data Satelit Remote Sensing. *JTT (Jurnal Teknologi Terapan)*, *5*(1), 26. https://doi.org/10.31884/jtt.v5i1.164

ok Mulyo Sugeng, Veriah Hadi, & Bambang Setiadi. (2023). Analisis Perbandingan 2 Dan 3 Blade Turbin Angin Kecil Sumbu Vertikal Tipe Savonius. *Sainstech: Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Sains Dan Teknologi*, *33*(4).

tono Hardi, Amat Umron, Rudi Hartono, & M. Yusril Syafar. (2024). Design and Optimization of Vertical Axis Wind

Turbines Combination of Darius Type and Savonius Type to Increase the Efficiency of Renewable Energy Source Power Generation. *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Journal*, *9*(1).

Yosep Cristian, Eva Magdalena Silalahi, & Bambang Widodo. (2024). Pemodelan dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sistem On-Grid Menggunakan Matlab Simulink. *Jurnal Lektrokom*, *7*(1), 14–23. https://ejournal.uki.ac.id/index.php/lektrokom/article/view/5248