

Analisis Eksperimental Pengaruh Variasi Bilah 2, 4, Dan 6 Turbin Angin Savonius Tipe-L Terhadap Kecepatan Putar Serta Torsi Pada Kecepatan Angin Rendah

Shultoni Mahardika¹, Ridhani Anita Fajardini², Rizal Indrawan³, Rahmat Basya Shahrys Tsany⁴

^{1,4} Program Studi Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111, Indonesia

^{2,3} Program Studi Teknik Desain Dan Manufaktur, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya 60111, Indonesia

Corresponding Author: smahardika@ppns.ac.id

Riwayat Artikel

Diserahkan: 14 Oktober 2025

Direvisi: 1 November 2025

Diterima: 7 November 2025

Dipublikasi: 30 November 2025

Abstrak

Pemanfaatan energi angin melalui turbin sumbu vertikal seperti Savonius Tipe-L menjadi solusi menjanjikan untuk energi terbarukan skala kecil, Turbin Savonius tipe L divariasikan dengan 2, 4, dan 6 bilah untuk mengevaluasi kinerja pada kecepatan angin rendah (6–8 m/s) dalam *wind tunnel*. Pengujian eksperimental dilakukan untuk menguji kinerjanya dengan perlakuan 10 pengulangan tiap kondisi. Kecepatan angin diukur *anemometer hot wire*, pengukuran putaran turbin menggunakan *tachometer*, dan torsi dihitung melalui metode *startup time*. Analisis statistik dilakukan dengan *one-way ANOVA* dan *post-hoc Tukey*. Hasil menunjukkan konfigurasi 4 bilah secara signifikan unggul ($p < 0,0001$), menghasilkan kecepatan putar maksimum 406 RPM (33% lebih tinggi dari 2 bilah, 10% dari 6 bilah) dan torsi 0,404 N·m (29% lebih tinggi dari 2 bilah, 40% dari 6 bilah) pada 8 m/s. Hal ini terjadi dikarenakan *overlap ratio optimal* dan meminimalisasi *negative torque*. Desain 4 bilah memungkinkan untuk pembangkit *mikrogrid* di wilayah berangin rendah. Untuk pengembangan selanjutnya diperlukan pengujian lapangan jangka panjang dan simulasi CFD untuk meningkatkan daya keluaran pada kondisi angin turbulen nyata.

Kata kunci: Savonius, Bilah turbin, Torsi, Kecepatan Putar.

Abstract

The utilization of wind energy through vertical-axis turbines such as the Savonius Type-L offers a promising solution for small-scale renewable energy. The Savonius Type-L turbine was varied with 2, 4, and 6 blades to evaluate performance at low wind speeds (6–8 m/s) in a wind tunnel. Experimental tests were conducted with 10 replications of each condition. Wind speed was measured using a hot-wire anemometer, turbine rotational speed was recorded with a tachometer, and torque was calculated via the startup time method. Statistical analysis was performed using one-way ANOVA followed by Tukey's post-hoc test. Results showed that the 4-blade configuration was significantly superior ($p < 0.0001$), achieving a maximum rotational speed of 406 RPM (33% higher than the 2-blade and 10% higher than the 6-blade configuration) and a torque of 0.404 N·m (29% higher than the 2-blade and 40% higher than the 6-blade configuration) at 8 m/s. This occurs due to the optimal

overlap ratio and the minimization of negative torque. The 4-blade design is suitable for microgrid power generation in low-wind-speed regions. Future development requires long-term field testing and CFD simulations to increase output power under real turbulent wind conditions.

Keywords: *Savonius, Turbine blade, Torque, Rotational Speed.*

1. Pendahuluan

Ketersediaan energi bersih dan terbarukan kini menjadi isu krusial di seluruh dunia. Di tengah tantangan perubahan iklim yang semakin nyata serta cadangan bahan bakar fosil yang terus menipis, pencarian sumber energi alternatif menjadi sangat mendesak. Energi angin, sebagai salah satu sumber daya alam yang melimpah dan tidak pernah habis, menawarkan solusi yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi global. Dalam konteks pemanfaatan energi angin, turbin angin sumbu vertikal (vertical axis wind turbines/VAWTs) semakin mendapat perhatian. VAWTs, khususnya turbin Savonius, menonjol karena kemampuannya beroperasi secara efektif bahkan pada kecepatan angin rendah serta dapat menangkap angin dari berbagai arah. Karakteristik ini menjadikan turbin Savonius sangat ideal untuk aplikasi skala kecil dan menengah, seperti di perkotaan, daerah terpencil, atau sebagai sumber daya pelengkap di lokasi yang sulit dijangkau jaringan listrik utama [1]. Inovasi dalam desain bilah, seperti pengembangan turbin Savonius tipe L, muncul sebagai respons terhadap kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi aerodinamika dan mengatasi keterbatasan model Savonius konvensional. Modifikasi bentuk bilah ini dapat menghasilkan daya yang lebih tinggi serta kinerja yang lebih stabil pada berbagai kondisi angin [2], [3].

Penelitian sebelumnya mengenai turbin Savonius secara umum menunjukkan bahwa perubahan jumlah bilah dapat memengaruhi secara substansial karakteristik torsi dan koefisien daya yang dihasilkan [3], [4]. Temuan ini menekankan pentingnya konfigurasi bilah

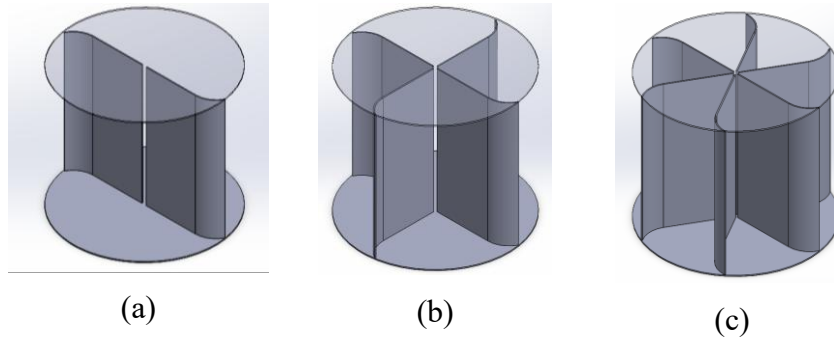
dalam menentukan efisiensi turbin. Namun, studi eksperimental yang secara spesifik menganalisis pengaruh variasi jumlah bilah pada turbin Savonius tipe L terhadap kinerja pada kecepatan angin yang berbeda masih terbatas. Padahal, interaksi kompleks antara jumlah bilah dan fluktuasi kecepatan angin merupakan faktor penentu utama efisiensi transfer energi dari angin ke rotor turbin, yang pada akhirnya memengaruhi total output daya listrik yang dihasilkan [5], [6].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui analisis eksperimental terhadap kinerja turbin angin Savonius tipe L dengan memvariasikan jumlah bilah serta mengujinya pada rentang kecepatan angin yang berbeda. Kebaruan utama penelitian ini terletak pada pendekatan eksperimental yang sistematis untuk mengkuantifikasi pengaruh interaksi antara konfigurasi bilah tipe L dan variasi kecepatan angin terhadap kecepatan putar serta torsi yang belum dieksplorasi secara mendalam pada desain tipe L. Hasil penelitian ini akan mengidentifikasi konfigurasi jumlah bilah optimal untuk kondisi angin spesifik, sehingga memberikan kontribusi signifikan bagi literatur ilmiah dan pengembangan praktis turbin angin Savonius tipe L yang lebih efisien dan andal. Temuan ini menjadi landasan penting bagi perancangan dan implementasi sistem energi angin berskala kecil yang lebih efektif, sekaligus mendukung percepatan transisi global menuju sumber energi terbarukan yang bersih dan berkelanjutan [7], [8], [9].

2. Metode

Penelitian ini akan dilakukan secara eksperimental untuk menganalisis kinerja turbin angin Savonius Tipe-L dengan variasi jumlah bilah pada kecepatan angin yang berbeda. Pendekatan ini memungkinkan pengukuran

langsung parameter operasional dan evaluasi kinerja di bawah kondisi terkontrol[10]. Adapun desain turbin yang kami gunakan, yakni Turbin Angin Savonius Type-L dengan tinggi turbin 400 mm (H) dan diameter 400 mm (D). Turbin dirancang dengan menggunakan bilah 2, 4, dan 6 seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. . Desain Turbin Angin Savonius, a) Turbin 2 Bilah, b) Turbin 4 Bilah, c) Turbin 6 Bilah

Pengujian dalam penelitian ini dilakukan pada alat uji terowongan angin (*wind tunnel*) supaya menghasilkan aliran udara yang seragam dan terkontrol. Sekema pengujian dalam penelitian ini diperlihatkan pada gambar 2. Dalam skema pengujian tersebut terdapat beberapa komponen utama yang kami gunakan yakni blower ukuran 18” dengan Power 1,5 Kw dan *air flow max* 200 m^3/min , tes section ukuran 0,5 x 0,5 m dan *inverter* kapasitas 2,2 kW untuk mengatur

kecepatan blower. Bilah rotor pada pengujian tersebut menggunakan bahan PVC, hal ini dipilih dikarenakan kemudahan dalam proses fabrikasi, sedangkan poros rotor terbuat dari baja ST 42. Untuk menopang beban torsi yang dihasilkan oleh putaran bilah turbin, rotor diposisikan pada *test section* yang ditopang oleh *pillow block* diatas dan bawah untuk meminimalkan gaya gesek.



Gambar 2. Skema Alat Pengujian, 1) Pillow Block; 2) Test Section dengan turbin; 3) Honeycomb section; 4) Difusser section; 5) Blower; 6) DC Generator; 7) Beban Lampu; 8) Saklar on/off

Prosedur eksperimen dilakukan secara sistematis untuk setiap konfigurasi jumlah bilah.

Pertama, turbin Savonius Tipe-L dengan jumlah bilah yang diuji akan dipasang dengan kokoh

pada poros pengujian di dalam bagian *test section wind tunnel*, serta dipastikan pula rotor dapat berputar bebas. Pengujian akan dilakukan pada kecepatan angin diskrit, yaitu 6,7 dan 8 m/s. Untuk setiap kecepatan angin yang ditetapkan, terowongan angin akan dioperasikan hingga aliran udara mencapai kondisi stabil [11]. Selanjutnya, sistem beban akan diberikan untuk mendapatkan data kecepatan putar turbin, mulai dari kondisi *startup* hingga putaran maksimum tanpa beban.

Kecepatan angin diukur dengan anemometer tipe hot wire digital dengan resolusi 0,001 m/s dan akurasi alat $\pm 3\% \pm 0,1$ dgts. Alat ini dikalibrasi pada rentang kecepatan angin 6-8 m/s dengan 3 titik kecepatan, masing-masing diulang sebanyak 3 kali.

Pada setiap titik pengukuran beban, data kecepatan angin (v), torsi (T), kecepatan putar (n), waktu yang dibutuhkan mulai dari kondisi *startup* hingga putaran turbin maksimum (t), kuat arus (I) dan tegangan (V) akan dicatat secara manual.

Torsi (τ) dihitung tidak langsung menggunakan persamaan:

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (1)$$

Momen inerti turbin dihitung menggunakan persamaan

$$I = m \cdot r^2 \quad (2)$$

Massa (m) dan jari-jari turbin (r) dalam perhitungan tersebut didapatkan dari pengukuran langsung terhadap massa dan jari-jari turbin menggunakan timbangan (resolusi 0,1 g) dan jangka sorong (akurasi $\pm 0,01$ mm). Kecepatan sudut (α) pada perhitungan torsi didapatkan dari persamaan:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot n}{t \cdot 30} \quad (4)$$

Waktu (t) dalam persamaan tersebut dihitung dengan stopwatch (resolusi 0,01 s) dan diulang sebanyak 10 kali hingga kecepatan putar maksimum turbin. Data kecepatan putar diambil dengan *tachometer* yang memiliki akurasi alat $\pm 5\%$. Selanjutnya nilai ketidakpastian pengukuran tipe A didapatkan dari pengulangan dan nilai tipe B didapatkan dari spesifikasi tiap instrumen. Sehingga ketidakpastian gabungan untuk kecepatan angin sebesar 0,14 m/s ($\pm 0,28$ m/s diperluas, $k=2$) dan untuk torsi $\pm 0,012$ N.m ($\pm 10\%$ pada 0,12 N.m)

Analisa Statistik

Data yang dicatat sebanyak 10 kali pengulangan selanjutnya dianalisis menggunakan standar deviasi (σ) untuk mengevaluasi dispersi data. Uji *one-way* ANOVA dengan tingkat signifikansi (P value) $< 0,05$ digunakan untuk menentukan perbedaan signifikan antar konfigurasi jumlah bilah pada setiap kecepatan angin. Uji post-hoc Tukey dilakukan jika hasil ANOVA signifikan.

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian eksperimental turbin angin Savonius tipe L dengan variasi jumlah bilah (2, 4, dan 6 bilah) pada kecepatan angin 6, 7, dan 8 m/s disajikan pada Tabel 1.

Pencatatan data kecepatan putar (n) dan torsi (τ) dilakukan 10 pengulangan per kondisi, dengan torsi diperoleh melalui metode *startup time* untuk memenuhi persamaan torsi ($\tau = I \cdot \alpha$), di mana momen inersia (I) ditentukan dengan perhitungan secara experimental.

Tabel. 1. Nilai Unjuk Kerja Turbin Savonius dengan Variasi Bilah

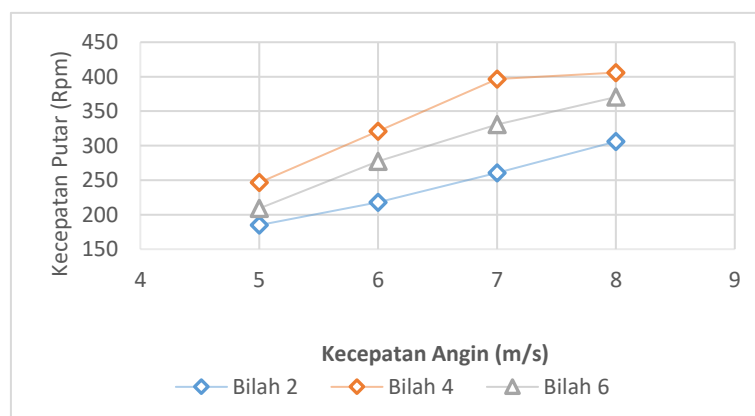
Jumlah Bilah	v_a (m/s)	n (Rpm)	m (kg)	r (m)	t (s)	I (kg.m ²)	α (rad/s ²)	τ (N.m)
2	6	184,870	2,49	0,2	12,07	0,099	1,603	0,159

Jumlah Bilah	v_a (m/s)	n (Rpm)	m (kg)	r (m)	t (s)	I (kg.m ²)	α (rad/s ²)	τ (N.m)
4	7	217,890	2,85	0,2	11,50	0,099	1,983	0,197
	8	260,500			11,10	0,099	2,456	0,244
	6	246,520			19,00	0,114	1,358	0,155
	7	321,050			17,00	0,114	1,977	0,226
	8	396,500			15,00	0,114	2,767	0,316
	6	209,000			29,70	0,128	0,737	0,095
6	7	277,380	3,21	0,2	21,20	0,128	1,369	0,176
	8	330,680			18,30	0,128	1,891	0,243

Analisis Kecepatan Putar Turbin

Grafik perbandingan kecepatan putar terhadap kecepatan angin ditunjukkan pada Gambar 3. Data kecepatan putar menunjukkan korelasi positif kuadratik dengan kecepatan angin pada semua konfigurasi, sesuai dengan hukum aerodinamika $P \propto v^3$ [12]. Uji ANOVA *one way* mengonfirmasi perbedaan signifikan antar konfigurasi bilah pada kecepatan angin 6 m/s ($F = 16.137,90$; $p < 0,0001$), 7 m/s ($F = 7.484,52$; $p < 0,0001$), dan 8 m/s ($F = 2.127,93$; $p < 0,0001$). Uji post-hoc Tukey menunjukkan bahwa konfigurasi 4 bilah secara signifikan unggul dibandingkan 2 bilah (mean difference: +30,66 hingga +89,31 RPM; $p < 0,001$) dan 6 bilah (mean difference: +18,00 hingga +111,82 RPM; $p < 0,001$) pada semua tingkat kecepatan angin yang diuji.

Keunggulan ini disebabkan oleh optimasi jarak alir (overlap ratio $\approx 0,25$) dan peningkatan frekuensi sudut serang optimal. Pada 4 bilah, setiap bilah lebih sering berada pada posisi drag maksimum ($\theta \approx 0^\circ-90^\circ$), sehingga meningkatkan transfer momentum angular. Sebaliknya, konfigurasi 2 bilah memiliki jarak alir berlebih ($>0,4$), menyebabkan kehilangan energi akibat aliran bocor dan turbulensi samping. Konfigurasi 6 bilah, meskipun meningkatkan luas sapuan, menciptakan hambatan interferensi antar bilah dan momen inersia tinggi, sehingga menghambat akselerasi rotasi pada kecepatan angin rendah hingga menengah.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan Putar Turbin Pada Kecepatan Angin Yang Berbeda

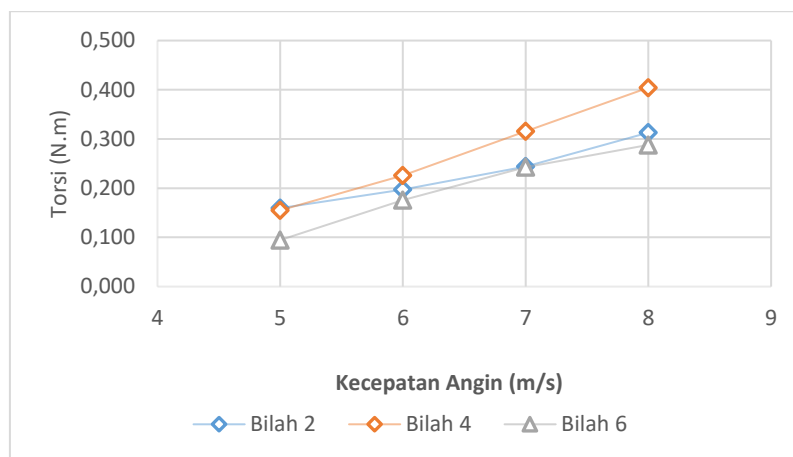
Analisa Torsi Turbin

Grafik hubungan torsi terhadap kecepatan angin ditunjukkan pada Gambar 4. Pada data tersebut

menunjukkan bahwa torsi meningkat secara kuadratik seiring kecepatan angin ($T \propto v^2$), sesuai dengan ketergantungan gaya drag

terhadap kecepatan aliran [13], [14]. Uji ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan antar konfigurasi pada 6 m/s ($F = 1.915,16$; $p < 0,0001$), 7 m/s ($F = 1.466,75$; $p < 0,0001$), dan 8 m/s ($F = 159,51$; $p < 0,0001$). Uji *post-hoc Tukey* mengonfirmasi konfigurasi 4 bilah dengan mean difference +0,8061 hingga +1,0529 N·m terhadap 2 bilah ($p < 0,001$) dan +0,1853 hingga +0,6607 N·m terhadap 6 bilah ($p < 0,001$). Keunggulan 4 bilah dipengaruhi oleh momen inersia sedang yang memungkinkan percepatan

sudut tinggi ($\alpha = T/I$) tanpa mengorbankan stabilitas rotasi. Konfigurasi 6 bilah, walaupun memiliki luas proyeksi lebih besar, mengalami penurunan torsi efektif akibat gaya drag terdistribusi berlebih dan peningkatan *negative torque* pada bilah belakang. Sementara itu, 2 bilah menghasilkan torsi rendah karena kurangnya kontinuitas gaya drag selama satu putaran penuh.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Nilai Torsi Pada Kecepatan Angin Yang Berbeda

3. Kesimpulan

Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa Konfigurasi empat bilah pada turbin Savonius tipe L terbukti memberikan kinerja rotasi dan momen puntir paling optimal di seluruh rentang kecepatan angin 5–8 m/s, berkat keseimbangan aerodinamis yang meminimalkan interferensi aliran dan *negative torque* tanpa mengorbankan percepatan sudut.

Dalam uji experimental yang dilakukan, desain ini memungkinkan pembangkit listrik *mikrogrid* yang andal di wilayah berangin rendah, dengan start-up cepat dan stabilitas beban mekanis tinggi, sehingga cocok untuk aplikasi pedesaan, stasiun pengisian daya portabel, atau sistem hybrid surya-angin [15].

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan pengujian lapangan jangka panjang guna mengevaluasi ketahanan material dan efisiensi konversi listrik aktual, serta simulasi CFD *multi-phase* untuk mengoptimalkan profil bilah dan *overlap ratio* pada variasi sudut serang dinamis, yang dapat meningkatkan daya keluaran pada kondisi angin turbulen nyata [16].

Daftar Pustaka

- [1] T. Zhao, X. Zhang, and M. Zheng, "Blade number effect on the optimal energy efficiency for a modified Savonius rotor," *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy*, vol. 173, no. 3, pp. 101–108, Aug. 2020, doi: 10.1680/jener.19.00031.
- [2] M. Rizky Ananda, "Optimizing Savonius Wind Turbine Performance: Analysis of Blade Number's Influence," 2024. [Online]. Available: www.ejournal.isha.or.id/index.php/Mekintek
- [3] M. Karjadi, "Desain Turbin Angin Modern sebagai upaya Meningkatkan Efisiensi dan

- Kinerja Energi Angin,” *Rana Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 7, no. 1, pp. 457–467, 2024, doi: 10.38035/rj.v7i1.
- [4] B. Barlin, C. O. Pratama, and K. Sasiwimonrit, “THE EFFECT OF BLADE CURVATURE ANGLE OF SAVONIUS WIND TURBINE L-TYPE ON THE PERFORMANCE,” *Indonesian Journal of Engineering and Science*, vol. 2, no. 1, 2021, doi: 10.51630/ijes.v2i1.13.
- [5] M. Zulianto and I. H. Siregar, “Uji Eksperimen Model Turbin Angin Swirling Savonius dengan Deflektor Diam Menggunakan Terowongan Angin,” *Jurnal Teknik Mesin UNESA*, vol. 7, no. 3, pp. 141–148, Oct. 2019.
- [6] W. Junior, S. Tangkuman, and T. Arungpadang, “Perancangan Rotor Turbin Angin Savonius Tipe-L Untuk Pembangkit Listrik,” *Jurnal Poros Teknik Mesin Unsrat*, vol. 11, no. 1, pp. 100–113, Jul. 2022.
- [7] L. B. Kothe, S. V. Möller, and A. P. Petry, “Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine,” *Renew Energy*, vol. 148, pp. 627–638, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.151.
- [8] W. Hardi *et al.*, “Desain dan Optimasi Turbin Angin Sumbu Vertikal Kombinasi Type Darius dan Type Savonius untuk Meningkatkan Efisiensi Pembangkit Listrik Sumber Energi Terbarukan,” *Rekayasa Energi Manufaktur Jurnal*, vol. 9, no. 1, pp. 2528–3723, 2024, doi: 10.21070/rem.v9i1.1693.
- [9] M. Firman, I. Kalimantan Jl Adhyaksa No, K. Tangi Banjarmasin, and K. Selatan, “Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius Tipe L dengan Variasi Jarak Overlap,” *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, vol. 8, no. 1, pp. 28–35, Apr. 2024.
- [10] K. S. Rasyid, S. Sudarno, and W. T. Putra, “PENGARUH VARIASI JUMLAH STAGE TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL SAVONIUS TIPE- L,” *KOMPUTEK*, vol. 2, no. 1, 2018, doi: 10.24269/jkt.v2i1.62.
- [11] M. R. Saputra, N. Kholis, and M. M. Rosadi, “Pengaruh diameter dan jumlah sudu turbin angin savonius tipe L terhadap unjuk kerja yang dihasilkan,” *ARMATUR : Artikel Teknik Mesin & Manufaktur*, vol. 1, no. 2, 2020, doi: 10.24127/armatur.v1i2.333.
- [12] D. Wahyudi, B. Rollastin, and N. Pranandita, “Rancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin dan Surya dengan Turbin Angin Sumbu Vertikal Savonius Menggunakan Bentuk Sudu L dengan Kapasitas Daya Sebesar 746,5 Wh,” *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, vol. 1, no. 2, 2023, doi: 10.33504/jitt.v1i2.57.
- [13] R. A. Jessam, “Experimental Study of Wind Turbine Power Generation Utilizing Discharged Air of Air Conditioner Blower,” *Evergreen*, vol. 9, no. 4, 2022, doi: 10.5109/6625722.
- [14] W. Yudha Santika, H. Saputra, and T. Rusianto, “Desain Dan Simulasi Turbin Angin Savonius Dengan Konfigurasi Rotor Tipe L Dan Tipe Helix Sebagai Sumber Listrik Lampu PJU Pelabuhan Perikanan Cikidang Pangandaran Jawa Barat,” *J Teknol*, vol. 15, no. 2, 2022, doi: 10.34151/jurtek.v15i2.3150.
- [15] W. Junior, S. Tangkuman, and T. Arungpadang, “Perancangan Rotor Turbin Angin Savonius Tipe-L Untuk Pembangkit Listrik,” *Jurnal Poros Teknik Mesin Unsrat*, vol. 11, no. 1, 2022.
- [16] Y. D. Herlambang *et al.*, “Experimental and Simulation Investigation on Savonius Turbine: Influence of Inlet-Outlet Ratio Using a Modified Blade Shaped to Improve Performance,” *Evergreen*, vol. 9, no. 2, 2022, doi: 10.5109/4794172.