Analisis Pengaruh Penambahan *Winglet* pada VAWT Berbasis NACA 0018 dengan Metode Eksperimental

Diaz Ryansyah Moelia*[1], Adhes Gamayel[2], M Untung Zaenal Priyadi[3]
Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta[1,2,3]
*e-mail: diaz.ryansyah@gmail.com

ABSTRAK

Pengembangan energi angin sebagai bagian dari energi terbarukan memerlukan peningkatan efisiensi turbin, khususnya pada kondisi kecepatan angin rendah hingga sedang. Salah satu permasalahan utama pada *Vertical Axis Wind Turbine* atau VAWT tipe Darrieus adalah kehilangan energi akibat pusaran ujung bilah yang menurunkan performa aerodinamis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *winglet* pada ujung bilah VAWT berbasis profil NACA 0018 terhadap kecepatan putar dan tegangan listrik yang dihasilkan. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium menggunakan *wind tunnel* tipe *open circuit*. Variasi *winglet* yang diuji terdiri atas sudut kemiringan 15°, 30°, dan 45°, serta konfigurasi tanpa *winglet* sebagai pembanding. Pengujian dilakukan pada kecepatan angin 6 m/s, 7 m/s, dan 8 m/s dengan pengukuran RPM dan tegangan listrik secara real time menggunakan sistem akuisisi berbasis Arduino. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *winglet* mampu meningkatkan performa turbin secara signifikan pada seluruh variasi kecepatan angin. Konfigurasi *winglet* dengan sudut 30° secara konsisten menghasilkan nilai RPM dan tegangan tertinggi, dengan peningkatan kecepatan putar lebih dari 50 persen dan tegangan lebih dari 100 persen dibandingkan kondisi tanpa *winglet* pada kecepatan angin tertinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi sudut *winglet* berperan penting dalam mengurangi kehilangan energi akibat pusaran ujung bilah dan meningkatkan efisiensi konversi energi pada VAWT skala kecil.

Kata kunci : Energi Angin; NACA 0018; *Winglet*; VAWT; *Wind Tunnel*.

ABSTRACT

The development of wind energy as a renewable energy source requires continuous improvement in turbine efficiency, particularly under low to moderate wind speed conditions. One of the main challenges of Darrieus type Vertical Axis Wind Turbines or VAWTs is energy loss caused by tip vortices, which significantly reduces aerodynamic performance. This study aims to investigate the effect of winglet installation on the blade tips of a NACA 0018 based VAWT on rotational speed and electrical output voltage. An experimental method was employed using an open circuit wind tunnel. The tested configurations included winglet angles of 15°, 30°, and 45°, as well as a configuration without winglet as a reference. Experiments were conducted at wind speeds of 6 m/s, 7 m/s, and 8 m/s, while turbine rotational speed and output voltage were measured in real time using an Arduino based data acquisition system. The results indicate that the addition of winglets significantly enhances turbine performance across all wind speed variations. The 30° winglet configuration consistently produced the highest rotational speed and output voltage, achieving more than a 50 percent increase in rotational speed and over a 100 percent increase in voltage compared to the turbine without winglet at the highest wind speed. These findings demonstrate that proper winglet angle optimization plays a crucial role in reducing tip vortex losses and improving energy conversion efficiency in small scale VAWT applications.

Keywords : *NACA 0018; Renewable Energy; Winglet; VAWT; Wind Tunnel.*

PENDAHULUAN

Energi terbarukan semakin menjadi fokus utama dalam upaya mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang ketersediaannya terus menurun serta menimbulkan berbagai dampak lingkungan yang merugikan. Pengembangan energi terbarukan dipandang sebagai solusi strategis untuk menekan emisi gas rumah kaca sekaligus meningkatkan ketahanan energi global. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah energi angin. Pemanfaatan energi angin tidak hanya berkontribusi pada penurunan emisi karbon, tetapi juga mampu menyediakan pasokan energi yang berkelanjutan dan andal

(Ellabban et al., 2014). Data Global Wind Energy Council menunjukkan bahwa kapasitas terpasang energi angin global terus mengalami peningkatan yang signifikan, mencapai 743 GW pada tahun 2020 dengan laju pertumbuhan tahunan sekitar 10 persen, yang mencerminkan meningkatnya peran energi angin dalam bauran energi dunia (El-Naggar et al., 2021).

Di antara berbagai jenis turbin angin yang dikembangkan, *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) semakin menarik perhatian para peneliti dan praktisi karena keunggulan karakteristiknya dibandingkan dengan *Horizontal Axis Wind Turbine*. Salah satu keunggulan utama VAWT adalah kemampuannya menangkap angin dari berbagai arah tanpa memerlukan sistem yaw yang kompleks, yang sering menjadi keterbatasan pada HAWT (Abdalrahman et al., 2022; Bel Laveda et al., 2023; Pérez-Terrazo et al., 2024). Selain itu, desain VAWT yang relatif sederhana serta bentuk visual yang lebih rendah memungkinkan integrasinya ke dalam lingkungan perkotaan, di mana keterbatasan ruang dan aspek estetika menjadi pertimbangan penting dalam penerapan teknologi energi angin skala kecil hingga menengah (Bel Laveda et al., 2023; Franchina et al., 2019; Pérez-Terrazo et al., 2024).

Salah satu konfigurasi VAWT yang banyak digunakan adalah tipe Darrieus karena memiliki potensi efisiensi yang lebih tinggi dalam menghasilkan energi listrik. Meskipun demikian, VAWT tipe Darrieus masih menghadapi sejumlah tantangan aerodinamis, terutama pada bagian ujung bilah. Kehilangan energi yang signifikan sering terjadi akibat terbentuknya pusaran angin di ujung bilah, yang berdampak pada penurunan kinerja dan efisiensi konversi energi turbin. Fenomena ini menjadi salah satu faktor pembatas utama dalam optimalisasi performa VAWT, khususnya pada kondisi kecepatan angin rendah hingga sedang.

Sehubungan dengan permasalahan tersebut, penambahan *winglet* pada ujung bilah turbin angin VAWT berbasis profil NACA 0018 merupakan pendekatan inovatif yang berpotensi meningkatkan kinerja aerodinamis turbin. *Winglet* merupakan elemen aerodinamis yang dirancang untuk mengurangi intensitas pusaran angin pada ujung bilah sehingga dapat menekan kehilangan daya dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem (Fitrikananda, 2014). Integrasi *winglet* pada bilah turbin diharapkan mampu memperbaiki karakteristik aliran udara di sekitar bilah serta meningkatkan output kinerja turbin secara signifikan.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan *winglet* pada bilah turbin angin, baik pada HAWT maupun VAWT, terbukti mampu meningkatkan kinerja aerodinamis dan efisiensi konversi energi melalui pengurangan pusaran ujung bilah yang menjadi sumber utama kehilangan daya. Peningkatan koefisien daya dan keluaran listrik yang dilaporkan bervariasi, mulai dari sekitar 2,45 persen hingga lebih dari 20 persen, bergantung pada geometri, tinggi, dan sudut kemiringan *winglet* yang digunakan (Gaheen et al., 2021; Khalafallah et al., 2019; Mourad et al., 2020). Studi numerik dan eksperimental juga mengindikasikan bahwa *winglet* dapat memperbaiki struktur aliran, menekan fenomena dynamic stall, serta meningkatkan stabilitas operasi turbin yang berdampak langsung pada peningkatan efisiensi sistem (Bartl et al., 2020; Handayani, 2021; Zhang et al., 2019).

Dalam konteks VAWT, profil NACA 0018 dikenal memiliki karakteristik gaya angkat yang baik pada sudut serang tertentu, namun masih rentan terhadap kehilangan energi akibat pusaran ujung bilah. Oleh karena itu, penerapan *winglet* pada bilah VAWT berbasis NACA 0018 dipandang sebagai solusi potensial untuk meningkatkan performa turbin (Farhan et al., 2019; Fitrikananda, 2014). Meskipun demikian, beberapa studi juga menekankan bahwa desain *winglet* yang tidak tepat dapat menimbulkan beban struktural tambahan dan bahkan menurunkan kinerja turbin, sehingga diperlukan perancangan dan optimasi parameter *winglet* yang cermat (Matheswaran, 2024; Miao et al., 2022).

Sebagian besar penelitian terdahulu masih didominasi oleh pendekatan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* dengan validasi eksperimental yang terbatas, khususnya pada VAWT skala kecil berbasis profil NACA 0018 dengan variasi sudut *winglet* yang sistematis. Oleh karena itu, penelitian eksperimental menggunakan terowongan angin tipe *open circuit* dengan pengukuran langsung parameter kinerja seperti RPM dan tegangan listrik pada variasi sudut *winglet* menjadi penting untuk mengisi celah penelitian yang ada. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi empiris yang kuat dalam pengembangan desain *winglet* yang optimal guna meningkatkan efisiensi VAWT pada kondisi kecepatan angin rendah, sekaligus mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan di Indonesia (Amir et al., 2024; Blocken et al., 2018; Zhang et al., 2021).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilaksanakan secara terkontrol di Laboratorium Proses Produksi Jurusan Teknik Mesin Universitas Global Jakarta. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur dan perancangan model *Vertical Axis Wind Turbine* berbasis profil aerofoil NACA 0018 yang disesuaikan dengan skala wind tunnel. Bilah turbin dan *winglet* difabrikasi menggunakan metode pencetakan tiga dimensi dengan material PETG. Variasi *winglet* yang diuji terdiri atas tiga sudut kemiringan, yaitu 15°, 30°, dan 45°, dengan dimensi yang seragam/sehingga perbedaan kinerja yang diamati hanya dipengaruhi oleh sudut pemasangan.

Turbin dirakit menggunakan poros utama berbahan stainless steel dan dihubungkan langsung dengan dinamo DC tipe RE 280 sebagai konverter energi mekanik menjadi energi listrik. Pengukuran kecepatan putar turbin dilakukan menggunakan sensor *Infrared Photo Interrupter*, sedangkan pengukuran tegangan listrik dilakukan menggunakan sensor INA219. Seluruh data diakuisisi secara real time menggunakan mikrokontroler Arduino MEGA 2560 yang diprogram melalui Arduino IDE dan terhubung ke laptop sebagai perangkat pencatat data.

Pengujian dilakukan di dalam *wind tunnel* tipe *open circuit* yang menghasilkan aliran udara stabil. Kecepatan angin diatur menggunakan fan speed controller dan diverifikasi dengan anemometer pada ruang uji. Variasi kecepatan angin yang digunakan adalah 6 m/s, 7 m/s, dan 8 m/s dengan toleransi ±0,1 m/s. Setiap kombinasi sudut *winglet* dan kecepatan angin diuji sebanyak lima kali dengan durasi pengambilan data selama dua menit pada setiap pengujian.

Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi kecepatan angin dan sudut kemiringan *winglet*, sedangkan variabel terikat berupa kecepatan putar turbin dan tegangan listrik yang dihasilkan. Profil NACA 0018, metode pengujian, dan instrumen pengukuran ditetapkan sebagai variabel kontrol. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan nilai rata rata RPM dan tegangan untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut *winglet* serta menentukan konfigurasi yang paling optimal dalam meningkatkan performa VAWT pada kondisi kecepatan angin rendah hingga sedang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian pada Variasi Kecepatan Angin

Pengujian dilakukan pada turbin angin sumbu vertikal berbasis profil NACA 0018 dengan empat konfigurasi, yaitu tanpa *winglet* sebagai kontrol serta *winglet* dengan sudut kemiringan 15°, 30°, dan 45°. Pengujian dilaksanakan pada tiga variasi kecepatan angin, yaitu 6 m/s, 7 m/s, dan 8 m/s, dengan setiap konfigurasi diuji sebanyak lima kali. Parameter yang diamati meliputi kecepatan putar turbin dalam/satuan RPM dan tegangan listrik keluaran dalam/satuan mV. Ringkasan hasil pengujian rata rata untuk seluruh variasi kecepatan angin dan konfigurasi *winglet* disajikan secara komprehensif pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Rata Rata Pengujian VAWT dengan Variasi Sudut *Winglet* dan Kecepatan Angin

Kecepatan Angin (m/s)	Konfigurasi *Winglet*	RPM Maksimum	Tegangan Maksimum (mV)
6	Tanpa *winglet*	41	148
	Winglet 15°	44	170
	Winglet 30°	61	243
	Winglet 45°	53	208
7	Tanpa *winglet*	50	189
	Winglet 15°	59	235
	Winglet 30°	75	300
	Winglet 45°	65	259
8	Tanpa *winglet*	46	169
	Winglet 15°	74	299
	Winglet 30°	105	424
	Winglet 45°	87	342

Sumber: Data Pribadi (2025)

Pada kecepatan angin 6 m/s, konfigurasi tanpa *winglet* menunjukkan performa dasar turbin dengan nilai RPM maksimum 41 dan tegangan tertinggi 148 mV. Kondisi ini mencerminkan keterbatasan profil NACA

0018 tanpa modifikasi ujung bilah, di mana kehilangan energi akibat pusaran ujung bilah masih dominan. Penambahan *winglet* dengan sudut 15° menghasilkan peningkatan performa yang moderat, ditunjukkan oleh kenaikan RPM maksimum menjadi 44 dan tegangan menjadi 170 mV. Peningkatan ini mengindikasikan adanya perbaikan karakteristik aliran di ujung bilah meskipun efeknya belum optimal. Kinerja tertinggi pada kecepatan ini diperoleh pada konfigurasi *winglet* 30°, dengan RPM maksimum mencapai 61 dan tegangan 243 mV. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sudut 30° mampu mengoptimalkan distribusi aliran udara, mengurangi kehilangan energi, serta meningkatkan gaya angkat secara signifikan. Sementara itu, *winglet* dengan sudut 45° masih memberikan peningkatan dibandingkan kondisi tanpa *winglet*, namun performanya lebih rendah dibandingkan sudut 30°, yang mengindikasikan mulai meningkatnya pengaruh gaya hambat akibat sudut yang terlalu besar.

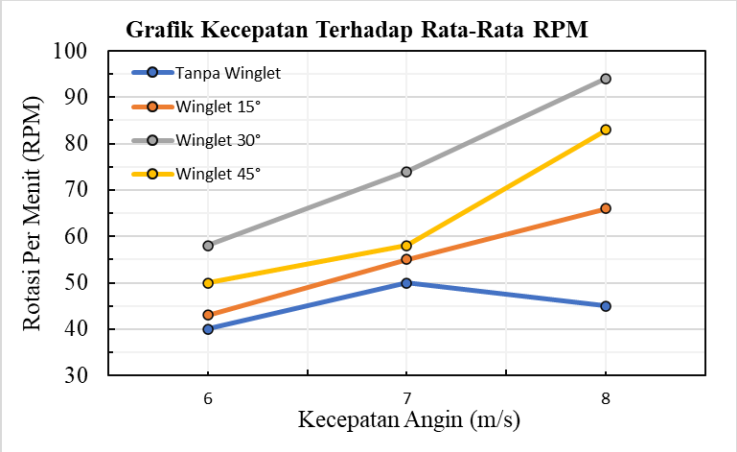
Pada kecepatan angin 7 m/s, tren peningkatan performa akibat penambahan *winglet* semakin jelas. Turbin tanpa *winglet* menghasilkan RPM maksimum 50 dengan tegangan 189 mV. Penambahan *winglet* 15° meningkatkan RPM hingga 59 dan tegangan hingga 235 mV, yang menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi akibat perbaikan aliran udara di sekitar ujung bilah. Konfigurasi *winglet* 30° kembali menunjukkan performa terbaik dengan RPM maksimum 75 dan tegangan mencapai 300 mV. Hasil ini menegaskan bahwa sudut 30° memberikan keseimbangan optimal antara peningkatan gaya angkat dan pengendalian pusaran. Pada konfigurasi *winglet* 45°, meskipun RPM dan tegangan meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa *winglet*, nilainya tetap berada di bawah konfigurasi 30°, yang menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan mulai memberikan penalti hambatan yang memengaruhi kinerja turbin.

Pada kecepatan angin 8 m/s, peningkatan performa turbin akibat penambahan *winglet* menjadi semakin signifikan. Turbin tanpa *winglet* menghasilkan RPM maksimum 46 dengan tegangan 169 mV, yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin saja belum cukup untuk mengatasi kehilangan energi akibat pusaran ujung bilah. Penambahan *winglet* 15° meningkatkan RPM hingga 74 dan tegangan hingga 299 mV, yang menandakan perbaikan aliran yang lebih stabil pada kecepatan angin tinggi. Konfigurasi *winglet* 30° kembali menghasilkan performa tertinggi dengan RPM maksimum mencapai 105 dan tegangan 424 mV. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sudut 30° mampu memaksimalkan konversi energi angin menjadi energi mekanik dan listrik secara sangat efektif. Pada konfigurasi *winglet* 45°, meskipun RPM dan tegangan meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa *winglet*, performanya masih berada di bawah konfigurasi 30°, yang mengindikasikan bahwa sudut kemiringan yang terlalu besar cenderung meningkatkan gaya hambat dan membatasi efisiensi sistem.

Secara keseluruhan, hasil pengujian yang dirangkum pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penambahan *winglet* memberikan pengaruh positif terhadap kinerja VAWT pada seluruh variasi kecepatan angin yang diuji. Konfigurasi *winglet* dengan sudut kemiringan 30° secara konsisten menghasilkan nilai RPM dan tegangan tertinggi pada setiap kecepatan angin, sehingga dapat disimpulkan sebagai konfigurasi paling optimal dalam meningkatkan performa aerodinamis dan keluaran listrik turbin angin sumbu vertikal berbasis profil NACA 0018.

Grafik Kecepatan Putar Turbin

Grafik hubungan antara kecepatan angin dan rata rata kecepatan putar turbin ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa nilai kecepatan putar atau RPM cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin pada seluruh konfigurasi pengujian. Dibandingkan dengan kondisi tanpa *winglet*, seluruh konfigurasi *winglet* menunjukkan peningkatan RPM yang konsisten pada setiap tingkat kecepatan angin. Peningkatan paling signifikan ditunjukkan oleh konfigurasi *winglet* dengan sudut kemiringan 30°, di mana RPM meningkat dari sekitar 61 pada kecepatan angin 6 m/s menjadi lebih dari 90 pada kecepatan angin 8 m/s. Sebaliknya, pada konfigurasi tanpa *winglet*, RPM maksimum yang dicapai hanya sekitar 46 pada kecepatan angin tertinggi.



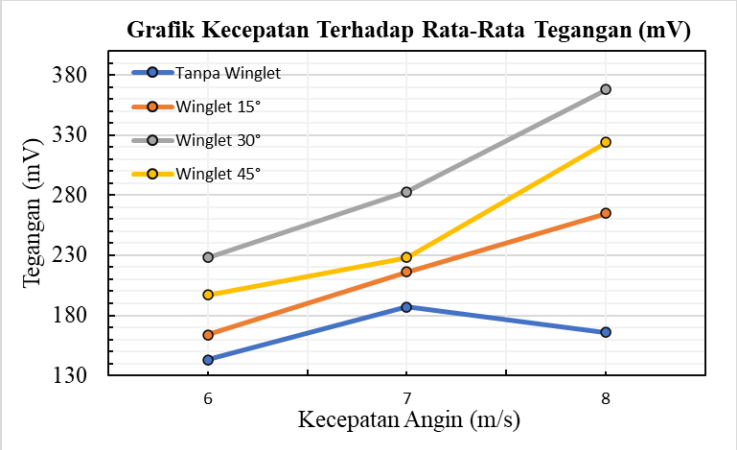
Gambar 1. Grafik Kecepatan Terhadap Rata-Rata RPM
Sumber: Data Pribadi (2025)

Perbedaan kinerja ini menunjukkan bahwa *winglet* sudut 30° mampu mengarahkan aliran udara secara lebih efektif di sepanjang permukaan bilah serta menekan pembentukan pusaran ujung bilah. Dengan berkurangnya kehilangan energi akibat tip vortex, energi kinetik angin dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara lebih optimal. Pada konfigurasi tanpa *winglet*, aliran udara di ujung bilah cenderung mengalami separasi lebih awal yang memicu turbulensi dan meningkatkan tip loss, sehingga membatasi peningkatan kecepatan putar turbin.

Konfigurasi *winglet* dengan sudut 15° dan 45° juga menunjukkan peningkatan RPM dibandingkan kondisi tanpa *winglet*, namun nilainya masih berada di bawah konfigurasi 30°. Sudut 15° dinilai belum cukup efektif dalam mengendalikan arah aliran udara menuju bagian dalam bilah, sedangkan sudut 45° cenderung menimbulkan peningkatan gaya hambat akibat area tangkapan aliran yang terlalu besar. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa efektivitas *winglet* sangat dipengaruhi oleh sudut pemasangannya terhadap bilah turbin, di mana sudut yang terlalu kecil maupun terlalu besar dapat mengurangi keuntungan aerodinamis yang diperoleh (Dol, 2021).

Grafik Tegangan Listrik Keluaran

Grafik hubungan antara kecepatan angin dan rata rata tegangan listrik keluaran ditampilkan pada Gambar 2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh turbin meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin pada seluruh konfigurasi. Sejalan dengan hasil pengujian RPM, konfigurasi *winglet* sudut 30° kembali menunjukkan performa terbaik, dengan tegangan keluaran mencapai lebih dari 350 mV pada kecepatan angin 8 m/s. Sebaliknya, konfigurasi tanpa *winglet* hanya menghasilkan tegangan sekitar 165 mV pada kondisi kecepatan angin yang sama, yang menunjukkan selisih peningkatan yang sangat besar.



Gambar 2. Grafik Kecepatan Terhadap Rata-Rata Tegangan (mV)
Sumber: Data Pribadi (2025)

Peningkatan tegangan ini berkaitan langsung dengan meningkatnya kecepatan putar turbin. Dinamo DC yang digunakan menghasilkan tegangan sebanding dengan kecepatan rotasi poros, sehingga peningkatan RPM akan berimplikasi langsung pada peningkatan tegangan listrik yang dihasilkan. Konfigurasi *winglet* 15° dan 45° juga menunjukkan peningkatan tegangan yang cukup signifikan dibandingkan kondisi tanpa *winglet*, namun tetap lebih rendah dibandingkan konfigurasi 30°. Hal ini menegaskan bahwa sudut *winglet* yang optimal berperan penting dalam memaksimalkan efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Keberadaan *winglet* memungkinkan aliran udara tetap melekat pada permukaan bilah hingga ke bagian ujung, sehingga mengurangi separasi aliran dan pembentukan pusaran lepas. Tanpa *winglet*, aliran udara cenderung terlepas lebih awal dan membentuk vortex shedding yang meningkatkan kerugian energi. Temuan ini konsisten dengan laporan Ung et al. (2022) yang menyatakan bahwa penggunaan perangkat pengendali ujung bilah seperti *winglet* atau endplate mampu meningkatkan koefisien daya turbin angin melalui pengurangan tip loss dan gaya hambat pada ujung bilah.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental terhadap *Vertical Axis Wind Turbine* berbasis profil NACA 0018, dapat disimpulkan bahwa penambahan *winglet* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan performa turbin. Seluruh konfigurasi *winglet* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan kondisi tanpa *winglet*, baik dari aspek kecepatan putar maupun tegangan listrik yang dihasilkan. Konfigurasi *winglet* dengan sudut 30° secara konsisten menghasilkan performa paling optimal pada seluruh variasi kecepatan angin yang diuji. Pada kecepatan angin 8 m/s, konfigurasi ini mampu meningkatkan kecepatan putar hingga lebih dari lima puluh persen dan meningkatkan tegangan keluaran lebih dari seratus persen dibandingkan konfigurasi tanpa *winglet*. Temuan ini mengindikasikan bahwa *winglet* sudut 30° efektif dalam mengurangi kehilangan energi akibat pusaran ujung bilah serta meningkatkan efisiensi aerodinamis, yang berdampak langsung pada peningkatan efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Secara implikatif, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi desain ujung bilah melalui penerapan *winglet* berpotensi menjadi solusi sederhana dan efektif untuk meningkatkan kinerja VAWT skala kecil pada kondisi kecepatan angin rendah hingga sedang, khususnya untuk aplikasi energi terbarukan di lingkungan perkotaan.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada prototipe skala laboratorium dengan parameter kinerja yang terbatas pada RPM dan tegangan listrik. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk dilakukan pada skala yang lebih besar dan dalam kondisi lapangan terbuka agar hasil yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi operasi nyata. Penambahan variasi sudut *winglet* serta parameter pengujian seperti torsi, daya keluaran, efisiensi aerodinamis, dan karakteristik getaran juga diperlukan untuk memperoleh gambaran performa yang lebih komprehensif. Selain itu, integrasi pendekatan eksperimental dengan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pola aliran dan mekanisme pengurangan pusaran ujung bilah, sehingga dapat mendukung pengembangan desain VAWT yang lebih efisien, andal, dan aplikatif di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Abdalrahman, G., Daoud, M. A., Melek, W. W., Lien, F.-S., & Yee, E. (2022). Design and implementation of an intelligent blade pitch control system and stability analysis for a small Darrieus vertical-axis wind turbine. *Energies*, *15*(1), 235. https://doi.org/10.3390/en15010235

Amir, A., Soenoko, R., Wijayanti, W., & Setiadhi, D. (2024). Advanced turbine working: Impact of winglet on vertical wind turbine Darrieus type H. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, *5*, 73–86. https://doi.org/10.21776/MECHTA.2024.005.01.8

Bartl, J., Mühle, F., Hansen, T., Adaramola, M. S., & Sætran, L. R. (2020). An experimental study on the effects of winglets on the tip vortex interaction in the near wake of a model wind turbine. *Wind Energy*, *23*(5), 1286–1300. https://doi.org/10.1002/we.2486

Bel Laveda, O., Roche, M.-A., Phadtare, M., Sauge, L., Xavier, K. J., Bhat, G., Saxena, D., Saini, J. S., & Verdin, P. G. (2023). Numerical investigation of aerodynamic performance and structural analysis of a 3D J-shaped based small-scale vertical axis wind turbine. *Energies*, *16*(20), 7024.

https://doi.org/10.3390/en16207024

Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y., & Andrianne, T. (2018). CFD analysis of aerodynamic performance of a vertical axis wind turbine in an open-jet wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *179*, 231–246. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.018

Dol, S. S. (2021). CFD analysis of vertical axis wind turbine with winglets. *Renewable Energy Research and Applications*, *3*. https://doi.org/10.22044/RERA.2021.11122.1074

El-Naggar, M. F., Abdelhamid, A. S., Elshahed, M. A., & Bekhet, M. E.-S. M. (2021). Ranking subassemblies of wind energy conversion systems concerning their impact on the overall reliability. *IEEE Access*, *9*, 53754–53768. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070533

Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 748–764. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113

Farhan, A., Hassanpour, A., Burns, A., & Motlagh, Y. G. (2019). Numerical study of the effect of winglet planform and airfoil on horizontal axis wind turbine performance. *Renewable Energy*, *131*, 1255–1273. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.017

Fitrikananda. (2014). *Studi Pengembangan dan Pemanfaatan Winglet untuk Meningkatkan Performansi Pesawat*.

Franchina, N., Persico, G., & Savini, M. (2019). 2D--3D computations of a vertical axis wind turbine flow field: Modeling issues and physical interpretations. *Renewable Energy*, *136*, 1170–1189. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.086

Gaheen, O. A., Aziz, M. A., Hamza, M., Kashkoush, H., & Khalifa, M. A. (2021). Fluid and structure analysis of wind turbine blade with winglet. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *90*(1), 80–101. https://doi.org/10.37934/arfmts.90.1.80101

Handayani, S. (2021). Effect of winglets on improving wind turbine performance. *Journal of Vocational Studies on Applied Research*, *3*(1). https://doi.org/10.14710/jvsar.v3i1.10906

Khalafallah, M. G., Ahmed, A. M., & Emam, M. (2019). The effect of using winglets to enhance the performance of swept blades of a horizontal axis wind turbine. *Advances in Mechanical Engineering*, *11*(9). https://doi.org/10.1177/1687814019878312

Matheswaran, V. (2024). Wind turbine performance enhancement with minimal structural load penalty: A design philosophy. *Wind Engineering*, *48*(4), 580–596. https://doi.org/10.1177/0309524X231212565

Miao, W., Liu, Q., Xu, Z., Yue, M., Li, C., & Zhang, W. (2022). A comprehensive analysis of blade tip for vertical axis wind turbine: Aerodynamics and the tip loss effect. *Energy Conversion and Management*, *253*, 115140. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115140

Mourad, M. G., Shahin, I., Ayad, S. S., Abdellatif, O. E., & Mekhail, T. (2020). Effect of winglet geometry on horizontal axis wind turbine performance. *Engineering Reports*, *2*(1). https://doi.org/10.1002/eng2.12101

Pérez-Terrazo, A., Moreno, M., Trejo-Zúñiga, I., & López, J. A. (2024). A Two-Stage Twisted Blade μ-Vertical Axis Wind Turbine: An Enhanced Savonius Rotor Design. *Energies*, *17*(12), 2835. https://doi.org/10.3390/en17122835

Ung, S.-K., Chong, W.-T., Mat, S., Ng, J.-H., Kok, Y. H., & Wong, K. H. (2022). Investigation into the Aerodynamic Performance of a Vertical Axis Wind Turbine with Endplate Design. *Energies*, *15*, 6925. https://doi.org/10.3390/en15196925

Zhang, T., Elsakka, M., Huang, W., Wang, Z., Ingham, D. B., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2019). Winglet Design for Vertical Axis Wind Turbines Based on a Design of Experiment and CFD Approach. *Energy Conversion and Management*, *195*, 712–726. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.055

Zhang, T., Wang, Z., & Huang, W. (2021). Experimental Investigation of the Aerodynamic Performance of a Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine in an Open-Jet Wind Tunnel. *Renewable Energy*, *172*, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.012