

# ANALISIS KINERJA TURBIN ANGIN DARRIEUS DUA BILAH DENGAN KONFIGURASI SUDUT 90° TERHADAP VARIASI KECEPATAN ANGIN DAN PENAMBAHAN WINGLET

Rendra Nurvianto<sup>1</sup>, Unung Lesmanah<sup>2</sup>, Nur Robbi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universitas Islam Malang

Email : 22001052057@unisma.ac.id

<sup>2</sup>Universitas Islam Malang

Email : Ununglesmanah@unisma.ac.id

<sup>3</sup>Universitas Islam Malang

Email : nurrobby@unisma.ac.id

## Abstrak

Perkembangan kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong transisi menuju energi terbarukan, salah satunya energi angin. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus (H-rotor) dua bilah dengan konfigurasi sudut antarbilah tetap 90° pada variasi kecepatan angin alami, serta mengkaji pengaruh penambahan winglet bersudut 90° terhadap performa turbin. Pengujian dilakukan secara eksperimental di Pantai Batu Bengkung, Kabupaten Malang, menggunakan sumber angin alami. Bilah turbin dirancang dengan profil airfoil NACA 0018 berpanjang chord 60 mm dan direalisasikan melalui proses 3D printing berbahan PLA+. Parameter yang diamati meliputi kecepatan putaran (RPM), tegangan, arus, daya generator, dan koefisien daya ( $C_p$ ), yang kemudian dianalisis menggunakan uji ANOVA dua arah pada taraf signifikansi 5%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa turbin tanpa winglet menghasilkan daya generator tertinggi sebesar 0,575 watt dengan  $C_p$  berkisar 0,95%–2,39% pada kecepatan angin 4,1–6,3 m/s. Penambahan winglet 90° terbukti mempercepat kemampuan self-start turbin (4,1 m/s dibanding 4,3 m/s) dan secara konsisten menghasilkan RPM, daya generator, serta  $C_p$  yang lebih tinggi, dengan daya generator maksimum 0,596 watt dan  $C_p$  tertinggi 2,47% pada kecepatan angin 6,3 m/s. Uji ANOVA dua arah membuktikan bahwa kecepatan angin berpengaruh sangat signifikan terhadap RPM turbin, daya generator, dan koefisien daya, sedangkan penambahan winglet 90° berpengaruh signifikan terhadap RPM turbin namun belum signifikan secara statistik terhadap daya generator dan koefisien daya, tanpa ditemukan interaksi yang signifikan antara kedua faktor tersebut.

**Kata Kunci :** Turbin Darrieus, Winglet 90°, NACA 0018, Koefisien Daya, ANOVA

## Abstract

*The continuous increase in electrical energy demand drives the transition toward renewable energy, one of which is wind energy. This study aims to analyze the performance of a two-bladed vertical-axis H-Darrieus wind turbine with a fixed 90° inter-blade angle configuration under natural wind speed variation, and to examine the effect of adding a 90° winglet on turbine performance. Field experiments were conducted at Batu Bengkung Beach, Malang Regency, using natural wind. The turbine blades were designed with a NACA 0018 airfoil profile and a 60 mm chord length, fabricated through 3D printing using PLA+ material. The observed parameters included rotational speed (RPM), voltage, current, generator power, and power coefficient ( $C_p$ ), which were then analyzed using two-way ANOVA at a 5% significance level. The results show that without a winglet, the turbine produced a maximum generator power of 0.575 watt with  $C_p$  ranging from 0.95% to 2.39% across wind speeds of 4.1–6.3 m/s. The addition of a 90° winglet accelerated the turbine's self-starting ability (4.1 m/s compared to 4.3 m/s) and consistently produced higher RPM, generator power, and  $C_p$ , reaching a maximum generator power of 0.596 watt and a peak  $C_p$  of 2.47% at a wind speed of 6.3 m/s. The two-way ANOVA results confirmed that wind speed had a highly significant effect on turbine RPM, generator power, and power coefficient, while the addition of the 90° winglet significantly affected turbine RPM but was not yet statistically significant for generator power and power coefficient, with no significant interaction found between the two factors.*

**Keywords :** Darrieus Turbine, 90° Winglet, NACA 0018, Power Coefficient, ANOVA

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat setiap tahun menjadi tantangan utama dalam penyediaan energi nasional, seiring dengan

pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan peningkatan aktivitas ekonomi. Ketergantungan terhadap energi fosil masih mendominasi sistem energi nasional, padahal penggunaannya secara terus-menerus berdampak negatif terhadap lingkungan

melalui peningkatan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Oleh karena itu, transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak, salah satunya melalui pemanfaatan energi angin yang melimpah dan tidak menghasilkan polusi selama proses konversinya (International Energy Agency, 2022).

Energi angin dimanfaatkan melalui turbin angin yang mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik (Burton et al., 2011). Salah satu jenis turbin yang sesuai dengan karakteristik angin di Indonesia adalah turbin angin sumbu vertikal (Vertical Axis Wind Turbine/VAWT) tipe Darrieus, yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah dan tidak bergantung pada arah datangnya angin (Mertens, 2006). Namun demikian, kinerja turbin ini sangat dipengaruhi oleh faktor desain, seperti jumlah bilah, konfigurasi sudut antarbilah, serta variasi kecepatan angin operasional (Rezaeiha et al., 2017).

Konfigurasi dua bilah pada turbin Darrieus memiliki keunggulan berupa bobot yang lebih ringan dan biaya manufaktur yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi tiga atau empat bilah, meskipun cenderung menghasilkan fluktuasi torsi yang lebih besar. Sudut antarbilah  $90^\circ$  dipilih dalam penelitian ini karena secara teoritis mampu meningkatkan keseimbangan dinamis rotor dan mengurangi fluktuasi torsi, sehingga menghasilkan putaran yang lebih stabil selama operasi (Howell et al., 2010). Selain faktor jumlah dan sudut bilah, performa turbin Darrieus juga kerap dibatasi oleh terbentuknya pusaran udara (tip vortex) di ujung bilah yang menimbulkan induced drag dan kehilangan energi. Penambahan winglet pada ujung bilah merupakan salah satu pendekatan untuk menekan permasalahan tersebut sekaligus memperbaiki efisiensi aerodinamis turbin.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Halimi, Lesmanah, dan Robbi (2024) menunjukkan bahwa penambahan winglet bersudut  $90^\circ$  pada turbin angin Darrieus H-rotor mampu meningkatkan koefisien daya turbin dibandingkan turbin tanpa winglet. Namun demikian, penelitian tersebut menggunakan konfigurasi empat bilah, sehingga belum menjawab bagaimana pengaruh penambahan winglet pada konfigurasi turbin Darrieus dua bilah

dengan sudut antarbilah tetap  $90^\circ$ , yang secara teoritis memiliki karakteristik dinamis dan distribusi torsi yang berbeda.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja turbin angin tipe Darrieus dua bilah dengan konfigurasi sudut antarbilah  $90^\circ$  pada berbagai variasi kecepatan angin alami, serta mengkaji pengaruh penambahan winglet bersudut  $90^\circ$  terhadap RPM turbin, daya generator, dan koefisien daya. Pengujian dilakukan secara eksperimental di lapangan dan dianalisis secara statistik menggunakan uji ANOVA dua arah pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin, pengaruh penambahan winglet, serta ada tidaknya interaksi antara kedua faktor tersebut terhadap performa turbin. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan data empiris yang bermanfaat bagi pengembangan turbin angin sumbu vertikal skala kecil yang lebih efisien.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif yang diawali dengan pembuatan desain tiga dimensi turbin angin Darrieus tipe H-rotor dua bilah dengan konfigurasi sudut antarbilah tetap  $90^\circ$ , kemudian direalisasikan melalui proses pencetakan 3D (3D printing) menggunakan material PLA+. Pengujian dilakukan pada dua kondisi turbin, yaitu turbin tanpa winglet dan turbin dengan penambahan winglet bersudut kelengkungan  $90^\circ$  pada ujung setiap bilah, dengan seluruh spesifikasi turbin di luar keberadaan winglet dibuat identik (variabel terkontrol) agar perbedaan performa yang diperoleh benar-benar disebabkan oleh penambahan winglet.

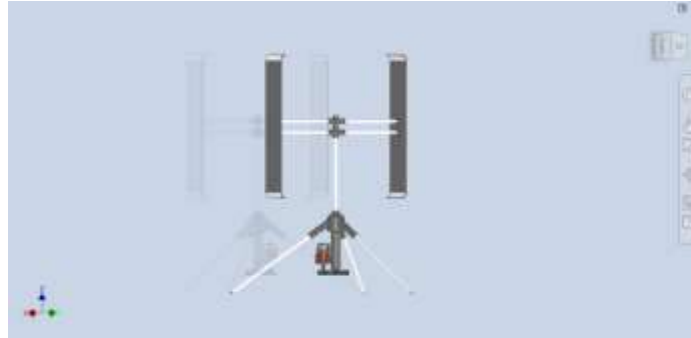
Pengujian lapangan dilaksanakan di Pantai Batu Bengkung, Kabupaten Malang, dengan memanfaatkan sumber angin alami secara langsung. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kecepatan angin ( $v$ ), sedangkan variabel terikatnya meliputi kecepatan putaran turbin (RPM), tegangan dan arus keluaran generator, daya generator, serta koefisien daya ( $C_p$ ). Variabel kontrol meliputi diameter rotor, tinggi bilah, panjang chord, profil airfoil (NACA 0018), sudut antarbilah ( $90^\circ$ ), serta jenis dan spesifikasi generator, yang seluruhnya dijaga tetap selama pengujian.

Spesifikasi turbin uji yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Spesifikasi Desain Turbin Uji**

| Parameter        | Nilai                        | Satuan |
|------------------|------------------------------|--------|
| Tipe turbin      | H-Darrieus (straight-bladed) | -      |
| Jumlah bilah (N) | 2                            | -      |

| Parameter                              | Nilai     | Satuan         |
|----------------------------------------|-----------|----------------|
| Diameter rotor (D)                     | 0,5       | m              |
| Jari-jari rotor (R)                    | 0,25      | m              |
| Tinggi bilah (H)                       | 0,4       | m              |
| Luas sapuan rotor ( $A = D \times H$ ) | 0,20      | m <sup>2</sup> |
| Profil airfoil                         | NACA 0018 | -              |
| Panjang chord (c)                      | 0,06      | m              |
| Soliditas ( $\sigma = Nc/\pi D$ )      | 0,076     | -              |
| Sudut antarbilah                       | 90        | °              |



**Gambar 1. Desain Tiga Dimensi Turbin Angin Darrieus H-Rotor Dua Bilah**



**Gambar 2. Model Turbin Angin Darrieus Dua Bilah Hasil 3D Printing**



**Gambar 3. Winglet dengan Sudut Kelengkungan 90° yang Dipasang pada Ujung Bilah**

Peralatan yang digunakan dalam pengambilan data meliputi anemometer digital untuk mengukur kecepatan angin, tachometer non-contact untuk mengukur kecepatan putaran poros turbin, serta multimeter digital untuk mengukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan generator DC yang terhubung pada poros turbin. Prosedur pengujian diawali dengan pemasangan turbin pada lokasi pengujian, kemudian turbin dibiarkan berputar mengikuti embusan angin alami hingga mencapai kondisi stabil. Selanjutnya, kecepatan angin, kecepatan putaran turbin, serta tegangan dan arus generator dicatat secara berkala setiap 10 detik dalam rentang waktu tertentu untuk setiap titik kecepatan angin, baik pada konfigurasi turbin tanpa winglet maupun dengan winglet 90°, agar diperoleh data yang representatif untuk dianalisis.

Data yang diperoleh selanjutnya diolah menggunakan tiga persamaan utama. Daya listrik (daya generator) dihitung dengan persamaan:

$$Pg = I \times V$$

dengan Pg adalah daya listrik (watt), I adalah arus (ampere), dan V adalah tegangan (volt) (Siregar & Lubis, 2019). Potensi daya angin dihitung dengan persamaan:

$$Pa = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

dengan Pa adalah daya angin (watt),  $\rho$  adalah massa jenis udara (1,204 kg/m<sup>3</sup>), A adalah luas sapuan rotor (m<sup>2</sup>), dan v adalah kecepatan angin (m/s) (Siregar & Lubis, 2019). Adapun koefisien daya turbin dihitung dengan persamaan:

$$Cp = P / (\frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3)$$

dengan P adalah daya yang dihasilkan turbin (watt) (Hakim et al., 2018). Ketiga persamaan tersebut digunakan untuk menghitung daya angin, daya generator, dan koefisien daya pada kedua konfigurasi turbin, yang selanjutnya dianalisis secara deskriptif dan diuji secara statistik menggunakan ANOVA dua arah pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin dan penambahan winglet, baik secara mandiri maupun interaksi keduanya, terhadap RPM turbin, daya generator, dan koefisien daya.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Uji Self-Start

Uji self-start dilakukan untuk mengetahui kecepatan angin minimum yang dibutuhkan turbin agar dapat mulai berputar tanpa bantuan penggerak awal. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Uji Self-Start pada Turbin Tanpa Winglet dan Winglet 90°**

| Konfigurasi Turbin | Kecepatan Angin Minimum (m/s) | Keterangan                         |
|--------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Tanpa Winglet      | 4,3                           | Turbin mulai berputar lebih lambat |
| Winglet 90°        | 4,1                           | Turbin mulai berputar lebih cepat  |

Hasil uji self-start menunjukkan bahwa turbin dengan winglet 90° mampu mulai berputar pada kecepatan angin yang lebih rendah, yaitu 4,1 m/s, dibandingkan turbin tanpa winglet yang baru mampu berputar pada kecepatan 4,3 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan winglet bersudut kelengkungan 90° memberikan pengaruh positif terhadap kemampuan turbin untuk mulai berputar, yang berkaitan dengan kemampuan winglet dalam mereduksi vortex pada ujung bilah sehingga gaya

angkat yang dihasilkan menjadi lebih besar pada kecepatan angin rendah.

#### Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian lapangan pada turbin tanpa winglet dan turbin dengan winglet 90°, meliputi kecepatan angin, tegangan, arus, kecepatan putaran, daya generator, dan koefisien daya, disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

**Tabel 3. Hasil Pengujian Turbin Angin Darrieus Tanpa Winglet**

| No | v (m/s) | V (Volt) | I (A) | RPM Turbin | RPM Generator | Daya Generator (W) | Cp (%) |
|----|---------|----------|-------|------------|---------------|--------------------|--------|
| 1  | 4,1     | 0,031    | 0,052 | 39,1       | 78,2          | 0,063              | 0,949  |
| 2  | 4,1     | 0,039    | 0,056 | 40,0       | 80,0          | 0,086              | 1,295  |
| 3  | 4,4     | 0,043    | 0,063 | 40,6       | 81,2          | 0,101              | 1,231  |
| 4  | 4,4     | 0,050    | 0,077 | 41,1       | 82,2          | 0,092              | 1,121  |
| 5  | 4,8     | 0,065    | 0,081 | 41,8       | 83,6          | 0,127              | 1,192  |

| No | v (m/s) | V (Volt) | I (A) | RPM Turbin | RPM Generator | Daya Generator (W) | Cp (%) |
|----|---------|----------|-------|------------|---------------|--------------------|--------|
| 6  | 4,8     | 0,078    | 0,100 | 42,5       | 85,0          | 0,142              | 1,333  |
| 7  | 5,3     | 0,082    | 0,102 | 43,1       | 86,2          | 0,153              | 1,067  |
| 8  | 5,3     | 0,088    | 0,122 | 43,9       | 87,8          | 0,175              | 1,220  |
| 9  | 5,8     | 0,092    | 0,130 | 49,2       | 94,4          | 0,213              | 1,133  |
| 10 | 5,8     | 0,100    | 0,145 | 57,1       | 114,2         | 0,343              | 1,825  |
| 11 | 6,3     | 0,105    | 0,150 | 57,3       | 114,6         | 0,482              | 2,001  |
| 12 | 6,3     | 0,110    | 0,185 | 61,8       | 122,2         | 0,575              | 2,387  |

**Tabel 4. Hasil Pengujian Turbin Angin Darrieus dengan Winglet 90°**

| No | v (m/s) | V (Volt) | I (A) | RPM Turbin | RPM Generator | Daya Generator (W) | Cp (%) |
|----|---------|----------|-------|------------|---------------|--------------------|--------|
| 1  | 4,1     | 0,720    | 0,100 | 40,1       | 80,2          | 0,072              | 1,085  |
| 2  | 4,1     | 0,732    | 0,129 | 41,8       | 83,6          | 0,094              | 1,416  |
| 3  | 4,4     | 0,748    | 0,140 | 43,1       | 86,2          | 0,104              | 1,268  |
| 4  | 4,4     | 0,754    | 0,159 | 45,4       | 90,4          | 0,119              | 1,450  |
| 5  | 4,8     | 0,773    | 0,179 | 47,1       | 94,2          | 0,136              | 1,277  |
| 6  | 4,8     | 0,792    | 0,190 | 48,9       | 97,8          | 0,150              | 1,408  |
| 7  | 5,3     | 0,801    | 0,200 | 50,2       | 100,4         | 0,160              | 1,116  |
| 8  | 5,3     | 0,822    | 0,225 | 52,1       | 104,2         | 0,184              | 1,283  |
| 9  | 5,8     | 0,846    | 0,300 | 54,1       | 108,2         | 0,253              | 1,346  |
| 10 | 5,8     | 0,865    | 0,422 | 57,8       | 115,6         | 0,365              | 1,942  |
| 11 | 6,3     | 0,885    | 0,590 | 59,9       | 119,8         | 0,522              | 2,167  |
| 12 | 6,3     | 0,920    | 0,650 | 61,6       | 123,2         | 0,596              | 2,475  |

Nilai daya angin (Pa) yang menjadi dasar perhitungan koefisien daya pada Tabel 3 dan Tabel 4 dihitung berdasarkan luas sapuan rotor turbin yang digunakan, sehingga nilai Pa hanya bergantung pada

kecepatan angin dan bernilai sama untuk kecepatan angin yang setara pada kedua konfigurasi turbin, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

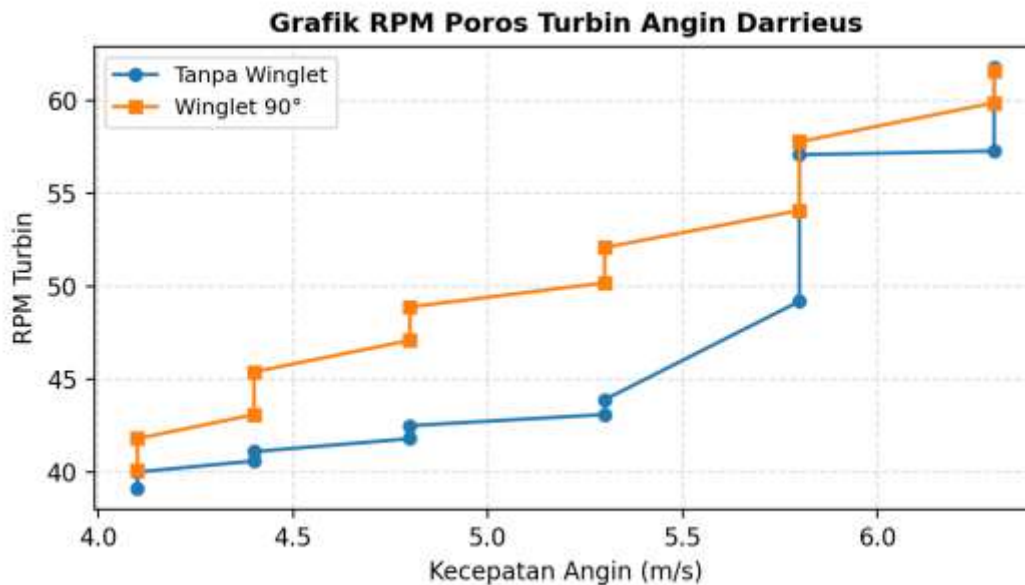
**Tabel 5. Daya Angin (Pa) pada Setiap Titik Kecepatan Angin Pengujian**

| v (m/s) | Daya Angin, Pa (Watt) |
|---------|-----------------------|
| 4,1     | 6,638                 |
| 4,4     | 8,205                 |
| 4,8     | 10,652                |
| 5,3     | 14,340                |
| 5,8     | 18,793                |
| 6,3     | 24,085                |

Dari data uji self-start dan hasil pengujian pada Tabel 3 dan Tabel 4, dapat dilihat bahwa secara umum RPM turbin, RPM generator, dan daya generator yang dihasilkan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, baik pada turbin tanpa winglet maupun dengan winglet 90°. Pada beberapa titik pengujian turbin tanpa winglet terlihat nilai yang relatif lebih rendah dibandingkan data pada kecepatan

angin yang sama, yang kemungkinan disebabkan oleh gangguan pada saat pengambilan data di lapangan. Perbedaan nilai antara kedua konfigurasi turbin mengindikasikan adanya pengaruh penambahan winglet terhadap performa turbin, yang dianalisis lebih lanjut pada sub-bab berikutnya.

#### ***Analisis Kecepatan Putaran Turbin***



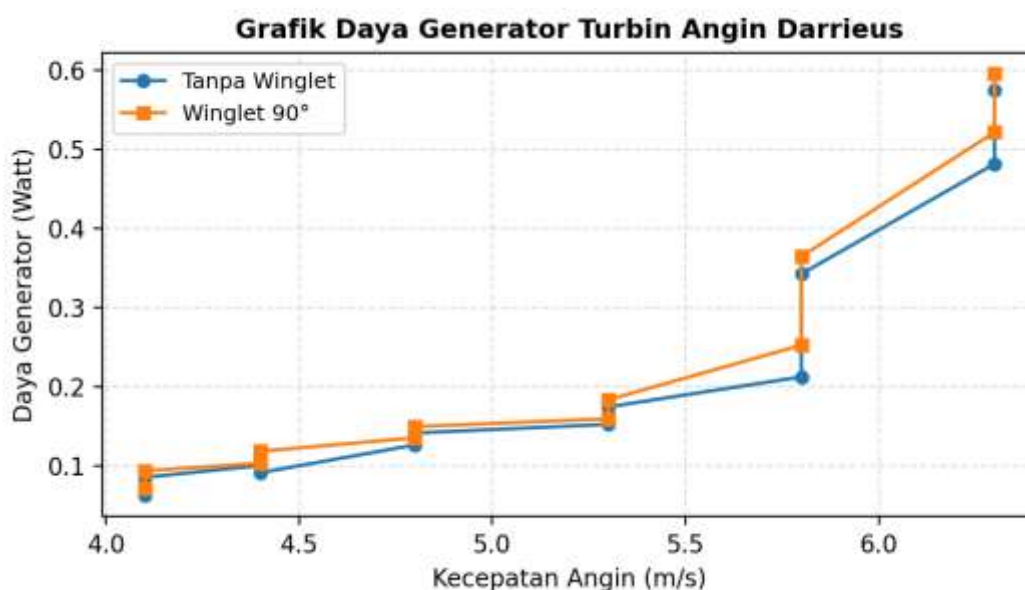
**Gambar 4. Grafik RPM Poros Turbin Angin Darrieus Tanpa Winglet dan dengan Winglet 90°**

Grafik pada Gambar 4 memperlihatkan perbandingan RPM turbin antara konfigurasi tanpa winglet dan dengan winglet 90° terhadap kecepatan angin. Secara umum, kedua konfigurasi menunjukkan tren peningkatan RPM seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, namun turbin dengan winglet 90° secara konsisten menghasilkan RPM yang lebih tinggi pada hampir seluruh rentang kecepatan angin yang diuji.

Pada kecepatan angin rendah hingga menengah (4,1–5,3 m/s), turbin dengan winglet 90° menghasilkan RPM rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa winglet, dengan selisih yang cenderung melebar seiring meningkatnya

kecepatan angin. Pada kecepatan 5,3 m/s misalnya, RPM turbin dengan winglet 90° mencapai 50,2–52,1, sedangkan turbin tanpa winglet hanya mencapai 43,1–43,9. Pada kecepatan angin tinggi (5,8–6,3 m/s), kedua konfigurasi menunjukkan RPM yang saling mendekati, dengan RPM tertinggi turbin dengan winglet 90° mencapai 61,6, hampir setara dengan RPM tertinggi turbin tanpa winglet sebesar 61,8. Kondisi ini mengindikasikan bahwa winglet 90° lebih efektif menekan tip vortex dan meningkatkan RPM turbin secara konsisten, terutama pada kecepatan angin rendah hingga menengah.

#### **Analisis Daya Generator**



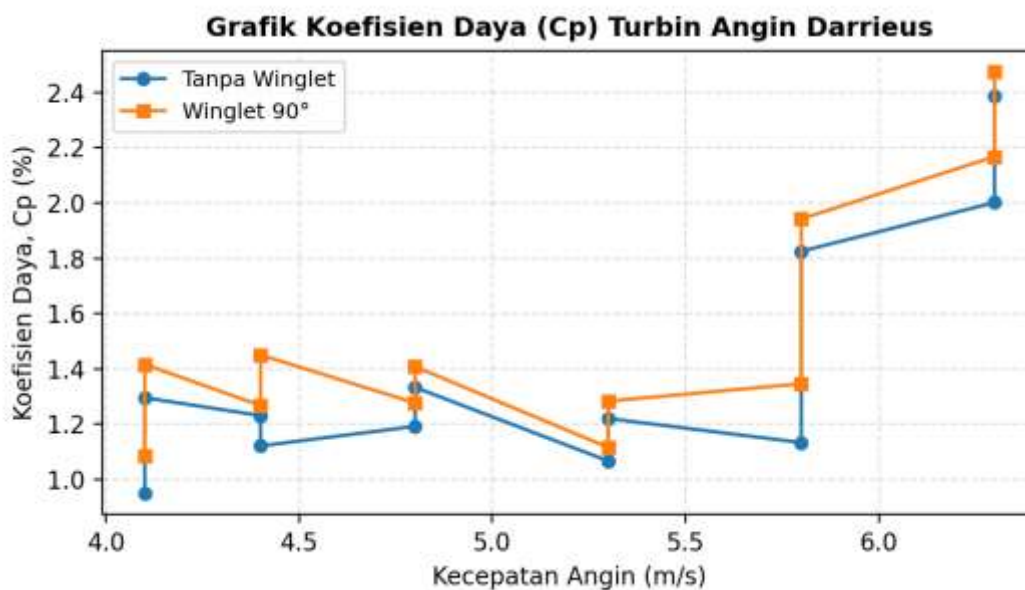
**Gambar 5. Grafik Daya Generator Turbin Angin Darrieus Tanpa Winglet dan dengan Winglet 90°**

Grafik pada Gambar 5 menunjukkan bahwa daya generator pada kedua konfigurasi turbin meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin, sejalan dengan semakin besarnya energi kinetik yang diterima rotor. Pada seluruh rentang kecepatan angin yang diuji, turbin dengan winglet 90° secara konsisten menghasilkan daya generator yang sedikit lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa winglet.

Pada kecepatan angin 4,1 m/s, daya generator turbin dengan winglet 90° mencapai 0,072–0,094 watt, sedikit lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa winglet

sebesar 0,063–0,086 watt. Perbedaan ini semakin terlihat pada kecepatan angin tinggi, di mana pada kecepatan 6,3 m/s daya generator turbin dengan winglet 90° mencapai 0,522–0,596 watt, dibandingkan 0,482–0,575 watt pada turbin tanpa winglet. Secara umum, penambahan winglet 90° memberikan peningkatan daya generator pada hampir seluruh titik kecepatan angin, meskipun selisihnya relatif kecil dibandingkan pengaruh kecepatan angin itu sendiri.

#### **Analisis Koefisien Daya**



**Gambar 6. Grafik Koefisien Daya (Cp) Turbin Angin Darrieus Tanpa Winglet dan dengan Winglet 90°**

Grafik pada Gambar 6 menyajikan perbandingan koefisien daya (Cp) antara turbin tanpa winglet dan turbin dengan winglet 90° terhadap kecepatan angin. Turbin dengan winglet 90° menghasilkan Cp yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa winglet pada hampir seluruh rentang kecepatan angin, dengan Cp tertinggi mencapai 2,475% pada kecepatan angin 6,3 m/s, dibandingkan 2,387% pada turbin tanpa winglet di kecepatan yang sama.

Pada kecepatan angin rendah hingga menengah (4,1–5,3 m/s), selisih Cp antara kedua konfigurasi relatif kecil, namun winglet 90° tetap unggul pada hampir seluruh titik, kecuali pada kecepatan 5,3 m/s di mana Cp kedua konfigurasi relatif berdekatan. Hal ini kemungkinan dipengaruhi oleh variasi arus ( $I$ ) yang tidak konsisten pada beberapa titik pengujian di lapangan. Secara keseluruhan, penambahan winglet

dengan sudut kelengkungan 90° memberikan peningkatan efisiensi konversi energi angin menjadi energi listrik pada hampir seluruh rentang kecepatan angin yang diuji, meskipun peningkatan tersebut perlu diuji signifikansinya secara statistik melalui uji ANOVA pada sub-bab berikut.

#### **Analisis ANOVA Dua Arah RPM Turbin**

Pengujian ANOVA dua arah bertujuan mengetahui pengaruh kecepatan angin, pengaruh penambahan winglet, dan interaksi antara keduanya terhadap performa turbin. Pengujian dilakukan pada enam titik kecepatan angin yang sama antara turbin tanpa winglet dan turbin dengan winglet 90°, yaitu 4,1; 4,4; 4,8; 5,3; 5,8; dan 6,3 m/s, masing-masing dengan dua kali pengulangan (desain seimbang:  $b = 6$  taraf kecepatan angin,  $k = 2$  taraf winglet,  $n = 2$  ulangan), pada taraf signifikansi  $\alpha = 5\%$ .

**Tabel 6. Hasil Uji ANOVA Dua Arah terhadap RPM Turbin (Tanpa Winglet vs Winglet 90°)**

| Sumber Varian   | Jumlah Kuadrat | Derajat Bebas | Rata-rata Kuadrat | F Hitung | F Tabel |
|-----------------|----------------|---------------|-------------------|----------|---------|
| Kecepatan Angin | 2005,5983      | 5             | 401,1197          | 7,1434   | 3,1059  |
| Winglet 90°     | 270,6817       | 1             | 270,6817          | 4,8205   | 4,7472  |
| Interaksi       | 219,2633       | 5             | 43,8527           | 0,7810   | 3,1059  |
| Error           | 673,8300       | 12            | 56,1525           | -        | -       |
| Total           | 3169,3733      | 23            | -                 | -        | -       |

Hasil uji ANOVA menunjukkan F1 hitung (7,1434) > F1 tabel (3,1059), sehingga H0 ditolak dan terdapat perbedaan yang signifikan pada RPM turbin akibat perbedaan kecepatan angin. F2 hitung (4,8205) > F2 tabel (4,7472), sehingga H0 ditolak dan terdapat perbedaan signifikan pada RPM turbin akibat penambahan winglet 90°, meskipun nilai F hitung

berada tidak jauh di atas ambang F tabel. Adapun F3 hitung (0,7810) ≤ F3 tabel (3,1059), sehingga H0 diterima, yang berarti tidak terdapat interaksi yang signifikan antara kecepatan angin dan penambahan winglet dalam memengaruhi RPM turbin.

#### Analisis ANOVA Dua Arah Daya Generator

**Tabel 7. Hasil Uji ANOVA Dua Arah terhadap Daya Generator (Tanpa Winglet vs Winglet 90°)**

| Sumber Varian   | Jumlah Kuadrat | Derajat Bebas | Rata-rata Kuadrat | F Hitung | F Tabel |
|-----------------|----------------|---------------|-------------------|----------|---------|
| Kecepatan Angin | 0,6117         | 5             | 0,1223            | 63,3203  | 3,1059  |
| Winglet 90°     | 0,0017         | 1             | 0,0017            | 0,8887   | 4,7472  |
| Interaksi       | 0,0006         | 5             | 0,0001            | 0,0629   | 3,1059  |
| Error           | 0,0232         | 12            | 0,0019            | -        | -       |
| Total           | 0,6372         | 23            | -                 | -        | -       |

Berbeda dengan hasil pada RPM turbin, uji ANOVA pada daya generator menunjukkan F1 hitung (63,3203) > F1 tabel (3,1059), sehingga H0 ditolak dan terdapat perbedaan yang sangat signifikan pada daya generator akibat perbedaan kecepatan angin. F2 hitung (0,8887) ≤ F2 tabel (4,7472), sehingga H0 diterima, yang berarti penambahan winglet 90° belum

berpengaruh signifikan secara statistik terhadap daya generator yang dihasilkan. F3 hitung (0,0629) ≤ F3 tabel (3,1059), sehingga H0 diterima dan tidak terdapat interaksi signifikan antara kecepatan angin dan penambahan winglet terhadap daya generator.

#### Analisis ANOVA Dua Arah Koefisien Daya

**Tabel 8. Hasil Uji ANOVA Dua Arah terhadap Koefisien Daya (Tanpa Winglet vs Winglet 90°)**

| Sumber Varian   | Jumlah Kuadrat | Derajat Bebas | Rata-rata Kuadrat | F Hitung | F Tabel |
|-----------------|----------------|---------------|-------------------|----------|---------|
| Kecepatan Angin | 3,4663         | 5             | 0,6933            | 11,5450  | 3,1059  |
| Winglet 90°     | 0,0908         | 1             | 0,0908            | 1,5118   | 4,7472  |
| Interaksi       | 0,0118         | 5             | 0,0024            | 0,0392   | 3,1059  |
| Error           | 0,7206         | 12            | 0,0600            | -        | -       |
| Total           | 4,2894         | 23            | -                 | -        | -       |

Hasil uji ANOVA terhadap koefisien daya menunjukkan F1 hitung (11,5450) > F1 tabel (3,1059), sehingga H0 ditolak dan terdapat perbedaan yang signifikan pada koefisien daya akibat perbedaan kecepatan angin. Sebaliknya, F2 hitung (1,5118) ≤ F2 tabel (4,7472), sehingga H0 diterima dan belum terdapat perbedaan yang signifikan pada koefisien daya akibat penambahan winglet 90°. F3 hitung (0,0392) ≤ F3 tabel (3,1059), sehingga H0 diterima dan tidak terdapat interaksi signifikan antara

kecepatan angin dan penambahan winglet dalam memengaruhi koefisien daya turbin angin Darrieus.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis statistik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut.

a. Kecepatan angin terbukti berpengaruh sangat signifikan terhadap RPM turbin, daya generator, maupun koefisien daya turbin angin Darrieus dua



bilah, baik pada konfigurasi tanpa winglet maupun dengan winglet 90°. Kinerja optimal turbin tercapai pada kecepatan angin tertinggi yang diuji, yaitu 6,3 m/s, dengan daya generator mencapai 0,482–0,596 watt dan koefisien daya mencapai 2,00–2,47%.

b. Penambahan winglet dengan sudut kelengkungan 90° terbukti mempercepat kemampuan self-start turbin, yaitu pada kecepatan angin 4,1 m/s dibandingkan 4,3 m/s pada turbin tanpa winglet, serta memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan RPM turbin ( $F_{hitung} 4,8205 > F_{tabel} 4,7472$ ). Namun demikian, penambahan winglet 90° belum memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap daya generator maupun koefisien daya, meskipun secara deskriptif nilai rata-rata daya generator dan koefisien daya turbin dengan winglet 90° cenderung lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa winglet pada hampir seluruh titik kecepatan angin yang diuji. Hasil uji ANOVA dua arah juga menunjukkan tidak terdapat interaksi statistik yang signifikan antara kecepatan angin dan penambahan winglet terhadap ketiga parameter performa tersebut.

Secara keseluruhan, kecepatan angin merupakan faktor dominan yang menentukan performa turbin angin Darrieus dua bilah berkonfigurasi sudut 90°, sedangkan penambahan winglet dengan sudut kelengkungan 90° memberikan manfaat utama pada peningkatan kemampuan self-start dan RPM turbin,

## DAFTAR PUSTAKA

- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook* (2nd ed.). Wiley.
- Dewan Energi Nasional. (2020). *Outlook energi Indonesia 2020*. Dewan Energi Nasional.
- Hakim, L., Rijano, A., & Muzaki, M. (2018). Analisis regresi kecepatan angin terhadap daya turbin angin jenis VAWT tipe Darrieus-Savonius. *Jurnal Energi dan Teknologi Manufaktur*, 1(2).
- Halimi, M. S., Lesmanah, U., & Robbi, N. (2024). Analisis pengaruh penambahan winglet terhadap performa turbin angin Darrieus. *Jurnal Teknik Mesin*.
- Howell, R., Qin, N., Edwards, J., & Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(2), 412–422.
- dengan kecenderungan peningkatan daya generator dan efisiensi konversi energi meskipun belum signifikan secara statistik pada rentang data yang diuji.
- ## 5. SARAN
1. Memperluas rentang kecepatan angin pengujian di atas 6,3 m/s guna mengetahui secara pasti kecepatan angin yang menghasilkan kinerja optimal maksimum (rated speed) serta perilaku turbin mendekati cut-out speed.
  2. Menambahkan variasi sudut kelengkungan winglet lain (misalnya 30°, 45°, atau 60°) pada konfigurasi dua bilah agar dapat diketahui sudut winglet yang memberikan peningkatan performa paling optimal terhadap RPM, daya generator, dan koefisien daya.
  3. Menambah jumlah replikasi pengambilan data pada setiap titik kecepatan angin serta menggunakan sensor arus dan tegangan dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi, mengingat pengaruh winglet 90° terhadap daya generator dan koefisien daya belum signifikan secara statistik pada penelitian ini.
  4. Melakukan kajian lebih mendalam mengenai mekanisme aerodinamis winglet dalam mereduksi vortex ujung bilah pada kondisi awal putaran (start-up), termasuk pengukuran torsi awal turbin, mengingat winglet 90° terbukti mempercepat kemampuan self-start turbin.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. IPCC.
- International Energy Agency. (2022). *World energy outlook 2022*. IEA.
- Mertens, S. (2006). *Wind energy in the built environment: Concentrator effects of buildings*. Delft University of Technology.
- Rezaeiha, A., Kalkman, I., & Blocken, B. (2017). Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*, 197, 132–150.
- Saad, A. S., & Ahmed, M. (2022). Effect of twist angle on the performance of Darrieus vertical axis wind turbines. *Volume 11: Wind Energy*.
- Siregar, A. M., & Lubis, F. (2019). Uji keandalan prototype turbin angin Savonius tipe-U sebagai pembangkit listrik alternatif. *MEKANIK: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 5(1), 39–40.
- Tahzib, T., Hannan, M. A., Ahmed, Y. A., & Kamal, I. Z. M. (2022). Performance analysis of H-

Darrieus wind turbine with NACA0018 and S1046 aerofoils: Impact of blade angle and tip speed ratio. CFD Letters, 14(2), 10–23.