

# ANALISIS PENGARUH BESAR SUDUT WINGLET TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN DARRIEUS

Ahmad Syukron Maulana<sup>1</sup>, Unung Lesmanah<sup>2</sup>, Nur Robbi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universitas Islam Malang

Email: 22001052032@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

Turbin angin Darrieus merupakan salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah dan tidak bergantung pada arah datangnya angin. Meskipun demikian, performa turbin ini masih dibatasi oleh fenomena pusaran ujung sudu (tip vortex) yang menimbulkan kehilangan energi. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi sudut winglet (30°, 60°, dan 90°) yang dipasang pada ujung sudu terhadap performa turbin angin Darrieus empat sudu pada berbagai kondisi kecepatan angin. Pengujian dilakukan secara eksperimental di lapangan menggunakan model turbin skala prototipe berbahan PLA+ yang dibuat melalui proses pencetakan 3D. Parameter yang diamati meliputi kecepatan putaran poros (RPM), daya listrik generator, dan koefisien daya ( $C_p$ ), yang kemudian dianalisis menggunakan uji ANOVA dua arah pada taraf signifikansi 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan kecepatan angin berpengaruh signifikan terhadap RPM turbin, sedangkan variasi sudut winglet berpengaruh signifikan terhadap RPM dan koefisien daya. Winglet dengan sudut 90° memberikan performa optimal serta kemampuan self-start terbaik pada kecepatan angin rendah hingga menengah, sementara winglet 60° unggul pada kecepatan angin tinggi. Tidak ditemukan interaksi statistik yang signifikan antara kedua faktor tersebut pada seluruh parameter yang diuji.

**Kata Kunci:** Turbin Darrieus, Winglet, Sudut Winglet, Koefisien Daya, ANOVA

## Abstract

The Darrieus wind turbine is a type of vertical-axis wind turbine (VAWT) capable of operating at low wind speeds and independent of wind direction. However, its performance is still limited by tip-vortex phenomena at the blade tips, which cause energy losses. This study examines the effect of winglet angle variation (30°, 60°, and 90°) attached to the blade tips on the performance of a four-bladed Darrieus wind turbine under several wind-speed conditions. Field experiments were carried out using a PLA+ prototype turbine produced through 3D printing. The parameters observed were shaft rotational speed (RPM), generator electrical power, and power coefficient ( $C_p$ ), which were then evaluated using a two-way ANOVA at a 5% significance level. The results show that wind speed significantly affects turbine RPM, while winglet angle variation significantly affects both RPM and power coefficient. The 90° winglet gave the best performance and self-start capability at low-to-medium wind speeds, whereas the 60° winglet performed better at high wind speeds. No significant statistical interaction was found between the two factors for any of the parameters tested.

**Keywords:** Darrieus Turbine, Winglet, Winglet Angle, Power Coefficient, ANOVA

## 1. PENDAHULUAN

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berperan penting dalam mendukung transisi menuju sistem energi bersih dan berkelanjutan (Rezaeiha et al., 2017). Data International Renewable Energy Agency (2021) menunjukkan bahwa kapasitas terpasang turbin angin secara global terus meningkat dari tahun ke tahun seiring meningkatnya kebutuhan energi bersih dan upaya menekan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Salah satu teknologi konversi energi angin yang banyak dikembangkan adalah turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe Darrieus. Turbin jenis ini memiliki keunggulan mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah serta tidak bergantung pada arah datangnya angin, sehingga cocok digunakan pada wilayah dengan kondisi angin yang berubah-ubah (Mertens, 2006). Meskipun demikian, performa turbin Darrieus masih dibatasi oleh fenomena tip vortex yang timbul akibat perbedaan tekanan pada ujung sudu. Fenomena ini menimbulkan induced drag yang menurunkan efisiensi konversi energi angin menjadi energi mekanik (Li et al., 2021).

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk mengurangi efek tip vortex adalah penambahan winglet pada ujung sudu. Sejumlah penelitian terdahulu telah

membuktikan efektivitas penambahan winglet dalam meningkatkan performa turbin angin sumbu vertikal. Laín et al. (2018) melalui simulasi CFD menunjukkan bahwa winglet mampu menekan tip vortex dan menstabilkan aliran udara di ujung sudu. Malla et al. (2020) serta Zhu et al. (2019) memperlihatkan bahwa penambahan winglet secara konsisten meningkatkan koefisien daya turbin dibandingkan tanpa winglet. Muritala dan Adio (2025) pada turbin hibrida Savonius–Darrieus juga menemukan bahwa winglet meningkatkan RPM, torsi, dan kemampuan self-start turbin, terutama pada kecepatan angin rendah hingga menengah.

Penelitian-penelitian tersebut umumnya membandingkan turbin dengan dan tanpa winglet secara umum, tanpa mengkaji secara spesifik pengaruh besar sudut kelengkungan winglet terhadap performa turbin. Padahal, sudut winglet menentukan seberapa besar aliran udara dibelokkan sehingga turut memengaruhi pembentukan vortex dan distribusi tekanan di sepanjang sudu. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi sudut winglet (30°, 60°, dan 90°) yang dipasang pada turbin angin Darrieus empat sudu terhadap RPM poros, daya generator, dan koefisien daya pada berbagai kondisi kecepatan angin.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang diawali dengan pembuatan model turbin angin Darrieus tipe H-rotor berbahan PLA+ melalui proses pencetakan tiga dimensi (3D printing). Model turbin dirancang dengan empat sudu berpenampang aerofoil NACA 0018. Pada ujung setiap sudu dipasang winglet

dengan tiga variasi sudut kelengkungan, yaitu 30°, 60°, dan 90°, sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Seluruh variasi winglet dibuat dengan dimensi dan profil aerofoil yang identik agar perbedaan performa yang diperoleh benar-benar disebabkan oleh perubahan sudut. Spesifikasi lengkap turbin uji disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 1. Konfigurasi Winglet**

| Konfigurasi        | 30°       | 60°       | 90°       |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Kelengkungan       | 30°       | 60°       | 90°       |
| Aerofoil           | NACA 0018 | NACA 0018 | NACA 0018 |
| Panjang chord (cm) | 0,413     | 0,413     | 0,413     |
| Panjang (cm)       | 4,37      | 4,37      | 4,37      |
| Tinggi (cm)        | 5         | 5         | 5         |

**Tabel 2. Spesifikasi Variabel Terkontrol Turbin Darrieus**

| No | Parameter                  | Nilai         |
|----|----------------------------|---------------|
| 1  | Jumlah bilah               | 4             |
| 2  | Jenis aerofoil             | NACA 0018     |
| 3  | Panjang chord bilah (m)    | 0,083         |
| 4  | Blade span (m)             | 0,3           |
| 5  | Jari-jari turbin (m)       | 0,27          |
| 6  | Panjang lintasan bilah (m) | 2,355         |
| 7  | Panjang chord winglet (m)  | 0,083         |
| 8  | Panjang winglet (m)        | 0,103         |
| 9  | Tinggi winglet (m)         | 0,096         |
| 10 | Sudut winglet (°)          | 30°, 60°, 90° |
| 11 | Material                   | PLA+          |
| 12 | Solidity                   | 0,195         |

Pengujian dilakukan secara langsung di lapangan pada 20 Desember 2024 di Pantai Balekambang, Kabupaten Malang. Instrumen yang digunakan meliputi anemometer untuk mengukur kecepatan angin, tachometer untuk mengukur kecepatan putaran poros turbin, serta multimeter untuk mengukur tegangan dan arus keluaran generator. Pengambilan data dilakukan setiap 10 detik selama 30–60 menit pada masing-masing variasi sudut winglet, mencakup pula kondisi turbin tanpa winglet sebagai pembanding.

Daya angin yang tersedia pada penampang sapuan rotor dihitung menggunakan persamaan:

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots \dots \dots (1)$$

dengan  $P_a$  adalah daya angin (Watt),  $\rho$  massa jenis udara ( $1,204 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  luas sapuan bilah ( $\text{m}^2$ ), dan  $v$  kecepatan angin ( $\text{m/s}$ ). Daya listrik yang dihasilkan generator dihitung dengan:

$$P_g = I \cdot V \dots \dots \dots (2)$$

dengan  $P_g$  daya generator (Watt),  $I$  arus listrik (Ampere), dan  $V$  tegangan listrik (Volt). Koefisien daya ( $C_p$ ) yang menunjukkan efisiensi konversi energi angin oleh turbin dihitung dengan persamaan:

$$C_p = P / (\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3) \dots \dots \dots (3)$$

Data hasil pengujian diolah dan dianalisis menggunakan uji ANOVA dua arah pada taraf signifikansi  $\alpha = 0,05$  untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin, pengaruh sudut winglet, serta interaksi antara kedua faktor tersebut terhadap RPM turbin, daya generator, dan koefisien daya. Mengingat titik kecepatan angin pengujian winglet 30° tidak sepenuhnya beririsan dengan winglet 60° dan 90°, uji ANOVA dua arah dilakukan dengan membandingkan winglet 60° dan winglet 90° pada tiga titik kecepatan angin yang sama, yaitu 2,9; 3,2; dan 4,2  $\text{m/s}$ , masing-masing dengan dua kali ulangan.

#### Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam pengujian meliputi tachometer, anemometer, multimeter, dan generator DC. Bahan yang digunakan meliputi satu unit prototipe turbin angin Darrieus empat sudu serta tiga pasang winglet dengan variasi sudut 30°, 60°, dan 90° yang seluruhnya dicetak menggunakan material PLA+.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Data Hasil Pengujian Turbin Angin Darrieus

Hasil uji self-start pada Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh variasi sudut winglet mampu membuat turbin

berputar sendiri tanpa bantuan penggerak awal. Winglet 60° memiliki kemampuan self-start terbaik karena mampu mulai berputar pada kecepatan angin terendah, yaitu 2,5 m/s, disusul winglet 90° pada 2,9 m/s, sedangkan winglet 30° membutuhkan kecepatan angin yang lebih tinggi, yaitu

3,1 m/s. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa sudut kelengkungan winglet memengaruhi besar torsi awal yang dihasilkan rotor untuk mengatasi momen inersia pada saat mulai berputar.

**Tabel 3. Uji Self-Start**

| Variasi Winglet | Kecepatan Angin Minimum (m/s) | RPM Turbin Awal | Keterangan Self-Start |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|
| 30°             | 3,1                           | 7,55            | Mudah start           |
| 60°             | 2,5                           | 65              | Sangat cepat start    |
| 90°             | 2,9                           | 9               | Lambat start          |

Data lengkap hasil pengujian berupa kecepatan angin ( $v$ ), daya angin ( $P_a$ ), daya generator ( $P_g$ ), dan koefisien

daya ( $C_p$ ) untuk masing-masing variasi sudut winglet disajikan pada Tabel 4 hingga Tabel 6.

**Tabel 4. Daya Angin dan Daya Generator Turbin Winglet 30°**

| No | $v$ (m/s) | Daya Angin (Watt) | Daya Generator (Watt) | Koefisien Daya (%) |
|----|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| 1  | 3,1       | 2,895510          | 0,026215              | 0,905367           |
| 2  | 3,1       | 2,895510          | 0,010920              | 0,377136           |
| 3  | 3,2       | 3,184856          | 0,002825              | 0,088701           |
| 4  | 3,3       | 3,492865          | 0,016380              | 0,468956           |
| 5  | 3,3       | 3,492865          | 0,003034              | 0,086863           |
| 6  | 3,4       | 3,820117          | 0,013746              | 0,359832           |
| 7  | 3,5       | 4,167197          | 0,009424              | 0,226147           |
| 8  | 3,5       | 4,167197          | 0,021489              | 0,515670           |
| 9  | 3,5       | 4,167197          | 0,028050              | 0,673114           |
| 10 | 4,2       | 7,200917          | 0,041470              | 0,575899           |
| 11 | 4,3       | 7,727612          | 0,044384              | 0,574356           |
| 12 | 5,0       | 12,149263         | 0,050220              | 0,413358           |
| 13 | 5,3       | 14,469967         | 0,033180              | 0,229303           |
| 14 | 5,9       | 19,961628         | 0,054180              | 0,271421           |
| 15 | 6,0       | 20,993926         | 0,051000              | 0,242927           |

**Tabel 5. Daya Angin dan Daya Generator Turbin Winglet 60°**

| No | $v$ (m/s) | Daya Angin (Watt) | Daya Generator (Watt) | Koefisien Daya (%) |
|----|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| 1  | 2,9       | 2,370467          | 0                     | 0                  |
| 2  | 2,9       | 2,370467          | 0                     | 0                  |
| 3  | 3,2       | 3,184856          | 0,006650              | 0,208801           |
| 4  | 3,2       | 3,184856          | 0,004515              | 0,141765           |
| 5  | 4,2       | 7,200917          | 0,023100              | 0,320792           |
| 6  | 4,2       | 7,200917          | 0,028800              | 0,399949           |
| 7  | 5,2       | 13,666269         | 0,066930              | 0,489746           |
| 8  | 5,2       | 13,666269         | 0,035883              | 0,262566           |
| 9  | 6,0       | 20,993926         | 0,081900              | 0,390113           |
| 10 | 6,0       | 20,993926         | 0,104000              | 0,495381           |

**Tabel 6. Daya Angin dan Daya Generator Turbin Winglet 90°**

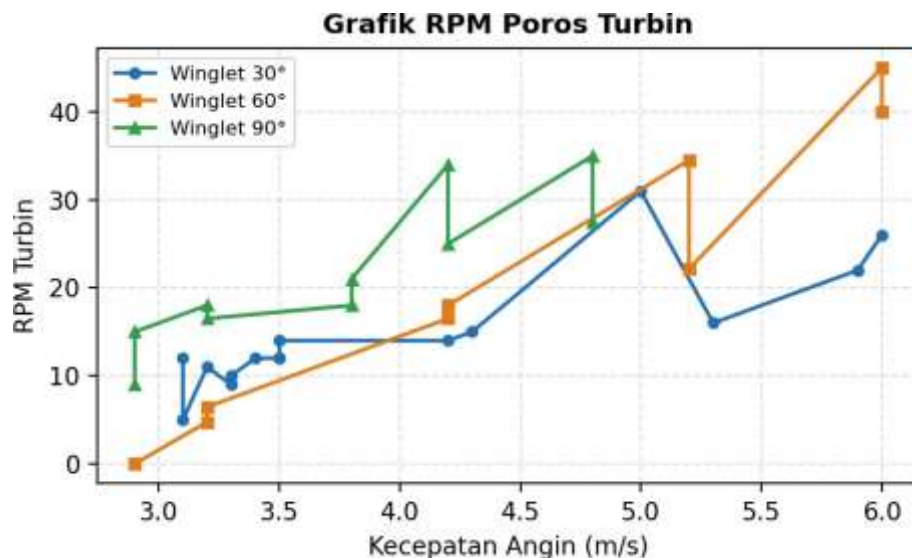
| No | $v$ (m/s) | Daya Angin (Watt) | Daya Generator (Watt) | Koefisien Daya (%) |
|----|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| 1  | 2,9       | 2,370467          | 0,003675              | 0,155033           |
| 2  | 2,9       | 2,370467          | 0,021229              | 0,895562           |

| No | v (m/s) | Daya Angin (Watt) | Daya Generator (Watt) | Koefisien Daya (%) |
|----|---------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| 3  | 3,2     | 3,184856          | 0,030272              | 0,950498           |
| 4  | 3,2     | 3,184856          | 0,034989              | 1,098605           |
| 5  | 3,8     | 5,333235          | 0,064940              | 1,217647           |
| 6  | 3,8     | 5,333235          | 0,052000              | 0,975018           |
| 7  | 4,2     | 7,200917          | 0,058138              | 0,807369           |
| 8  | 4,2     | 7,200917          | 0,018204              | 0,252801           |
| 9  | 4,8     | 10,748890         | 0,022688              | 0,211073           |
| 10 | 4,8     | 10,748890         | 0,022222              | 0,206738           |

### Analisis Kecepatan Putaran Turbin

Gambar 1 memperlihatkan hubungan antara kecepatan angin dan RPM poros turbin pada ketiga variasi sudut winglet. Secara umum, ketiga variasi menunjukkan tren peningkatan RPM seiring bertambahnya kecepatan angin, namun dengan karakteristik berbeda pada tiap rentang kecepatan. Pada kecepatan angin rendah (2,9–3,2 m/s),

winglet 60° dan 90° telah menghasilkan putaran meskipun relatif kecil, sejalan dengan hasil uji self-start pada Tabel 3. Pada kecepatan angin menengah (3,3–4,3 m/s), winglet 90° menghasilkan RPM tertinggi di antara ketiga variasi, mencapai 34 RPM pada kecepatan 4,2 m/s. Sebaliknya, pada kecepatan angin tinggi (5–6 m/s), winglet 60° unggul dengan RPM mencapai 45 pada kecepatan 6 m/s, melampaui winglet 30° yang hanya mencapai 26–31 RPM pada rentang kecepatan yang sama.



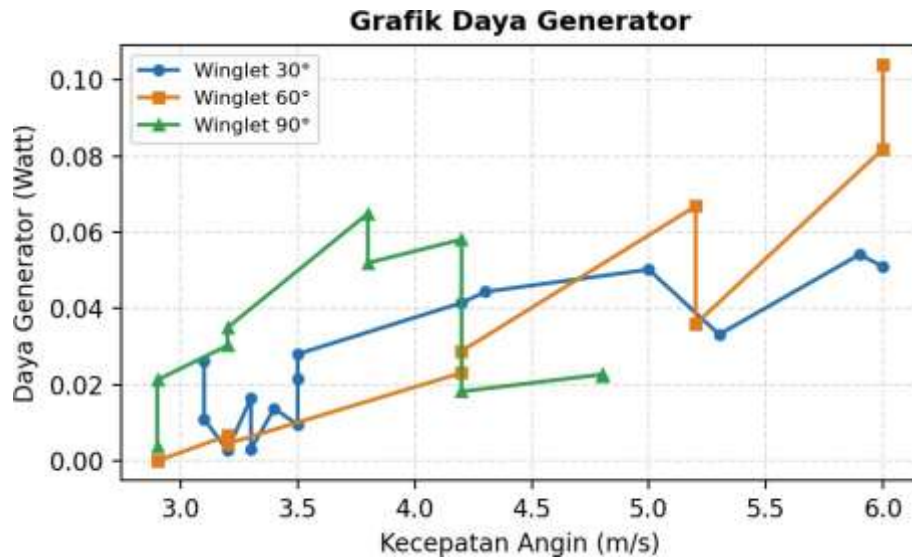
Gambar 1. Grafik RPM Poros Turbin

### Analisis Daya

Gambar 2 menyajikan perbandingan daya generator pada ketiga variasi sudut winglet. Seluruh variasi menunjukkan peningkatan daya generator seiring bertambahnya kecepatan angin. Pada rentang kecepatan angin rendah hingga menengah (2,9–4,2 m/s), winglet 90°

secara konsisten menghasilkan daya generator tertinggi, misalnya 0,058 watt pada kecepatan 4,2 m/s, dibandingkan

winglet 60° (0,029 watt) dan winglet 30° (0,041 watt). Pada rentang kecepatan angin tinggi (5–6 m/s), karakteristik ini berbalik, di mana winglet 60° menghasilkan daya tertinggi hingga 0,104 watt pada kecepatan 6 m/s, melampaui winglet 30° yang berkisar 0,051–0,054 watt pada rentang kecepatan yang sama.



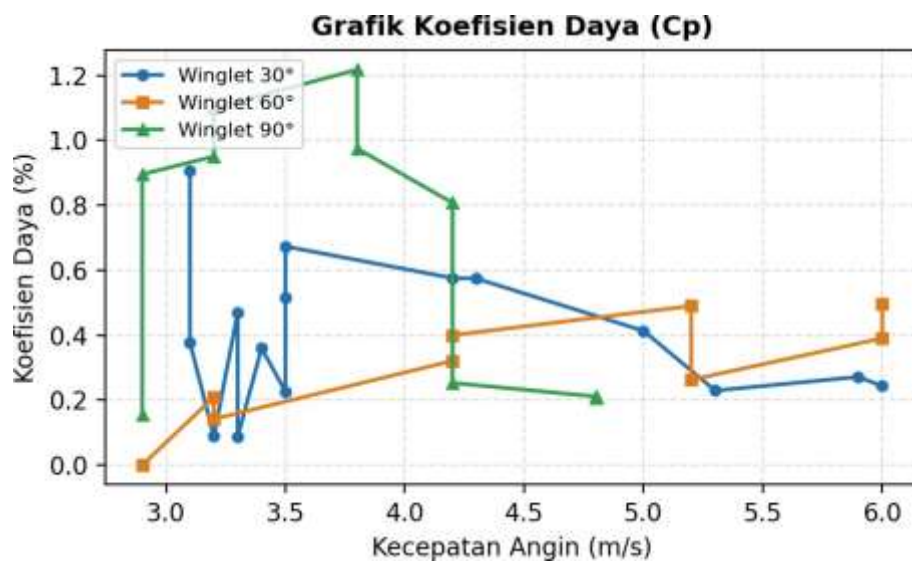
Gambar 2. Grafik Daya Generator

### Analisis Koefisien Daya

Gambar 3 menunjukkan perbandingan koefisien daya ( $C_p$ ) pada ketiga variasi sudut winglet. Winglet 90° menghasilkan nilai  $C_p$  tertinggi, yaitu 1,22% pada kecepatan angin 3,8 m/s, diikuti winglet 30° dengan  $C_p$  maksimum 0,91% pada 3,1 m/s, dan winglet 60° dengan  $C_p$

maksimum 0,50% pada 6 m/s. Pada rentang kecepatan angin rendah hingga menengah, winglet 90° secara

konsisten unggul karena mampu menekan pembentukan tip vortex secara lebih efektif. Sebaliknya, pada kecepatan angin tinggi, winglet 60° menunjukkan nilai  $C_p$  yang lebih stabil dibandingkan winglet 30° yang justru mengalami penurunan setelah melewati titik puncaknya.

Gambar 3. Grafik Koefisien Daya ( $C_p$ )

### Analisis ANOVA Dua Arah

Uji ANOVA dua arah dilakukan untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin, pengaruh sudut winglet, serta interaksi antara keduanya terhadap RPM turbin, daya generator, dan koefisien daya, dengan membandingkan

winglet 60° dan winglet 90° pada tiga titik kecepatan angin yang beririsan (2,9; 3,2; dan 4,2 m/s). Nilai F tabel pada

taraf signifikansi 5% adalah  $F_{1(2;6)} = 5,14$  untuk faktor kecepatan angin,  $F_{2(1;6)} = 5,99$  untuk faktor winglet, dan  $F_{3(2;6)} = 5,14$  untuk interaksi keduanya.

#### a. RPM Turbin

Tabel 7. Hasil Uji ANOVA Dua Arah – RPM Turbin (Winglet 60° vs 90°)

| Sumber Varian | Jumlah Kuadrat | Derajat Bebas | Rata-Rata Kuadrat | F Hitung |
|---------------|----------------|---------------|-------------------|----------|
|---------------|----------------|---------------|-------------------|----------|

|                             |          |   |          |         |
|-----------------------------|----------|---|----------|---------|
| Rata-rata Baris (Kecepatan) | 632,1650 | 2 | 316,0825 | 30,4927 |
|-----------------------------|----------|---|----------|---------|

| Sumber Varian             | Jumlah Kuadrat | Derajat Bebas | Rata-Rata Kuadrat | F Hitung |
|---------------------------|----------------|---------------|-------------------|----------|
| Rata-rata Kolom (Winglet) | 429,6033       | 1             | 429,6033          | 41,4442  |
| Interaksi                 | 0,1817         | 2             | 0,0908            | 0,0088   |
| Error                     | 62,1950        | 6             | 10,3658           | -        |
| Total                     | 1124,1450      | 11            | -                 | -        |

Hasil uji ANOVA dua arah terhadap RPM turbin disajikan pada Tabel 7. Nilai F hitung untuk faktor kecepatan angin (30,49) dan faktor winglet (41,44) sama-sama melampaui F tabel, sehingga  $H_0$  ditolak untuk kedua faktor tersebut. Dengan demikian, baik perbedaan kecepatan angin maupun perbedaan sudut winglet (60° dan

90°) memberikan pengaruh signifikan terhadap RPM turbin. Nilai F hitung interaksi (0,0088) berada di bawah F tabel, sehingga tidak terdapat interaksi yang signifikan antara kecepatan angin dan sudut winglet.

#### **b. Daya Generator**

**Tabel 8. Hasil Uji ANOVA Dua Arah – Daya Generator (Winglet 60° vs 90°)**

| Sumber Varian               | Jumlah Kuadrat | Derajat Bebas | Rata-Rata Kuadrat | F Hitung |
|-----------------------------|----------------|---------------|-------------------|----------|
| Rata-rata Baris (Kecepatan) | 0,0013         | 2             | 0,0007            | 4,0862   |
| Rata-rata Kolom (Winglet)   | 0,0009         | 1             | 0,0009            | 5,4599   |
| Interaksi                   | 0,0001         | 2             | 0,0001            | 0,4420   |
| Error                       | 0,0010         | 6             | 0,0002            | -        |
| Total                       | 0,0034         | 11            | -                 | -        |

Hasil uji ANOVA dua arah terhadap daya generator disajikan pada Tabel 8. Nilai F hitung faktor kecepatan angin (4,09) berada di bawah F tabel (5,14), sehingga tidak terdapat pengaruh signifikan dari kecepatan angin terhadap daya generator. Nilai F hitung faktor winglet (5,46) juga berada di bawah F tabel (5,99), sehingga pengaruh sudut

winglet terhadap daya generator berada pada batas ambang signifikansi. Nilai F hitung interaksi (0,44) jauh di bawah F tabel, sehingga tidak terdapat interaksi yang signifikan.

#### **c. Koefisien Daya**

**Tabel 9. Hasil Uji ANOVA Dua Arah – Koefisien Daya (Winglet 60° vs 90°)**

| Sumber Varian               | Jumlah Kuadrat | Derajat Bebas | Rata-Rata Kuadrat | F Hitung |
|-----------------------------|----------------|---------------|-------------------|----------|
| Rata-rata Baris (Kecepatan) | 0,2280         | 2             | 0,1140            | 1,5396   |
| Rata-rata Kolom (Winglet)   | 0,7949         | 1             | 0,7949            | 10,7348  |
| Interaksi                   | 0,2311         | 2             | 0,1155            | 1,5601   |
| Error                       | 0,4443         | 6             | 0,0741            | -        |
| Total                       | 1,6983         | 11            | -                 | -        |

Hasil uji ANOVA dua arah terhadap koefisien daya disajikan pada Tabel 9. Nilai F hitung faktor kecepatan angin (1,54) berada di bawah F tabel (5,14), sehingga perbedaan kecepatan angin secara mandiri tidak berpengaruh signifikan terhadap koefisien daya. Sebaliknya, nilai F hitung faktor winglet (10,73) melampaui F tabel (5,99), sehingga terdapat pengaruh signifikan dari perbedaan sudut winglet terhadap koefisien daya. Nilai F hitung interaksi (1,56) berada di bawah F tabel, sehingga tidak terdapat interaksi yang signifikan.

## **4. KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis statistik ANOVA dua arah pada taraf signifikansi 5%, perbedaan kecepatan angin berpengaruh signifikan terhadap RPM turbin angin Darrieus empat sudu, tetapi secara mandiri tidak berpengaruh signifikan terhadap daya generator maupun koefisien daya. Tidak ditemukan interaksi statistik yang signifikan antara kecepatan angin dan sudut winglet pada seluruh parameter yang diuji.

Variasi sudut kelengkungan winglet (30°, 60°, dan 90°) terbukti berpengaruh signifikan terhadap RPM turbin dan koefisien daya, sedangkan pengaruhnya terhadap daya generator berada pada batas ambang signifikansi. Winglet 90° memberikan performa optimal pada kecepatan angin rendah hingga menengah serta meningkatkan kemampuan self-start turbin, sedangkan winglet 60° memberikan performa terbaik pada kecepatan angin tinggi. Pemilihan sudut winglet perlu disesuaikan dengan karakteristik kecepatan angin di lokasi pemasangan turbin.

## **5. SARAN**

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji lebih rinci titik transisi performa pada sudut winglet di antara 60° dan 90°, memperluas rentang kecepatan angin pengujian, mengeksplorasi variasi geometri winglet lain seperti panjang penampang atau sudut cant, serta menggunakan instrumen ukur daya dengan resolusi lebih tinggi dan jumlah ulangan data yang lebih banyak.

## DAFTAR PUSTAKA

- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. Wiley.
- 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. (2025). Analisis Pengaruh Penambahan Winglet Terhadap Performa Turbin Angin Darrieus. *Jurnal Teknik Mesin*, 24–32.
- International Renewable Energy Agency. (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. Abu Dhabi: IRENA.
- Laín, S., Osorio, C., & Lehmkuhl, O. (2018). Numerical Analysis of a Darrieus Vertical Axis Wind Turbine with Winglet. *Energies*, 11(2), 297.
- Lesmanah, U., & Sugiono. (2020). Pemanfaatan Angin di Gedung UNISMA Sebagai Energi Alternatif Penggerak Wind Turbine Tipe Savonius Pada Pengembangan Media Pembelajaran. *Jurnal Tecnoscienza*.
- Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Kawabata, T., & Shimizu, K. (2021). Effect of Blade Geometry on the Performance of Vertical Axis Wind Turbines. *Energy*, 223, 120060.
- Malla, S., Bhattarai, N., & Shrestha, S. (2020). Effect of Winglet on the Performance of Vertical Axis Wind Turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 505(1), 012041.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley.
- Marpaung, F. F., Siregar, H., & Nasution, M. (2017). Statistical Analysis Using ANOVA for Experimental Data Interpretation. *Journal of Physics: Conference Series*, 812(1), 012034.
- Mertens, S. (2006). *Wind Energy in the Built Environment: Concentrator Effects of Buildings*. Delft University of Technology.
- Muritala, A. S., & Adio, S. A. (2025). Design and Experimental Analysis of the Effect of Winglets on the Performance of a Hybrid Vertical Axis Wind Turbine. *University of Abuja Journal of Engineering and Technology (UJET)*.
- 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.
- 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.
- Zhu, W., Shen, W. Z., & Sørensen, J. N. (2019). Aerodynamic Design and Optimization of Wind Turbine Blades: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109981.