

SIMULASI DAN ANALISIS SISTEM MEKANIK DAN ELEKTRIK TURBIN SAVONIUS

***Marchelino Siboro**¹, **Ismoyo Haryanto**², **Gunawan Dwi Haryadi**²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: bagas42189@gmail.com

Abstrak

Turbin angin Savonius memiliki potensi untuk aplikasi energi skala kecil di Indonesia, namun efisiensinya yang rendah menjadi tantangan utama. Optimalisasi kinerja sistem memerlukan pencocokan antara putaran rendah turbin dengan kecepatan operasi efektif generator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio gearbox (1:3, 1:4, dan 1:5) sebagai mekanisme transmisi terhadap kinerja elektrikal sistem turbin Savonius yang terintegrasi dengan Generator Sinkron Magnet Permanen (PMSG). Metodologi penelitian berbasis simulasi menggunakan Solidworks dan MATLAB/Simulink, dengan pendekatan pemodelan yang divalidasi terlebih dahulu terhadap penelitian acuan [1]. Analisis dilakukan pada turbin berdimensi tinggi 0.6 m dan diameter 0.6 m pada rentang kecepatan angin 4-12 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan rasio gearbox yang lebih tinggi secara signifikan meningkatkan daya output dan efisiensi sistem. Konfigurasi dengan rasio 1:5 secara konsisten memberikan kinerja tertinggi, menghasilkan daya 3.488 Watt dengan efisiensi 0.9155% pada kecepatan angin 12 m/s. Disimpulkan bahwa rasio gearbox 1:5 merupakan pilihan optimal di antara variasi yang diuji untuk memaksimalkan daya listrik yang dihasilkan pada kondisi angin rendah hingga sedang.

Kata kunci : analisis kinerja; generator pmsg; rasio gearbox; simulasi; turbin angin savonius

Abstract

The Savonius wind turbine holds potential for small-scale energy applications in Indonesia, but its low efficiency remains a key challenge. System performance optimization requires matching the turbine's low rotational speed with the generator's effective operating speed. This research aims to analyze the effect of gearbox ratio variations (1:3, 1:4, and 1:5) as a transmission mechanism on the electrical performance of a Savonius turbine system integrated with a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). The research methodology is simulation-based, utilizing Solidworks and MATLAB/Simulink, with a modeling approach validated against a reference study (Yadav, 2016). The analysis was performed on a turbine with a height of 0.6 m and a diameter of 0.6 m over a wind speed range of 4-12 m/s. The results indicate that selecting a higher gearbox ratio significantly improves power output and system efficiency. The 1:5 ratio configuration consistently delivered the highest performance, producing 3.488 Watts of power with a system efficiency of 0.9155% at a wind speed of 12 m/s. It is concluded that the 1:5 gearbox ratio is the optimal choice among the tested variations for maximizing electrical power generation under low to moderate wind conditions.

Keywords: gearbox ratio; performance analysis; pmsg generator; savonius wind turbine; simulation

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan masyarakat manusia dan perluasan skala industri, sejumlah besar bahan bakar fosil telah dibakar untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat. Proses ini telah menghasilkan emisi sejumlah besar gas rumah kaca, yang secara signifikan merusak lingkungan ekologis bumi. Untungnya, pembangkitan tenaga angin telah muncul sebagai solusi potensial untuk mengatasi masalah tersebut, yang memiliki sumber daya energi yang terbarukan dan melimpah, serta ketersediaan global. [2].

Dalam produksi energi terbarukan yang terdistribusi, turbin angin tipe Savonius sangatlah penting. Dalam keadaan angin yang sedikit, desain bilahnya yang berorientasi vertikal memberi keunggulan. Turbin ini ideal untuk pembangkitan daya yang tersebar dan menyediakan cara yang hemat biaya untuk menangkap energi angin, bahkan pada kecepatan rendah. Terutama di wilayah dengan pola angin yang tidak dapat diprediksi, turbin Savonius sangat penting untuk meningkatkan aksesibilitas energi angin dan mendorong penerapan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan. [3].

Saat ini, produksi listrik yang tersebar dari angin, sebagai sumber daya alam, dianggap sebagai komponen penting dari energi terbarukan baik di lingkungan perkotaan maupun pedesaan. Turbin angin sumbu horizontal dan vertikal skala kecil (HAWT dan VAWT) umumnya digunakan untuk tujuan ini, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya

sendiri. Namun, penggunaan turbin ini di daerah perkotaan merupakan tantangan karena perubahan kecepatan dan arah angin yang tidak dapat diprediksi yang disebabkan oleh rintangan seperti bangunan dan jembatan. Intensitas turbulensi angin juga berfluktuasi karena interaksi dengan bangunan, membuat VAWT lebih menguntungkan daripada HAWT di lingkungan perkotaan. Oleh karena itu, perencanaan yang cermat untuk memilih lokasi yang sesuai untuk pemasangan turbin angin di daerah perkotaan sangat penting untuk mencapai efisiensi maksimum. Turbin angin Savonius, dengan sumbu vertikal dan operasi arah angin independen, dapat dimanfaatkan. untuk tujuan ini. [4]

2. Landasan Teori

Turbin Savonius diperkenalkan oleh insinyur Finlandia Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1921 sebagai turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang bekerja berdasarkan gaya hambat. Desainnya menyerupai huruf "S" dan mampu menangkap angin dari berbagai arah. Turbin ini ideal pada kecepatan angin 4–10 m/s dan menggerakkan generator melalui poros berputar. Efisiensinya dinilai melalui koefisien daya (C_p), yang untuk turbin Savonius berkisar 20–30%, di bawah batas teoritis Betz sebesar 59,3%. Parameter lain seperti koefisien torsi (C_t) dan tip speed ratio (TSR) juga digunakan untuk mengoptimalkan kinerjanya.[5]

Batas Betz diturunkan oleh Albert Betz pada tahun 1920-an untuk memperkirakan efisiensi maksimal turbin dalam aliran fluida tak termampatkan. Model ini mengasumsikan aliran fluida linier dan tekanan merata. Namun, dalam praktiknya, aliran mengalami defleksi dan distribusi tekanan tak merata, sehingga batas teoritis tersebut seringkali melebihi-lebihkan efisiensi nyata. [6]

Turbin Savonius pertama kali diuji pada fluida air dan angin, termasuk di sungai, bendungan, dan laut. Keunggulannya terletak pada desain yang sederhana, mudah dimodifikasi, dapat menangkap angin dari segala arah, serta menghasilkan kebisingan rendah. Rotor terdiri dari dua bilah berbentuk setengah lingkaran yang menciptakan perbedaan gaya hambat antara sisi cekung dan cembung, sehingga menghasilkan putaran. Karena bekerja berdasarkan gaya hambat, kecepatan putar rotor tidak boleh melebihi kecepatan angin. [7].

Persamaan Dinamis Model Matematika untuk rotor savonius bergantung kepada kecepatan angin eksternal u_∞ , yang akan menciptakan torsi yang dihasilkan oleh rotor. Analisis parameter tergabung memungkinkan penerapan hukum Newton dan Kirchhoff, Daya angin merupakan fungsi laju aliran massa per satuan waktu dan energi kinetik per satuan luas yang diberikan oleh

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u_\infty^3 \quad \text{Persamaan 1}$$

Luas sapuan $A = H * D$ bergantung kepada tinggi rotor, H , dan diameter rotor, D [8].

Kecepatan perifer dari rotor savonius merupakan hasil dari kecepatan angular, ω , dan jari-jari rotor, R , maka $u_{rotor} = \omega R$ [9].

Torsi rotor Savonius adalah hasil perkalian momen inersia rotor dan percepatan sudut rotor [10], atau $T = J \alpha$.

Total torsi merupakan

$$T = 2RF_w \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin(\theta + \phi) d\theta \quad \text{Persamaan 2}$$

Besarnya arus dan tegangan stator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad \text{Persamaan 3}$$

$$V_s = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad \text{Persamaan 4}$$

Daya listrik total yang dihasilkan dihitung menggunakan persamaan [11] :

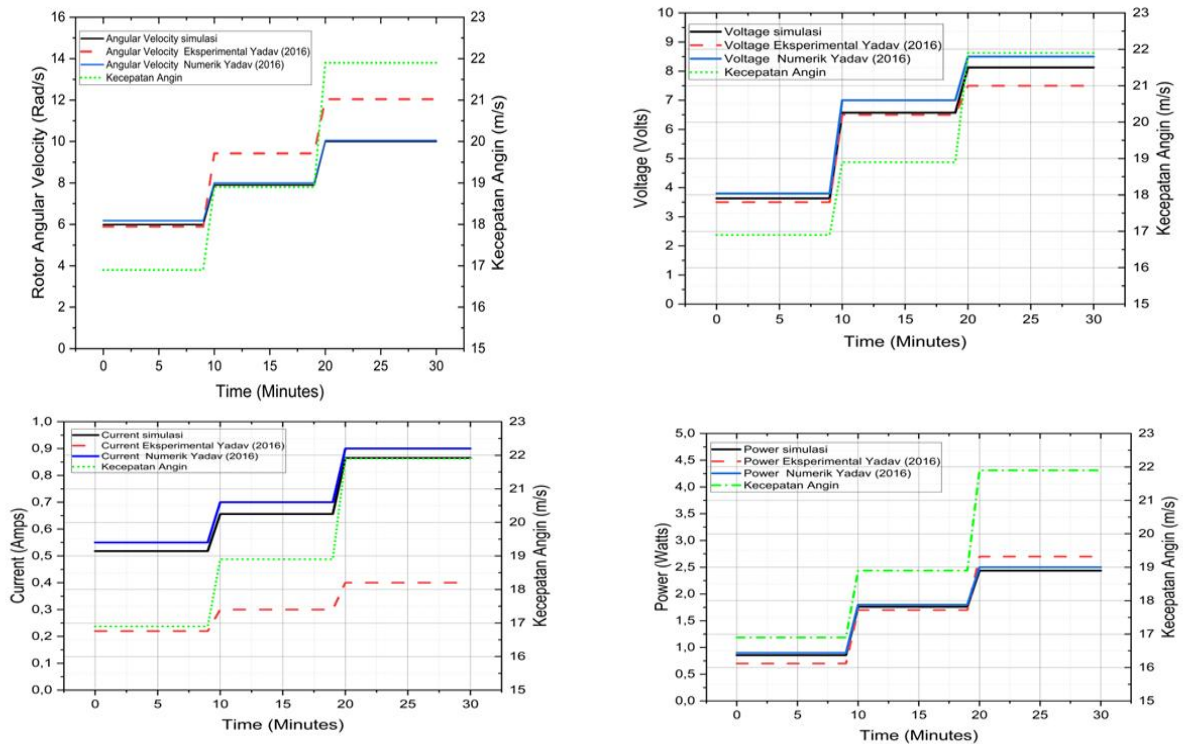
$$P_{total} = \eta_{gen} V_s i_s \quad \text{Persamaan 5}$$

3. Bahan dan Metode Penelitian

Perancangan dan simulasi sistem turbin angin Savonius dimulai dengan pemodelan 3D di SOLIDWORKS 2023, mencakup rotor, poros, bearing, dan generator sinkron magnet permanen (PMSG). Sistem elektrik kemudian dimodelkan di MATLAB 2024, termasuk dinamika rotor, drive train, sinyal listrik (dq-abc), serta analisis parameter seperti kecepatan putar, tegangan, arus, torsi elektromagnetik, dan daya output. Simulasi mempertimbangkan variasi rasio gearbox (1:3, 1:4, 1:5) dengan efisiensi serta inersia dan redaman ekuivalen. Validasi awal dilakukan untuk memastikan akurasi model, sebelum dilanjutkan ke analisis pengaruh rasio gearbox terhadap kinerja elektrik pada kecepatan angin 4–12 m/s.

4. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini terdapat beberapa hasil simulasi menggunakan MATLAB SIMULINK dibandingkan dengan [1], dengan perbedaan $< 10\%$ menunjukkan simulasi ini berhasil.

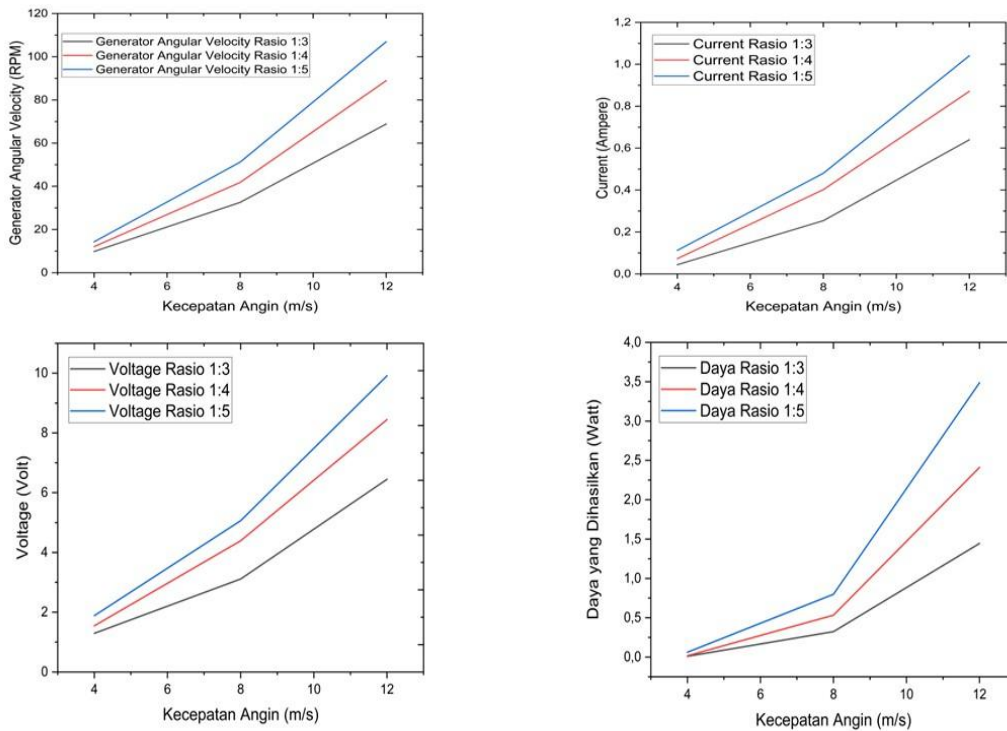


Gambar 4.1 Grafik perbandingan hasil simulasi dan jurnal Yadav (2016).

Simulasi turbin angin Savonius pada kecepatan 16,9; 19,8; dan 21,9 m/s menunjukkan tren yang konsisten dengan data numerik, terutama pada parameter RPM dan tegangan output. Meskipun terdapat deviasi kecil terhadap simulasi numerik, penyimpangan lebih besar muncul pada kecepatan tinggi jika dibandingkan dengan data eksperimen, terutama pada arus output. Daya listrik yang dihasilkan cukup akurat pada kecepatan menengah, namun mulai menyimpang pada kecepatan tinggi, mengindikasikan pengaruh asumsi teknis seperti karakteristik beban dan parameter generator.

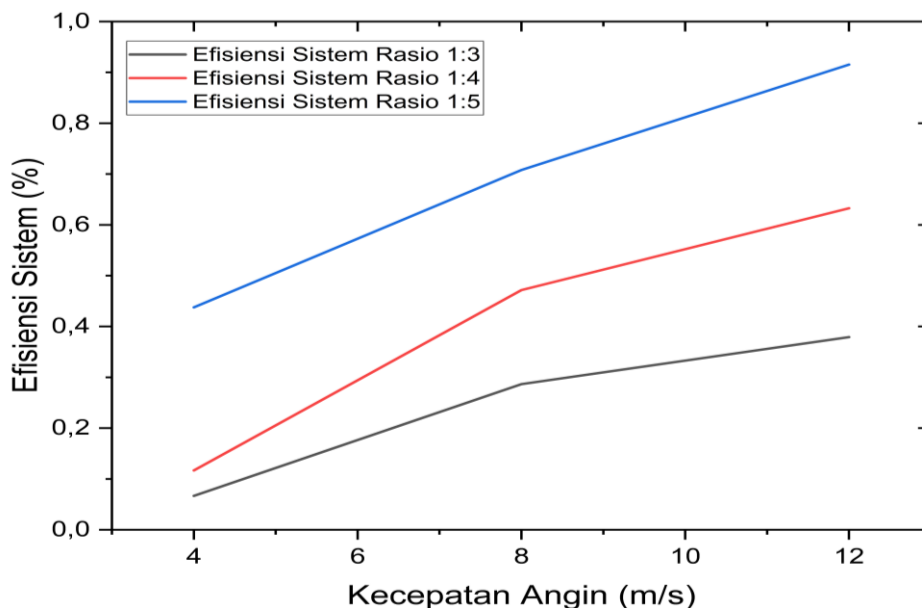
Setelah model tervalidasi (Gambar 4.3), analisis dilanjutkan untuk mengevaluasi pengaruh variasi rasio gearbox (1:3, 1:4, dan 1:5) terhadap performa turbin Savonius berdiameter dan tinggi 0,6 meter. Gearbox digunakan untuk meningkatkan RPM agar sesuai dengan kebutuhan generator PMSG. Simulasi rentang kecepatan angin 4–12 m/s memperhitungkan faktor teknis seperti inersia ekuivalen, koefisien redaman, torsi input, dan efisiensi gearbox 95%. Hasil menunjukkan bahwa rasio yang lebih tinggi meningkatkan RPM, namun tidak selalu menghasilkan efisiensi sistem yang lebih baik karena kerugian mekanis dan penyesuaian torsi pada beban.

Analisis kinerja turbin Savonius pada kecepatan angin 4, 8, dan 12 m/s menunjukkan bahwa rasio gearbox 1:5 consistently memberikan performa terbaik dibandingkan rasio 1:4 dan 1:3. Pada 4 m/s, meskipun daya output rendah, rasio 1:5 mampu meningkatkan kecepatan generator sehingga tegangan dapat mulai dihasilkan lebih awal. Seiring peningkatan kecepatan angin, semua parameter sistem naik signifikan, dan rasio 1:5 terus mencatatkan daya dan efisiensi tertinggi. Dengan performa stabil di berbagai kondisi angin, rasio ini direkomendasikan sebagai konfigurasi optimal untuk turbin Savonius skala kecil di wilayah dengan kecepatan angin bervariasi.



Gambar 4.2 Perbandingan Hasil Simulasi pada Tiga Rasio Gearbox Berbeda terhadap Tiga Kecepatan Angin: a) Kecepatan Angular Rotor, b) Arus, c) Voltase, d) Daya Total yang Dihasilkan

Gambar 4.4d menunjukkan bahwa daya output meningkat seiring kecepatan angin untuk semua rasio gearbox, dengan rasio 1:5 secara konsisten menghasilkan daya tertinggi, diikuti 1:4 dan 1:3. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan generator melalui rasio gearbox yang lebih tinggi membantu membawa PMSG ke rentang operasi yang lebih optimal, menghasilkan kombinasi tegangan dan arus yang lebih efektif untuk pembangkitan daya. Meskipun rasio 1:5 unggul dalam rentang 4–12 m/s, perlu dipertimbangkan trade-off berupa potensi kesulitan start-up pada angin sangat rendah. Evaluasi efisiensi sistem secara menyeluruh perlu menghubungkan kecepatan generator terhadap kurva efisiensi PMSG dan menghitung efisiensi sebagai rasio antara daya listrik output (P_{angin}) dan daya angin yang tersedia (P_{angin}).



Gambar 4.3 Grafik Efisiensi Sistem dengan Variasi Rasio Gearbox pada Rentang Kecepatan Angin 4-12 m/s

Analisis efisiensi sistem konversi energi menunjukkan bahwa rasio gearbox berpengaruh signifikan terhadap kinerja turbin Savonius. Hasil simulasi (Gambar 4.3) menunjukkan bahwa efisiensi sistem meningkat seiring kenaikan kecepatan angin, dengan rasio 1:5 secara konsisten menghasilkan efisiensi tertinggi: 0,4377% (4 m/s), 0,7079% (8 m/s), dan 0,9155% (12 m/s). Rasio ini mampu meningkatkan kecepatan putar generator sehingga mendekati titik efisiensi optimal PMSG. Meskipun rasio 1:4 dan 1:3 menunjukkan tren serupa, efisiensinya jauh lebih rendah, menegaskan pentingnya pemilihan rasio gearbox yang tepat.

Meski nilai efisiensi absolut masih rendah dibandingkan batas teoritis seperti hukum Betz atau turbin HAWT, tren peningkatan yang konsisten menunjukkan efektivitas rasio tinggi dalam meningkatkan performa sistem, khususnya pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Faktor-faktor seperti karakteristik aerodinamis Savonius, efisiensi gearbox, dan keterbatasan simulasi turut memengaruhi hasil. Namun, temuan ini mengindikasikan bahwa rasio 1:5 merupakan konfigurasi optimal, dan penelitian lebih lanjut disarankan untuk fokus pada pengembangan desain bilah dan pemilihan generator yang lebih sesuai guna meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dipaparkan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut untuk menjawab rumusan masalah penelitian:

1. Simulasi turbin Savonius ($H=0,6$ m; $D=0,6$ m) pada kecepatan angin 4–12 m/s menunjukkan bahwa rasio gearbox lebih tinggi (khususnya 1:5) secara signifikan meningkatkan kecepatan putar generator dan tegangan output. Rasio 1:5 menghasilkan daya dan efisiensi tertinggi di semua kecepatan angin, dengan efisiensi maksimal 0,9155% pada 12 m/s. Ini menjadikannya konfigurasi optimal untuk kondisi angin rendah hingga sedang, seperti di Indonesia.
2. Pemodelan sistem divalidasi dengan data Yadav (2016) menunjukkan tren kinerja yang sesuai, meskipun terdapat deviasi pada nilai absolut seperti arus. Kesesuaian tren kecepatan rotor dan tegangan output mengindikasikan bahwa pendekatan pemodelan cukup akurat untuk menganalisis pengaruh variasi rasio gearbox.

6. Daftar Pustaka

- [1] Yadav, 'A Savonius Wind Turbine with Electric Generator: Model and Test', *Graduate School of Clemson University*, no. May, pp. 1–89, 2016, [Online]. Available: https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2428.
- [2] J. Lin, X. Yang, S. Niu, H. Yu, J. Zhong, and L. Jian, 'Inflatable Savonius wind turbine with rapid deployment and retrieval capability: Structure design and performance investigation', *Energy Convers Manag*, vol. 310, no. May, p. 118480, 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118480.
- [3] A. F. Kaya, N. Morselli, M. Puglia, G. Allesina, and S. Pedrazzi, 'Design optimization of two-blade Savonius wind turbines for hydrogen generation', *Renew Energy*, vol. 231, no. May, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121028.
- [4] M. Darvishyadegari and R. Hassanzadeh, 'Evaluation of a Savonius wind turbine in the vicinity of a circular cross-sectional building', *Journal of Building Engineering*, vol. 93, no. May, p. 109818, 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.109818.
- [5] A. Al Noman *et al.*, 'Savonius wind turbine blade design and performance evaluation using ANN-based virtual clone: A new approach', *Heliyon*, vol. 9, no. 5, p. e15672, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15672.
- [6] A. N. Gorban, A. M. Gorlov, and V. M. Silantyev, 'Limits of the turbine efficiency for free fluid flow', *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, vol. 123, no. 4, pp. 311–317, 2001, doi: 10.1115/1.1414137.
- [7] D. M. Prabowoputra and A. R. Prabowo, 'Effect of the Phase-Shift Angle on the vertical axis Savonius wind turbine performance as a renewable-energy harvesting instrument', *Energy Reports*, vol. 8, no. May, pp. 57–66, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.06.092.
- [8] T. Hayashi, Y. Li, and Y. Hara, 'Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor', *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, vol. 48, no. 1, pp. 9–16, 2005, doi: 10.1299/jsmeb.48.9.
- [9] Z. Tasneem *et al.*, 'An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges', *Developments in the Built Environment*, vol. 4, p. 100033, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100033>.
- [10] R. Alfiansyah and J. Sumarjo, 'Design of Savonius Double-Stage Wind Turbine, Capacity 300W', *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, vol. 7, no. 1, pp. 11–26, 2023, doi: 10.21070/jeeeu.v7i1.1638.

-
- [11] 'IEEE Guide for Testing Permanent Magnet Machines', *IEEE Std 1812-2023 (Revision of IEEE Std 1812-2014)*, pp. 1–88, 2023, doi: 10.1109/IEEESTD.2023.10352399.