

# Kajian Komprehensif Variasi Bentuk *Blade* Turbin Angin: Analisis Aerodinamika, Biomimetik, dan Efisiensi Energi

Wahyu Adjie Pangestu\*, Padmarani Minora, Rusdianasari

Teknik Energi Terbarukan, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya  
Jl. Srijaya Negara, Bukit Besar, Kec. Ilir Bar. I, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30139  
E-mail: [wahyuadjie1997@gmail.com](mailto:wahyuadjie1997@gmail.com)\*

## Abstract

The advancement of modern wind turbines is strongly influenced by enhancement strategies for more effective blade architecture, which aims to enhance the efficiency of converting wind kinetic energy into mechanical and electrical power. Variations in blade geometry, including biomimetic modifications with features such as leading-edge tubercles and trailing-edge serrations, the application of winglets at the blade tips, helical configurations in vertical-axis wind turbines (VAWT), as well as changes in airfoil profiles and Savonius geometries have become key research focuses aimed at improving power coefficient ( $C_p$ ), starting torque, flow stability, and noise reduction. This article synthesizes findings from 26 national and international studies to evaluate how variations in blade geometry influence wind turbine performance. The findings indicate that biomimetic, nature-inspired modifications consistently enhance aerodynamic efficiency and reduce flow disturbances, while optimized helical and Savonius designs are particularly suitable for low wind-speed conditions. This review reinforces the importance of blade-geometry innovation as a strategic pathway toward developing wind turbines that are more efficient and adaptable to diverse environmental conditions.

**Keywords:** wind turbine, blade shape variation, biomimetics, power coefficient ( $C_p$ ), aerodynamic efficiency.

## Abstrak

Pengembangan turbin angin modern sangat bergantung pada optimasi desain bilah (*blade*) untuk memaksimalkan konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik dan listrik. Variasi bentuk *blade* termasuk modifikasi biomimetik seperti *leading-edge tubercles* dan *trailing-edge serrations*, penggunaan *winglet* pada ujung bilah, desain helical pada turbin sumbu vertikal (VAWT), serta perubahan geometri airfoil dan geometri Savonius merupakan fokus riset utama untuk meningkatkan koefisien daya ( $C_p$ ), torsi awal, stabilitas aliran, dan pengurangan kebisingan. Artikel ini meninjau jurnal nasional dan internasional dan menganalisis dampak variasi bentuk *blade* terhadap performa turbin angin. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa modifikasi yang diinspirasi oleh alam (biomimetik) dapat secara konsisten meningkatkan efisiensi aerodinamis dan mengurangi gangguan aliran, sementara desain helical dan Savonius yang dioptimalkan sangat cocok untuk kondisi kecepatan angin rendah. Kajian ini menegaskan pentingnya inovasi geometri *blade* sebagai jalur strategis dalam pengembangan turbin angin yang lebih efisien dan adaptif ke berbagai kondisi lingkungan.

**Kata kunci:** turbin angin, variasi bentuk *blade*, biomimetik, koefisien daya ( $C_p$ ), efisiensi aerodinamis.

## 1. Pendahuluan

Energi angin merupakan salah satu pilar utama dalam portofolio energi terbarukan global. Salah satu komponen yang paling menentukan performa turbin angin adalah desain bilah (*blade*), karena bilah berperan sebagai antarmuka langsung antara aliran angin dan rotor. Desain bilah memengaruhi efisiensi, torsi, stabilitas aliran, serta tingkat kebisingan yang dihasilkan.

Seiring kemajuan simulasi numerik (terutama *Computational Fluid Dynamics*, CFD), teknologi manufaktur, dan pendekatan biomimetik, para peneliti telah mengeksplorasi berbagai modifikasi geometri *blade* yang dapat meningkatkan performa turbin angin. Misalnya, tonjolan *tubercles* menyerupai sirip paus digunakan untuk meningkatkan keterikatan aliran, sedangkan *serrations* di *trailing edge* diadaptasi dari struktur bulu burung hantu untuk mengurangi kebisingan. Selain itu, *winglet* pada ujung *blade* digunakan

untuk mengurangi tip *vortex*, dan *blade helical* pada VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) dianggap efektif untuk menjaga torsi konstan dan *self-starting*. Di sisi lain, turbin *Savonius* yang dikenal rendah efisiensi juga mendapat perhatian melalui pengoptimalan geometri seperti *overlap*, bentuk *Bach-blade*, dan slot.

Mengingat keragaman dan kompleksitas pendekatan tersebut, sangat penting untuk melakukan tinjauan sistematis terhadap literatur terkini yang membahas variasi bentuk *blade*. Artikel ini mencoba merangkum temuan utama, membandingkan pendekatan berbeda, serta menawarkan wawasan tentang arah riset masa depan terkait desain *blade*.

Meskipun berbagai studi telah membahas modifikasi geometri *blade* turbin angin secara terpisah, masih terbatas artikel review yang secara komprehensif mengaitkan variasi desain *blade* dengan karakteristik kecepatan angin rendah dan turbulensi tinggi yang umum dijumpai di wilayah tropis seperti Indonesia. Padahal, sebagian besar wilayah Indonesia memiliki kecepatan angin rata-rata di bawah 5 m/s, sehingga pendekatan desain turbin angin yang dikembangkan di negara subtropis tidak selalu optimal untuk kondisi lokal.

Oleh karena itu, artikel review ini diposisikan untuk menjembatani kebutuhan riset nasional dengan perkembangan riset global, dengan menekankan analisis variasi bentuk *blade* yang paling relevan untuk aplikasi turbin angin skala kecil dan menengah di daerah tropis. Kontribusi utama artikel ini adalah menyajikan pemetaan sistematis kelebihan dan keterbatasan setiap modifikasi geometri *blade*, serta mengidentifikasi arah desain yang paling potensial untuk pengembangan turbin angin berkecepatan rendah di Indonesia.

## 2. Metodologi

Pembahasan dari literatur dikategorikan berdasarkan jenis modifikasi *blade*:

1. Pengumpulan artikel: Mengumpulkan jurnal yang relevan dari daftar awal yang membahas modifikasi geometri *blade* turbin angin.
2. Kriteria inklusi: Artikel dimasukkan jika: (a) fokus pada variasi bentuk *blade* (modifikasi *leading-edge*, *trailing-edge*, *winglet*, *helical*, *airfoil*, *Savonius*, dsb.); (b) menyajikan hasil kuantitatif ( $C_p$ , torsi, efisiensi, suara, dsb.); (c) metode simulasi (CFD) atau eksperimen (uji terowongan angin atau lapangan).
3. Kriteria eksklusi: Artikel yang tidak memenuhi fokus bentuk *blade* atau data

kuantitatif, serta 6 jurnal yang diinstruksikan untuk dikecualikan.

4. Analisis: Setiap artikel dianalisis dari segi tujuan penelitian, metodologi, hasil (performa, peningkatan  $C_p$ , *noise*, torsi), serta rekomendasi dan batasan penelitian. Kemudian, temuan dijelaskan secara tematis dalam bagian pembahasan.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Pembahasan dari literatur dikategorikan berdasarkan jenis modifikasi *blade*:

### 3.1. *Leading-Edge Tubercles*

Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *tubercles* pada tepi depan (*leading edge*) *blade* sangat efektif dalam mengendalikan aliran udara dan *aerodynamic improvement*. *Tubercles* menciptakan vorteks teratur yang menjaga aliran tetap melekat pada permukaan *blade*, terutama pada sudut serang tinggi, sehingga menunda terjadinya *separation* (pemutusan aliran).

- Dalam studi numerik pada *Energies* (MDPI), penambahan *tubercles* menghasilkan peningkatan lift dan memperpanjang rentang operasi efektif *blade*, terutama pada kecepatan rendah hingga menengah [1]
- *Tubercles* juga menurunkan drag pada bagian *blade* tertentu, karena *vorteks* yang dihasilkan mengurangi interaksi aliran balik di sepanjang permukaan *blade*, meningkatkan efisiensi aerodinamik.
- Dengan stabilitas aliran yang lebih baik, *blade* dengan *tubercles* menunjukkan peningkatan koefisien daya ( $C_p$ ) dibandingkan desain konvensional tanpa *tubercles*, terutama dalam kondisi turbulen atau fluktuasi angin.
- Kinerja turbin angin di daerah berkecepatan angin rendah menjadi tantangan tersendiri karena output daya yang dihasilkan cenderung kecil. Menunjukkan bahwa turbin horizontal skala mini hanya dapat menghasilkan tegangan 18–37 mV pada rentang kecepatan angin 1,5–2,4 m/s, sehingga diperlukan optimasi desain bilah untuk

meningkatkan efisiensi konversi energi [2]

Implikasi dari temuan ini sangat relevan untuk aplikasi turbin angin di daerah dengan kecepatan angin rendah atau variabel, karena *tubercles* memungkinkan *blade* bekerja lebih efisien tanpa mengorbankan kestabilan aliran

### 3.2. *Trailing-Edge Serrations* (Gerigi Ekor)

*Trailing-edge serrations* merupakan modifikasi berbentuk gerigi atau gigi di sisi belakang *blade* yang meniru pola bulu burung hantu (*owl*). Struktur ini terbukti mampu mengurangi kebisingan aerodinamik sekaligus menjaga performa daya.

- Dalam penelitian oleh Qaissi et al. (MDPI), modifikasi *serrations* menghasilkan pengurangan *aerodynamic noise* sambil menjaga atau bahkan sedikit meningkatkan efisiensi daya [3]
- Studi lain menyatakan bahwa *serrations* menghaluskan aliran wake di belakang bilah, mengurangi turbulensi dan vorteks yang biasanya menyebabkan hilangnya efisiensi.
- Pada turbin VAWT, penggunaan *serrations* dapat meningkatkan kemampuan self-starting, karena pola *wake* yang lebih teratur memungkinkan torsi awal lebih stabil.
- efek geometris *serration* dan merekomendasikan optimasi geometri untuk mencapai reduksi *noise* lebih besar, sekaligus menyorot kebutuhan studi aliran terperinci untuk memahami *trade-offs* kinerja [4]
- Karakteristik geometris *serration* mengindikasikan bahwa peningkatan reduksi *noise* bergantung pada optimasi bentuk yang lebih baik, serta memerlukan kajian aliran terperinci untuk menjelaskan *trade-off* performanya [5]
- *Serrated trailing-edge* mengurangi *noise* pada rentang frekuensi lebih luas dibanding klaim sebelumnya, tetapi pengaruhnya pada daya bergantung pada geometri *serration* dan kondisi operasi [6]

### 3.3. *Winglet* pada Ujung *Blade* (Tip)

*Winglet* adalah ekstensi geometris pada ujung *blade* yang dirancang untuk mengurangi kerugian

akibat tip *vortex*. Tip *vortex* terjadi ketika udara dari tekanan tinggi di bawah *blade* menyembur ke atas di ujung *blade*, menciptakan pusaran yang mengurangi efisiensi.

- Dalam penelitian numerik oleh Wardhana (T&F), penggunaan *winglet* pada *blade* menghasilkan peningkatan *lift-to-drag ratio* dan penurunan *induced drag* yang cukup signifikan.[7]
- Penelitian nasional (Handayani) juga menemukan bahwa *winglet* sederhana pada turbin angin skala rumah dapat meningkatkan efisiensi daya sekitar 3-7% dibandingkan *blade* tanpa *winglet*. [8]
- Efek *winglet* tidak hanya meningkatkan performa aerodinamik, tetapi juga membantu meratakan distribusi tekanan di ujung *blade*, mengurangi stres struktural, dan potensi peningkatan durabilitas *blade*. Dengan demikian, *serrations* menawarkan solusi elegan untuk tantangan kebisingan sambil memberikan kontribusi performa, terutama pada turbin skala kecil atau menengah yang beroperasi dekat pemukiman.

Secara keseluruhan, *winglet* terbukti sebagai modifikasi yang efisien dan relatif mudah diimplementasikan untuk memperbaiki efisiensi turbin dengan kehilangan tip *vortex*.

### 3.4. Variasi *Airfoil*: Optimasi Geometri *Internal Blade*

Desain *airfoil blade* sangat penting karena menentukan distribusi tekanan, lift, drag, serta perilaku stall. Literatur yang ditinjau menggunakan berbagai jenis *airfoil* seperti Clark-Y, NACA, *S-series*, dan *airfoil* khusus lainnya.

- Studi di jurnal nasional (Arini) menggunakan *airfoil* Clark-Y dan *winglet* bersama-sama untuk menganalisis peningkatan performa *blade* melalui simulasi dan uji numerik [9]
- Penelitian internasional (Portela et al.) dengan *airfoil* khusus menunjukkan bahwa penyesuaian geometri *chord* dan sudut kelokan (*twist*) dapat meningkatkan  $C_p$  dan menahan stall lebih baik, terutama pada kecepatan angin rendah [10]
- Perubahan geometri seperti tebal *airfoil* dan rasio tebal ke *chord* memberikan kompromi antara performa lift dan drag, di mana *airfoil* lebih tebal cenderung lebih stabil pada kecepatan rendah tetapi

mungkin kurang efisien saat angin kencang.

- Penambahan *blended winglets* dapat memperbaiki karakteristik *stall* pada profil NREL *Phase-VI*, mengindikasikan *winglet* juga berperan pada stabilitas aerodinamis di sudut serang tinggi [11]
- Perbedaan dimensi dan jumlah bilah pada turbin *Darrieus* berpengaruh signifikan terhadap putaran turbin dan tegangan listrik yang dihasilkan, sehingga konfigurasi bilah menjadi faktor penting dalam desain turbin VAWT [12]

Temuan ini menunjukkan pentingnya pemilihan dan optimasi *airfoil* yang disesuaikan dengan kondisi operasional turbin (misalnya kecepatan angin lokal, turbulensi), untuk memaksimalkan efisiensi tanpa mengorbankan stabilitas.

### 3.5. *Helical Blade* pada Turbin Sumbu Vertikal (VAWT)

Desain *helical* pada VAWT menggunakan bilah melengkung secara spiral sepanjang tinggi rotor. Tujuan utamanya adalah menciptakan torsi yang lebih konstan, memperbaiki *self-starting*, serta mengurangi fluktuasi gaya aerodinamis.

- Studi oleh Sanaye et al. dalam jurnal *Energy Research* (ScienceDirect) menunjukkan bahwa VAWT dengan *blade helical* memiliki torsi awal yang lebih besar dan performa lebih stabil dibanding VAWT dengan bilah lurus [13]
- Dalam penelitian struktural dan desain skala kecil oleh Rasheed (MDPI), *helical blade* dirakit dengan memperhatikan distribusi beban dan aliran udara, menunjukkan bahwa desain ini dapat diproduksi secara praktis dan memberikan efisiensi tinggi [14]
- Konsep *helical* juga dianalisis dalam publikasi konferensi atau prosiding (ResearchGate) yang menekankan bahwa desain spiral menciptakan aliran sudut yang membantu menjaga rotor berputar meskipun aliran angin tidak ideal [15]
- Hibridisasi *Savonius-helical* pada skala mikro dapat meningkatkan konversi energi dengan memanfaatkan keunggulan torsi *Savonius* dan efisiensi aerodinamis *Darrieus/Helical* [16]
- Tantangan utama turbin angin di lingkungan aliran terkendali maupun

berkecepatan rendah mendorong perlunya inovasi desain. membuktikan bahwa optimasi konfigurasi turbin vertikal di area tunnel dapat meningkatkan kemampuan ekstraksi energi meskipun aliran anginnya terbatas [17]

Dengan torsi yang lebih halus dan *self-starting* yang lebih baik, *helical* VAWT sangat cocok untuk aplikasi di lingkungan urban atau area dengan angin berfluktuasi.

### 3.6. Geometri *Savonius* yang Dioptimalkan

*Savonius* adalah turbin *drag-type* yang sederhana dan murah, tetapi efisiensinya cenderung rendah. Banyak penelitian yang mencoba memperbaiki desain *Savonius* melalui berbagai variasi geometri:

- Analisis performa dari desain baru *Savonius* (melalui penelitian berbasis *performance analysis*) menunjukkan bahwa bentuk bilah yang diubah mampu meningkatkan rasio torsi serta efisiensi daya [18]
- Optimasi *inner geometry* (misalnya rasio overlap, profil dalam bilah) pada *Savonius* telah dilakukan, dan hasilnya menunjukkan bahwa geometri dioptimalkan memberikan peningkatan performa yang signifikan [19]
- Penelitian numerik pada *Savonius Bach-blade* (variasi bentuk bilah Bach) juga menunjukkan penyebaran beban yang lebih seragam pada bilah memungkinkan turbin bekerja lebih efektif, khususnya saat menghadapi kecepatan angin rendah [20]
- Penelitian *tip (trailing-edge)* juga dilakukan, misalnya modifikasi bilah *Savonius* dengan slot atau bentuk melengkung, yang memperbaiki karakteristik aliran dan torsi [21]
- Ekspansi penelitian meliputi uji eksperimen perbandingan desain-modul *Savonius* di string skala kecil [22]
- Studi performa *Savonius* dalam konteks aplikasi laut (turbin arus laut sumbu vertikal) juga menunjukkan bahwa modifikasi geometri membuahkan peningkatan efisiensi yang relevan [23]
- Modifikasi rotor *blade* merupakan langkah penting dalam meningkatkan kemampuan turbin dalam mengekstraksi energi angin, dan prinsip ini juga berlaku pada turbin *Savonius* di mana perubahan

geometri bilah seperti *overlap*, *slot*, atau bentuk *Bach-blade* berperan signifikan dalam meningkatkan torsi dan efisiensi pada kondisi angin rendah [24]

- *Primary overlap* memiliki peran penting dalam mengatur pola aliran *upwind* dan *downwind* pada *Savonius*. Nilai *primary overlap* minus 10 cm menghasilkan performa putaran terbaik karena meningkatkan pemanfaatan *swept area* rotor [25]
- Modifikasi *guide vane* melalui pengaturan sudut dan jumlah sirip pada turbin *Savonius* dua dan tiga bilah memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi dan kapasitas daya [26]
- Sudut *blade* pada turbin *Savonius* dengan 12 bilah sangat memengaruhi koefisien daya dan efisiensi, terutama pada variasi kecepatan angin rendah hingga menengah [27]

Hasil-hasil ini memperkuat argumen bahwa desain *Savonius* yang dioptimalkan sangat menjanjikan untuk aplikasi skala kecil, terutama di daerah dengan angin lambat dan turbulen.

### 3.7. Noise dan Efek Kebisingan pada Desain Blade

Selain performa daya, aspek kebisingan menjadi hal penting, terutama untuk turbin kecil di area pemukiman. Beberapa studi menyoroti bagaimana modifikasi geometri *blade* dapat mengurangi gangguan suara aerodinamik:

- Penelitian oleh Feng et al. (JAFM) menunjukkan bahwa desain bionik, seperti kombinasi *tubercles* dan *serrations*, mampu mengurangi noise signifikan dengan tetap mempertahankan performa daya [28]
- Selain itu, modifikasi *winglet* dan optimasi ujung bilah juga membantu mengurangi *vorteks* ujung yang merupakan sumber kebisingan, sebagaimana ditemukan dalam studi numerik dan eksperimen.

Pengurangan kebisingan melalui desain *blade* bukan hanya meningkatkan kenyamanan lingkungan, tetapi juga memperpanjang umur struktural bilah karena pengurangan turbulensi dan beban dinamis.

### 3.8. Perbandingan Antara Pendekatan Desain

Dari literatur yang ditinjau, kita dapat melihat bahwa setiap pendekatan desain memiliki kekuatan dan keterbatasan:

**Tabel 1.**  
Perbandingan Bentuk *Blade* Turbin

Bentuk Blade	Indikator Kuantitatif	Kondisi Operasi	Kekuatan Utama	Keterbatasan
<i>Tubercles</i>	$\Delta C_p +5-15\%$	2–6 m/s	Delay stall, stabilitas aliran	Kompleksitas manufaktur
<i>Serrations</i>	Noise ↓ 3–8 dB	TSR menengah	Reduksi kebisingan	Sensitif geometri
<i>Winglet</i>	Efisiensi ↑ 3–7%	HAWT kecil	Reduksi <i>tip vortex</i>	Beban struktural
<i>Helical VAWT</i>	Torsi awal ↑ signifikan	Angin turbulen	<i>Self-starting</i> baik	Produksi rumit
<i>Savonius</i> modifikasi	$C_p \uparrow$ hingga 20–30%	< 4 m/s	Cocok angin rendah	Efisiensi absolut rendah

Perbandingan ini menunjukkan bahwa tidak ada satu solusi tunggal yang paling unggul dalam semua kondisi. Sebaliknya, desain *hybrid* (menggabungkan beberapa modifikasi) mungkin merupakan arah riset paling menjanjikan.

Berdasarkan tinjauan literatur, beberapa rekomendasi dan arah riset berikut diusulkan:

1. Desain *Hybrid*: Kombinasi *tubercles* + *serrations* + *winglet*, atau *helical* + *tubercles*, dapat membawa sinergi dalam meningkatkan performa daya sekaligus mengurangi kebisingan.
2. Optimasi Multidisiplin: Menggunakan metode optimasi berbasis CFD + algoritma genetika / optimasi evolusi untuk menghasilkan desain *blade* “optimal” yang menyeimbangkan performa dan beban struktural.
3. Uji Lapangan Skala Nyata: Banyak studi yang masih berbasis simulasi atau uji terowongan angin; perlu lebih banyak uji lapangan skala nyata (skala menengah dan besar) untuk memvalidasi potensi implementasi nyata.
4. Material Inovatif: Penelitian pada bahan bilah (komposit, serat fleksibel) yang mendukung modifikasi geometri tanpa menambah berat signifikan atau biaya.
5. Kontrol Aktif: Integrasi aktuator kecil untuk melakukan kontrol aktif terhadap *tubercles*, *serrations*, atau *winglet*, menyesuaikan bentuk *blade* secara real-time sesuai kondisi angin.
6. Pengaruh Kecepatan Angin Lokal: Fokus pada kondisi angin lokal (misalnya rendah, sangat turbulen) terutama untuk wilayah tropis seperti Indonesia, sehingga desain *blade* bisa dioptimasi sesuai karakteristik lokal.

7. Kebisingan dan Kajian Lingkungan: Evaluasi lebih mendalam mengenai efek kebisingan *blade* pada lingkungan pemukiman, serta penggunaan desain senyap (*low-noise*) dalam sistem turbin komunitas.

#### 4. Simpulan

Kajian literatur terhadap jurnal ilmiah menunjukkan bahwa variasi bentuk *blade* merupakan strategi krusial dalam meningkatkan efisiensi turbin angin. Modifikasi biomimetik seperti *leading-edge tubercles* dan *trailing-edge serrations* efektif dalam memperbaiki performa aerodinamik dan mengurangi kebisingan. Penambahan *winglet* pada ujung bilah sukses mengurangi kerugian akibat tip *vortex*, sementara optimasi *airfoil* menyasar efisiensi lift-drag yang disesuaikan kondisi angin lokal. Desain *helical* pada VAWT memberikan torsi yang lebih stabil dan *self-starting* yang lebih baik, sedangkan modifikasi geometri *Savonius* membuka potensi signifikan untuk turbin kecepatan rendah.

Riset masa depan sebaiknya fokus pada desain *hybrid*, optimasi multikriteria, uji lapangan nyata, dan kontrol aktif untuk mencapai efisiensi maksimal tanpa mengorbankan kestabilan, biaya, dan dampak lingkungan. Dengan upaya ini, turbin angin dengan *blade* yang dioptimasi dapat menjadi solusi lebih handal dan efisien untuk berbagai skala aplikasi, dari rumah tangga hingga ladang turbin skala besar.

#### Daftar Pustaka

- [1] W. Duan, W. Chen, X. Zhao, and W. Qiao, "Numerical Studies on the Effect of Leading Edge Tubercles on a Low-Pressure Turbine Cascade," *Energies*, vol. 16, no. 11, p. 4398, May 2023, doi: 10.3390/en16114398.
- [2] A. T. Wardhana, A. Taqwa, and T. Dewi, "Design of Mini Horizontal Wind Turbine for Low Wind Speed Area," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1167, p. 012022, Feb. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1167/1/012022.
- [3] K. Qaissi, O. Elsayed, M. Faqir, and E. Essadiqi, "Aerodynamic Optimization of Trailing-Edge-Serrations for a Wind Turbine Blade Using Taguchi Modified Additive Model," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1099, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16031099.
- [4] S. Letica and W. N. Alexander, "Understanding the Impact of a Serrated Trailing Edge on the Unsteady Hydrodynamic Field," *J. Aerosp. Eng.*, vol. 34, no. 4, p. 04021045, July 2021, doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001295.
- [5] Y. Xing, X. Wang, W. Chen, F. Tong, and W. Qiao, "Experimental Study on Wind Turbine Airfoil Trailing Edge Noise Reduction Using Wavy Leading Edges," *Energies*, vol. 16, no. 16, p. 5865, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16165865.
- [6] W. Xue, S. Jia, H. Wang, Z. Chen, and B. Yang, "An Experimental Study of Noise Reduction in Wind Turbine Airfoils with Serrated Trailing Edges," Feb. 09, 2025, *arXiv*: arXiv:2307.12188. doi: 10.48550/arXiv.2307.12188.
- [7] B. K. Wardhana and B. Shin, "Numerical investigation of the effect of winglet configurations with multiple cant angles on the aerodynamic performance of wind turbine blade," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 43, no. 1, p. 2403486, Dec. 2024, doi: 10.1080/14786451.2024.2403486.
- [8] S. U. Handayani, "Effect of Winglets on Improving Wind Turbine Performance," *J. Vocat. Stud. Appl. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 5–8, May 2021, doi: 10.14710/jvsar.v3i1.10906.
- [9] N. R. Arini, Gilang Muhammad, Joke Pratilastiarso, and Setyo Nugroho, "Numerical Study of a Wind Turbine Blade Modification Using 30° Angle Winglet on Clark Y Foil," *Emit. Int. J. Eng. Technol.*, pp. 311–319, Dec. 2022, doi: 10.24003/emitter.v10i2.680.
- [10] J. R. D. Portela *et al.*, "The Effect of Airfoil Geometry Variation on the Efficiency of a Small Wind Turbine," *Technologies*, vol. 13, no. 8, p. 328, Aug. 2025, doi: 10.3390/technologies13080328.
- [11] S. Verma, A. R. Paul, A. Jain, and F. Alam, "Numerical investigation of stall characteristics for winglet blade of a horizontal axis wind turbine," *E3S Web Conf.*, vol. 321, p. 03004, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132103004.
- [12] M. Kamal, F. Arifin, and Rusdianasari, "Analysis of the Performance of The Four-Blade Darrieus Wind Turbine at the Jamik Bukit Asam Mosque Complex Tanjung Enim South Sumatra: Analysis of the Performance of The Four-Blade Darrieus Wind Turbine at the Jamik Bukit Asam Mosque Complex Tanjung Enim South Sumatra," *Int. J. Res. Vocat. Stud. IJRVOCAS*, vol. 1, no. 2, pp. 45–51, Sept. 2021, doi: 10.53893/ijrvocas.v1i2.52.
- [13] S. Sanaye and A. Farvizi, "Optimizing a vertical axis wind turbine with helical blades: Application of 3D CFD and Taguchi method," *Energy Rep.*, vol. 12, pp. 2527–

- 2547, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.08.059.
- [14] H. B. Rasheed, H. S. Zad, M. S. Malik, M. Arif, S. K. Hashmi, and M. Irfan, "Structural Design and Development of a Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine for Urban Household Power Generation," in *ICAME 2025*, MDPI, Oct. 2025, p. 21. doi: 10.3390/engproc2025111021.
- [15] B. Junaidin, "Design Of Helical-Blade Rotor Of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)," *Conf. SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 6, Dec. 2020, doi: 10.28989/senatik.v6i0.439.
- [16] M. Moreno, I. Trejo-Zúñiga, J. Terrazas, A. Díaz-Ponce, and A. Pérez-Terrazo, "Hybridization of a Micro-Scale Savonius Rotor Using a Helical Darrieus Rotor," *Fluids*, vol. 10, no. 3, p. 63, Mar. 2025, doi: 10.3390/fluids10030063.
- [17] R. Fauzih, F. Arifin, and R. Kusumanto, "Optimization of Vertical Wind Turbine Performance in Tunnel Area of Coal Conveyor," in *2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)*, Malang, Indonesia: IEEE, Oct. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEEIE52663.2021.9616960.
- [18] S. Nurmutia, B. Manshoor, A. Khalid, and I. Zaman, "Performance Analysis on a New Design of Blade Shape for Savonius Wind Turbine," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*
- [19] Y. D. Herlambang, A. S. Alfauzi, F. Arifin, and Z. F. Emzain, "Optimization of savonius turbine towards different inner blade positions to improve turbine performance," vol. 21, no. 1, 2023.
- [20] K. Ibrahim, V. S. Djanali, and N. Ikhwan, "Numerical Study of Bach-bladed Savonius Wind Turbine with Varying Blade Shape Factor," *Int. J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 4, no. 2, p. 12, Sept. 2020, doi: 10.12962/j25807471.v4i2.7839.
- [21] Y. Zhang, T. Han, P. Rainey, P. Sun, and J. Ge, "Research on the Influence of Blade Tip Trailing-Edge Serrated Structure on Wind Turbine Noise Reduction and Performance," Oct. 30, 2025, *Wind technologies/Design concepts and methods for plants, turbines, and components*. doi: 10.5194/wes-2025-119.
- [22] J. Francisco, D. Rhakasywi, and F. Fahrudin, "Experimental Analysis of the Performance of Savonius VAWT with Different Numbers of Blades on Roofs," *Indones. J. Innov. Stud.*, vol. 26, no. 4, Sept. 2025, doi: 10.21070/ijins.v26i4.1675.
- [23] R. M. Ariefianto, R. N. Hasanah, and W. Wijono, "Unjuk Kerja Performa Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal Pada Berbagai Bentuk Sudu Unik," *Rekayasa*, vol. 15, no. 1, pp. 53–63, Apr. 2022, doi: 10.21107/rekayasa.v15i1.13572.
- [24] Fitrianza, F. Arifin, And C. Rs, "Optimizing The Performance Of Wind Turbines Using Exhaust Gas At The Borang Gas Power Plant," *Int. J. Mech. Energy Eng. Appl. Sci. Ijmeas*, Vol. 3, No. 2, Pp. 9–14, May 2025, Doi: 10.53893/Ijmeas.V3i2.405.
- [25] R. B. Yuliandi, Rusdianasari, And T. Dewi, "Comparison Of Blade Dimension Design Of A Vertical Wind Turbine Applied In Low Wind Speed," *E3s Web Conf.*, Vol. 68, P. 01001, 2018, Doi: 10.1051/E3sconf/20186801001.
- [26] R. I. Fitrandi And I. H. Siregar, "Karakteristik Turbin Angin Savonius 2 Dan 3 Blade Dengan Menggunakan Bantuan Guide Vane," Vol. 02, 2014.
- [27] E. B. Lake, M. Jafri, J. Adisucipto, And P.-K. Ntt, "Pengaruh Kecepatan Angin Dan Sudut Blade Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Savonius Duabelas Blade," Vol. 02, No. 01, 2015.
- [28] W. Feng, K. Chen, P. Zhao, And H. Gui, "Aerodynamic Noise Reduction Based On Bionic Blades With Non-Smooth Leading Edges And Curved Serrated Trailing Edges," *J. Appl. Fluid Mech.*, Vol. 16, No. 7, July 2023, Doi: 10.47176/Jafm.16.07.1660.