

## Aerodynamic optimization of a Darrieus-Savonius wind turbine with guide vane for power generation in the coastal area of Pacitan Regency

Yoga Arob Wicaksono<sup>1\*</sup>, Ahmad Arbi Trihatmojo<sup>2</sup>, Musyaddad Nurwahyono<sup>3</sup>,  
Muhammad Halim<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Prodi Pemeliharaan Kendaraan Ringan, Akademi Komunitas Negeri Pacitan  
Jl. Walanda Maramis No. 4A, Pacitan, Jawa Timur, Indonesia

\*Corresponding author: [yoga.arob@aknpacitan.ac.id](mailto:yoga.arob@aknpacitan.ac.id)

### Abstract

*The Darrieus–Savonius wind turbine has significant potential for application in the coastal area of Pacitan Regency, Indonesia, as it combines the high efficiency of the Darrieus rotor with the superior self-starting capability of the Savonius rotor. Although the use of guide vanes has been widely investigated in vertical-axis wind turbines, studies examining the influence of the number of guide vanes on the flow characteristics and aerodynamic performance of Darrieus–Savonius wind turbines remain limited. This study investigates the effects of three guide vane configurations (3, 4, and 5 vanes) using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations performed in OpenFOAM. The simulations were conducted at a free-stream wind speed of 10 m/s and a rotor angular velocity of 5 rad/s. Turbine performance was evaluated in terms of the torque coefficient ( $C_T$ ) and power coefficient ( $C_P$ ), while the flow characteristics were analyzed through velocity and pressure distributions around the rotor. The results indicate that the 4-guide-vane configuration achieved the best performance, yielding a  $C_T$  of 0.35 and a  $C_P$  of 0.175, which were higher than those obtained with the 3-guide-vane configuration ( $C_T = 0.33$ ,  $C_P = 0.165$ ) and the 5-guide-vane configuration ( $C_T = 0.29$ ,  $C_P = 0.145$ ). This configuration effectively directed the incoming airflow toward the rotor, resulting in a greater pressure difference across the blades. In contrast, the 5-guide-vane configuration induced blockage and increased turbulence, leading to a reduction in turbine performance. These findings demonstrate that the 4-guide-vane configuration is the most effective design for enhancing the aerodynamic performance of Darrieus–Savonius wind turbines.*

**Keywords:** Small-scale wind turbine; Darrieus–Savonius; Guide vanes; Computational Fluid Dynamics (CFD); Power and torque coefficients.

### Abstrak

Turbin angin Darrieus-Savonius berpotensi diaplikasikan di daerah dekat pantai Kabupaten Pacitan, karena menggabungkan efisiensi turbin Darrieus dan kemampuan *self-starting* turbin Savonius. Meskipun penggunaan *guide vane* telah banyak diteliti pada turbin angin sumbu vertikal, kajian mengenai pengaruh variasi jumlah *guide vane* terhadap karakteristik aliran dan performa turbin Darrieus-Savonius masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi jumlah *guide vane* sebanyak 3, 4, dan 5 buah menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis OpenFOAM. Simulasi dilakukan pada kecepatan angin 10 m/s dan kecepatan sudut rotor 5 rad/s. Performa turbin dievaluasi berdasarkan koefisien torsi ( $C_T$ ) dan koefisien daya ( $C_P$ ), sedangkan karakteristik aliran dianalisis melalui distribusi kecepatan dan tekanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi 4 *guide vane* menghasilkan performa terbaik dengan  $C_T$  sebesar 0,35 dan  $C_P$  sebesar 0,175, lebih tinggi dibandingkan konfigurasi 3 *guide vane* ( $C_T = 0,33$ ;  $C_P = 0,165$ ) dan 5 *guide vane* ( $C_T = 0,29$ ;  $C_P = 0,145$ ). Konfigurasi ini mampu mengarahkan aliran secara lebih efektif menuju rotor sehingga meningkatkan perbedaan tekanan pada bilah. Sebaliknya, konfigurasi 5 *guide vane* menimbulkan efek *blockage* dan turbulensi yang menurunkan performa turbin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi 4 *guide vane* merupakan konfigurasi terbaik untuk meningkatkan performa aerodinamika turbin angin Darrieus-Savonius.

**Kata kunci:** Turbin angin skala kecil, Darrieus–Savonius, *guide vane*, *Computational Fluid Dynamics* (CFD), Koefisien daya dan torsi

## 1. Pendahuluan

Pemerintah Indonesia menargetkan bauran energi terbarukan mencapai 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Namun, pada tahun 2020 sekitar 94,9% produksi energi masih berasal dari bahan bakar fosil, sedangkan sektor transportasi menjadi konsumen energi terbesar (45,76%), menunjukkan masih tingginya ketergantungan terhadap energi fosil [1]. Salah satu upaya untuk mendorong dekarbonisasi dalam sistem energi adalah penerapan turbin angin [2]. Energi angin merupakan sumber energi terbarukan yang melimpah, ramah lingkungan, dan beremisi rendah. Indonesia memiliki potensi energi angin sekitar 154,9 GW, namun kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga angin pada tahun 2021 baru mencapai 157,41 MW, masih jauh di bawah target 255 MW pada tahun 2025 [3].

Kabupaten Pacitan memiliki garis pantai sepanjang 116,2 kilometer [4]. Dengan kondisi geografis tersebut, wilayah pesisir Pacitan berpotensi menjadi lokasi pemasangan turbin angin skala kecil. Turbin angin skala kecil memiliki beberapa keunggulan dibandingkan turbin skala besar, antara lain efisiensi penggunaan lahan, kemandirian terhadap jaringan listrik, dan biaya yang relatif rendah [5].

Turbin angin secara umum dibedakan menjadi dua jenis, yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal [6]. Beberapa jenis turbin angin sumbu vertikal yang umum digunakan antara lain turbin Darrieus dan turbin Savonius. Turbin Darrieus memiliki koefisien daya ( $C_p$ ) yang lebih tinggi sehingga lebih sesuai untuk pembangkitan listrik [7]. Karakter turbin Savonius antara lain memiliki torsi yang tinggi, mampu beroperasi pada kecepatan rendah, dan efisiensi yang rendah. Sebaliknya, turbin Darrieus memiliki karakteristik kecepatan tinggi dan efisiensi yang lebih tinggi [8]. Namun, turbin Darrieus memiliki kelemahan yaitu kurang banyak diaplikasikan karena kemampuan *self-*

*starting* yang rendah dan performa rendah saat kecepatan angin rendah [9]. Sementara itu, turbin Savonius memiliki keunggulan mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah [10]. Kedua jenis rotor turbin tersebut bisa dikombinasikan untuk mengatasi masing-masing kekurangannya. Penelitian sebelumnya membuktikan bahwa turbin Darrieus-Savonius meningkatkan performa 6,5% lebih baik dibanding turbin Darrieus tunggal [11]. Penelitian lain menyatakan bahwa turbin angin Darrieus-Savonius menghasilkan torsi lebih baik pada TSR rendah, namun menurun saat TSR tinggi [12].

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa konfigurasi turbin Darrieus-Savonius mampu meningkatkan performa pada kondisi tertentu. Namun, masih ada peluang untuk meningkatkan efisiensi melalui optimasi kondisi aliran yang memasuki rotor. Salah satu strategi potensial untuk meningkatkan efisiensi turbin adalah penggunaan perangkat *guide vane*. Perangkat ini berfungsi meningkatkan laju aliran massa angin dengan mengarahkan aliran dari area yang lebih luas ke area yang lebih sempit. Melalui efek venturi, kecepatan angin meningkat sebelum mengenai bilah rotor, sehingga menghasilkan torsi positif yang lebih besar pada turbin angin sumbu vertikal [13]. Selain itu, penggunaan *guide vane* dapat mempermudah proses *self-starting* turbin serta meningkatkan efisiensinya [14].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan performa turbin angin sumbu vertikal dengan menggunakan *guide vane*. Nimvari et al., meneliti peningkatan performa turbin Savonius dengan deflektor berpori melalui simulasi numerik menggunakan CFD ANSYS Fluent, dan hasilnya menunjukkan peningkatan performa turbin [15]. Selanjutnya, penelitian oleh Aboujaoude et al. menggunakan analisis CFD untuk mengkaji pengaruh deflektor pada turbin Savonius dan terbukti mampu

meningkatkan torsi awal hingga 30% [16]. Penelitian oleh Tian et al. menambahkan bahwa penggunaan deflektor pasif di bagian hulu mampu meningkatkan efisiensi turbin Savonius sebesar 24,91% [17]. Sementara itu, Zidane et al. meneliti penggunaan deflektor pada turbin Darrieus melalui analisis CFD dan menunjukkan adanya peningkatan efisiensi [18]. Selanjutnya, Ansaf et al. mengembangkan desain turbin Darrieus tipe-H dengan guide wall menggunakan kombinasi metode *Design of Experiment* (DoE) dan CFD, yang menghasilkan peningkatan performa hingga 177% [19]. Abdolahifar dan Zanj menyatakan bahwa teknik peningkatan aliran mampu memperbaiki performa aerodinamika turbin Darrieus, namun dengan konsekuensi peningkatan biaya akibat pembangunan struktur tambahan di sekitar turbin [20].

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, penggunaan *guide vane* terbukti mampu meningkatkan performa turbin angin sumbu vertikal. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada turbin Savonius atau Darrieus secara terpisah serta mengevaluasi keberadaan *guide vane* tanpa mengkaji pengaruh variasi jumlah *guide vane* terhadap turbin gabungan Darrieus-Savonius. Selain itu, belum banyak penelitian yang membandingkan konfigurasi jumlah *guide vane* untuk menentukan konfigurasi yang paling efektif dalam mengarahkan aliran udara dan meningkatkan efisiensi turbin. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis pengaruh variasi jumlah *guide vane* sebanyak 3, 4, dan 5 buah terhadap karakteristik aliran udara dan performa turbin angin gabungan Darrieus-Savonius menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

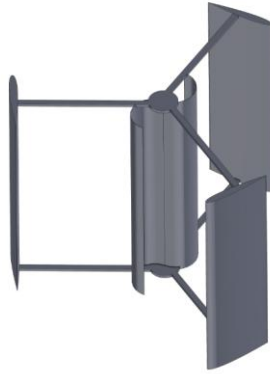
Rumusan masalah dalam penelitian difokuskan pada pengaruh variasi jumlah *guide vane*, yaitu 3, 4, dan 5 terhadap performa (koefisien daya dan torsi) dan karakteristik aliran udara di sekitar turbin. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan mengenai bagaimana perbedaan jumlah *guide vane* mempengaruhi distribusi

kecepatan aliran udara yang memasuki daerah sapuan turbin dan seberapa besar pengaruh variasi jumlah *guide vane* terhadap performa turbin yang ditunjukkan oleh koefisien torsi ( $C_T$ ) dan koefisien daya ( $C_P$ ) yang diperoleh dari masing-masing konfigurasi. Untuk menjawab rumusan masalah tersebut, dilakukan pendekatan simulasi numerik menggunakan metode CFD. Tahapan penelitian diawali dengan perancangan model turbin angin Darrieus-Savonius yang dilengkapi variasi *guide vane* sebanyak 3, 4, dan 5 buah, kemudian dilakukan simulasi numerik untuk menganalisis distribusi aliran udara dan membandingkan performa setiap konfigurasi.

## 2. Metode Penelitian

Turbin angin ini dirancang untuk digunakan sebagai pembangkit listrik di daerah dekat pantai dengan ketinggian 10 meter diatas permukaan tanah. Berdasarkan hasil pengukuran langsung menggunakan alat ukur anemometer di lokasi Pantai Pancer Door Kabupaten Pacitan, kecepatan angin mencapai 7,6 m/s. Oleh karena itu, kecepatan angin pada simulasi disesuaikan dengan lokasi dan ketinggian turbin. Berdasarkan persamaan Hellman [21] estimasi kecepatan angin pada ketinggian 10 meter diatas tanah adalah 10 m/s.

Geometri turbin angin Darrieus-Savonius, *guide vane*, dan domain komputasi model numerik dibuat menggunakan perangkat lunak FreeCAD. Desain turbin angin menggunakan rotor Savonius dipasang di bagian tengah poros, sedangkan bagian luarnya menggunakan turbin Darrieus tipe H. Jumlah bilah turbin Savonius adalah 2 bilah, dengan diameter 300 mm dan tinggi 750 mm. Sementara turbin Darrieus dirancang dengan profil NACA 0012, jumlah bilah adalah 3, dengan diameter 1000 mm dan tinggi 750 mm. Gambar di bawah menunjukkan model turbin angin Darrieus-Savonius yang telah dibuat.



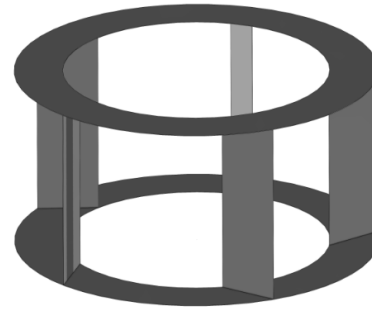
Gambar 1. Model 3 dimensi turbin angin Darrieus-Savonius

Untuk mengurangi waktu komputasi dan menganalisis pengaruh *guide vane* pada performa turbin, lengan penghubung tidak diperhitungkan dalam simulasi. Berikut ini adalah tabel geometri turbin angin gabungan yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Geometri turbin angin Darrieus-Savonius

| <b>Savonius</b>           |               |
|---------------------------|---------------|
| Jumlah bilah              | 2             |
| Bentuk bilah              | Semi-silinder |
| <i>Overlap ratio</i>      | 0 mm          |
| <i>Aspect ratio</i> (H/D) | 2,5           |
| Diameter rotor (D)        | 300 mm        |
| Tinggi (H)                | 750 mm        |
| <i>Overlap ratio</i>      | 0 mm          |
| <i>End plate</i>          | Tidak ada     |
| <b>Darrieus</b>           |               |
| Airfoil                   | NACA 0012     |
| Jumlah bilah              | 3             |
| Diameter (D)              | 1000 mm       |
| Radius rotor (R)          | 500 mm        |
| Tinggi (H)                | 750 mm        |
| <i>Aspect ratio</i> (H/D) | 0,75          |
| Sudut serang              | 5°            |
| <i>Solidity</i>           | 0,45          |

*Guide vane* dipasang pada bagian terluar turbin dengan diameter dalam 1100 mm dan diameter luar 1500 mm. Tinggi *guide vane* adalah 1000 mm. Berikut ini adalah desain *guide vane* yang dipasang di sekitar turbin angin Darrieus-Savonius.



Gambar 2. Desain *guide vane*

Kondisi batas dibuat persegi panjang dengan dimensi panjang 10.000 mm dan lebar 5.000 mm. Model turbin angin dan *guide vane* ditempatkan di pusat simetri dengan jarak 3.000 mm dari saluran masuk. Untuk mempelajari pengaruh *guide vane* pada turbin angin Darrieus-Savonius, dilakukan variasi jumlah bilah *guide vane*, termasuk: 3, 4, dan 5.

Studi pengaruh desain *guide vane* pada turbin angin Darrieus-Savonius dilakukan menggunakan metode CFD. Berdasarkan karakteristik aliran, diasumsikan *incompressible* dan turbulen. Untuk menyelesaikan perhitungan meshing, digunakan *Finite Volume Method* (FVM) berbasis perangkat lunak OpenFOAM.

Performa turbin angin dievaluasi berdasarkan parameter aerodinamika yang meliputi *Tip Speed Ratio* (TSR), koefisien torsi ( $C_T$ ), dan koefisien daya ( $C_P$ ). *Tip Speed Ratio* (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan ujung rotor dan kecepatan angin [22]:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (1)$$

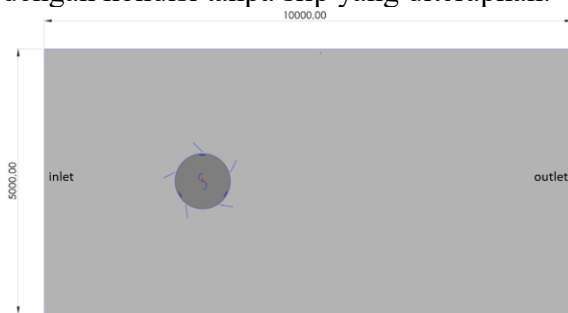
di mana  $\lambda$  adalah TSR,  $\Omega$  adalah kecepatan sudut turbin (rad/s),  $R$  adalah jari-jari rotor (m),  $V$  adalah kecepatan angin bebas (m/s). Koefisien daya ( $C_P$ ) adalah rasio antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin terhadap daya yang tersedia pada aliran angin.

$$C_P = \frac{T_T \Omega}{\frac{1}{2} \rho A_T V^3} \quad (2)$$

$$C_T = \frac{T_T}{\frac{1}{2} \rho A_T V^2 R} \quad (3)$$

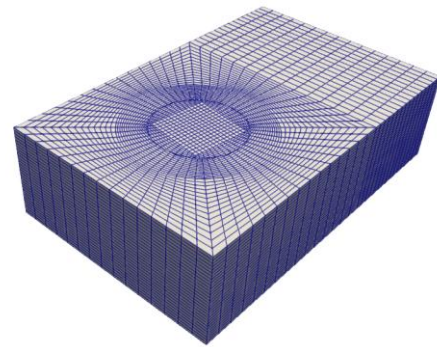
Sedangkan  $C_T$  adalah koefisien torsi,  $C_p$  adalah koefisien daya,  $T_T$  adalah torsi yang bekerja pada turbin (N.m),  $A_T$  adalah luas sapuan turbin ( $m^2$ ),  $\Omega$  adalah kecepatan sudut,  $R$  adalah jari-jari rotor, dan  $\rho$  adalah kerapatan udara ( $kg/m^3$ ).

Domain komputasi dibagi menjadi dua bagian: area stasioner dan area rotasi yang bergerak di mana turbin angin berada. Area rotasi berputar dengan kecepatan sudut yang sama dengan rotor. Dalam domain komputasi ini, kondisi batas didefinisikan sebagai *inlet* kecepatan dengan profil konstan, *outlet* tekanan, dan dua sisi sebagai batas simetri. Sementara itu, bilah dimodelkan sebagai dinding berputar dengan kondisi tanpa slip yang diterapkan.



Gambar 3. Domain Komputasi

Langkah selanjutnya adalah membuat mesh untuk mengubah domain fluida kontinu menjadi domain komputasi diskrit sehingga persamaan aliran dapat diselesaikan secara numerik menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi dilakukan pada kondisi *unsteady* dengan *time step* 0,0002 dan waktu simulasi total 5 detik. Tipe *mesh* yang digunakan pada bagian stasioner adalah *blockMesh* sedangkan pada bagian rotasi adalah *snappyHexMesh*. Koneksi antara mesh statis (*guide vane*) dan mesh rotasi (turbin). Turbin diputar dengan kecepatan sudut 5 rad/s.

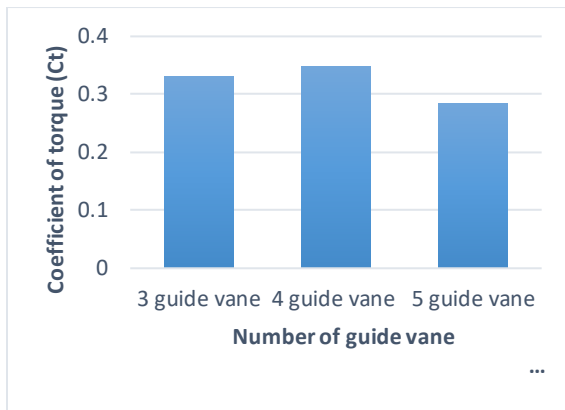


Gambar 4. Hasil *meshing* domain komputasi

Kondisi batas simulasi ditetapkan melalui file U, p, k, omega, dan nut pada OpenFOAM. Kecepatan aliran bebas sebesar 10 m/s diterapkan pada *inlet*, sedangkan permukaan stator dan rotor menggunakan kondisi *no-slip*. Tekanan diinisialisasi sebesar 0 Pa dengan kondisi *freestreamPressure* pada *inlet* dan *zeroGradient* pada dinding. Pemodelan turbulensi menggunakan nilai awal  $k = 0,00341 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,  $\omega = 0,1 \text{ s}^{-1}$ , dan  $\nu_t = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , dengan fungsi dinding *kqRWallFunction*, *omegaWallFunction*, dan *nutUSpaldingWallFunction*. Interaksi antara domain statis dan domain berputar dimodelkan menggunakan metode *cyclicAMI* untuk menjamin kontinuitas aliran pada antarmuka mesh.

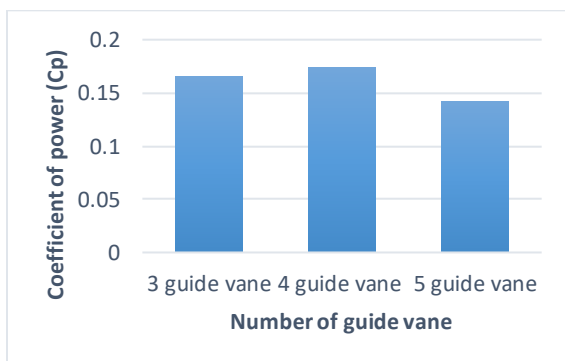
### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi CFD dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan *guide vane* terhadap karakteristik aerodinamika dan performa turbin angin Darrieus-Savonius. Pembahasan difokuskan pada perubahan distribusi kecepatan, tekanan, struktur aliran serta parameter performa turbin guna menjelaskan peningkatan efisiensi yang dihasilkan.



Gambar 5. Grafik koefisien torsi

Gambar 5 menunjukkan pengaruh jumlah *guide vane* terhadap koefisien torsi ( $C_T$ ) turbin angin Darrieus-Savonius. Berdasarkan hasil simulasi, nilai  $C_T$  mengalami perubahan seiring dengan variasi jumlah *guide vane*. Konfigurasi 4 *guide vane* menghasilkan koefisien torsi tertinggi, yaitu 0,35, diikuti oleh konfigurasi 3 *guide vane* dengan nilai 0,33, sedangkan konfigurasi 5 *guide vane* menghasilkan nilai  $C_T$  terendah.



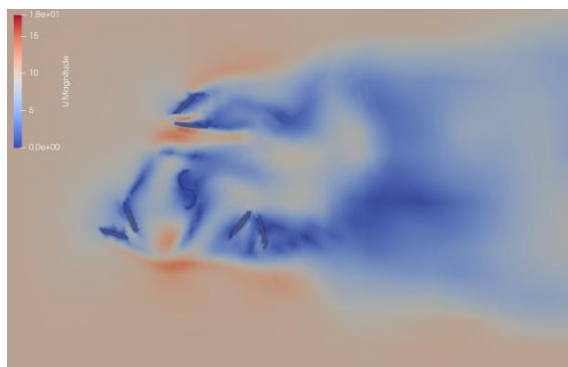
Gambar 6. Grafik koefisien daya

Gambar 6 menunjukkan pengaruh *guide vane* terhadap koefisien daya ( $C_P$ ) turbin angin Darrieus-Savonius. Berdasarkan hasil simulasi, nilai  $C_P$  mengalami variasi seiring dengan perubahan jumlah *guide vane*. Konfigurasi 4 *guide vane* menghasilkan koefisien daya tertinggi, yaitu 0,175, diikuti oleh konfigurasi 3 *guide vane* dengan nilai sekitar 0,165, sedangkan konfigurasi 5 *guide vane* menghasilkan nilai terendah, yaitu sekitar 0,145.

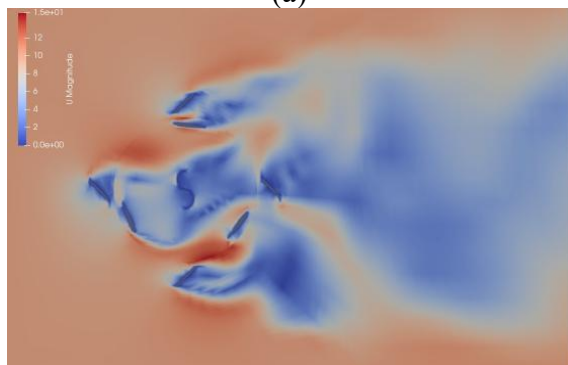
Tren perubahan koefisien daya pada gambar 6 konsisten dengan hasil koefisien torsi pada gambar 5, di mana konfigurasi 4 *guide vane* juga menghasilkan nilai  $C_T$  tertinggi. Kesesuaian tren tersebut menunjukkan bahwa peningkatan torsi yang dihasilkan rotor berkontribusi langsung terhadap peningkatan daya mekanik turbin. Berdasarkan persamaan  $P = T\omega$ , pada kecepatan sudut yang sama, peningkatan torsi akan meningkatkan daya keluaran sehingga nilai koefisien daya juga mengalami peningkatan. Sebaliknya, penurunan  $C_T$  pada konfigurasi 5 *guide vane* menyebabkan daya yang dihasilkan berkurang, sehingga nilai  $C_P$  turut menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah *guide vane* 4 mampu meningkatkan performa aerodinamis turbin Darrieus-Savonius. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, penambahan jumlah bilah pada *guide vane* mampu meningkatkan daya, karena komponen ini mencegah angin mengalir ke sisi bilah yang cembung dan justru mengarahkan aliran angin menuju sisi bilah yang cekung pada turbin [23]. Namun, jumlah *vane* yang terlalu banyak justru menimbulkan efek *blockage*, gesekan tambahan, dan turbulensi, yang menyebabkan fluktuasi torsi berlebihan bahkan menurunkan kestabilan operasi turbin.

Perbedaan nilai koefisien torsi dan koefisien daya tersebut berkaitan erat dengan karakteristik aerodinamika aliran di sekitar rotor. Oleh karena itu, analisis distribusi tekanan dan kontur kecepatan dilakukan untuk menjelaskan pengaruh jumlah *guide vane* terhadap pola aliran yang terbentuk.

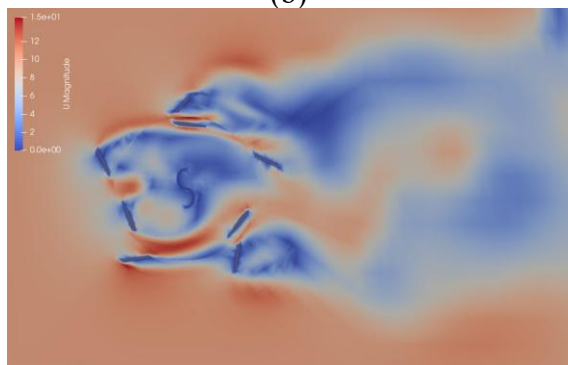




(a)



(b)

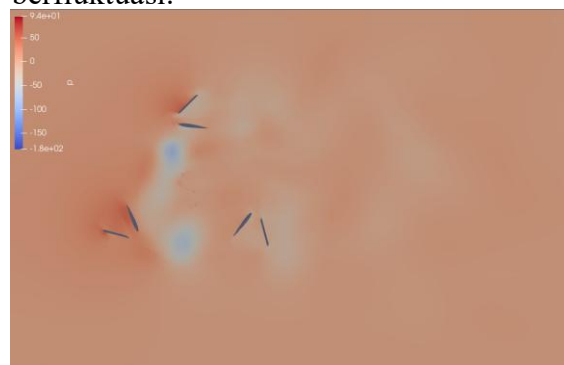


(c)

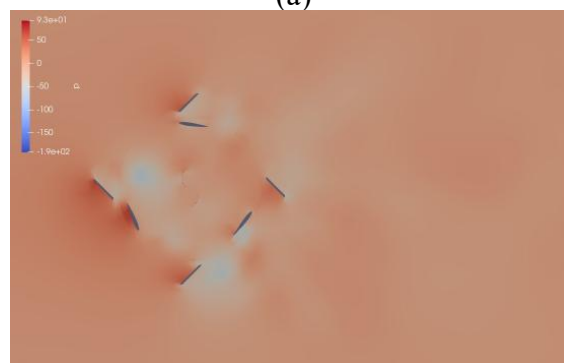
Gambar 6. Distribusi kecepatan di sekitar bilah dengan jumlah *guide vane* (a) 3, (b) 4, dan (c) 5

Hasil visualisasi aliran menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *guide vane* memengaruhi arah dan konsentrasi aliran udara menuju rotor turbin angin Darrieus–Savonius, di mana semakin banyak *guide vane*, semakin terfokus alirannya dan gradien kecepatan meningkat, sehingga menurut hukum kontinuitas dan teorema Bernoulli, hal itu menghasilkan perbedaan tekanan yang lebih besar antara sisi tekanan dan sisi hisap bilah; kondisi ini dibuktikan dengan distribusi tekanan yang semakin merata dengan penambahan *guide vane*, meskipun terlalu banyak *guide vane* juga

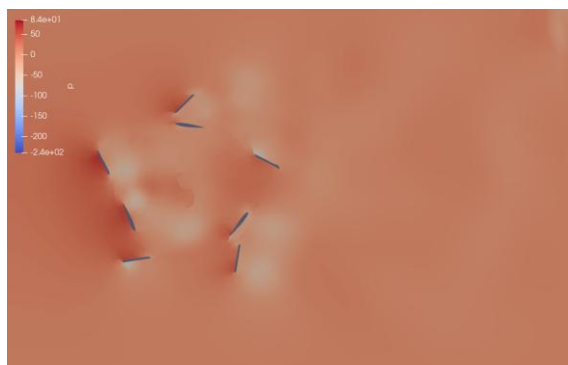
menyebabkan aliran turbulen dan turbulensi yang memperluas area tekanan rendah dan meningkatkan hambatan. Hal ini konsisten dengan data grafik torsi, di mana konfigurasi 3 bilah menghasilkan torsi yang relatif stabil tetapi rendah, konfigurasi 4 bilah meningkatkan torsi dengan distribusi yang lebih seimbang meskipun fluktuasi mulai meningkat, sedangkan konfigurasi 5 bilah memberikan torsi puncak tertinggi tetapi disertai dengan fluktuasi yang sangat besar dan bahkan torsi negatif muncul karena pemisahan aliran. Dengan demikian, hasil visualisasi dan grafik menunjukkan bahwa jumlah bilah pengarah yang optimal adalah pada konfigurasi 4 bilah karena mampu memberikan keseimbangan antara peningkatan torsi dan stabilitas operasi turbin dibandingkan dengan 3 bilah yang kurang optimal dan 5 bilah yang terlalu berfluktuasi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 7. Distribusi tekanan di sekitar turbin dengan konfigurasi *guide vane* (a) 3, (b) 4, dan (c) 5

Gambar 7 menunjukkan distribusi tekanan di sekitar turbin Savonius untuk konfigurasi *guide vane* (a) 3, (b) 4, dan (c) 5 buah. Pada seluruh konfigurasi terlihat terbentuknya daerah bertekanan tinggi di sisi sudu yang berhadapan langsung dengan arah datangnya aliran, sedangkan daerah bertekanan rendah muncul di sisi belakang sudu akibat proses percepatan aliran dan pembentukan *wake*. Perbedaan tekanan antara kedua sisi sudu inilah yang menghasilkan gaya drag sebagai sumber torsi pada turbin Savonius.

Pada konfigurasi 3 *guide vane* (gambar 7a), distribusi tekanan belum sepenuhnya terfokus pada sudu maju. Sebagian aliran masih melewati celah antar *guide vane* sehingga tekanan pada sisi cekung sudu relatif lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa kemampuan *guide vane* dalam mengarahkan aliran menuju sudu yang menghasilkan torsi masih belum optimal.

Berbeda dengan konfigurasi sebelumnya, 4 *guide vane* (Gambar 7b) menghasilkan distribusi tekanan yang lebih merata dan terlokalisasi pada sisi sudu yang menerima aliran. Daerah bertekanan tinggi tampak lebih luas di depan sudu, sedangkan tekanan rendah di sisi balik sudu tetap terjaga sehingga gradien tekanan menjadi lebih besar. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa aliran lebih efektif diarahkan menuju sudu penggerak sekaligus mengurangi aliran yang mengenai sudu

balik. Peningkatan beda tekanan ini sejalan dengan hasil pembahasan sebelumnya, di mana konfigurasi 4 *guide vane* menghasilkan nilai koefisien torsi ( $C_T$ ) dan koefisien daya ( $C_P$ ) tertinggi. Dengan demikian, peningkatan performa turbin tidak hanya disebabkan oleh bertambahnya jumlah *guide vane*, tetapi juga oleh distribusi tekanan yang lebih efektif dalam memaksimalkan gaya penggerak pada sudu.

Sementara itu, pada konfigurasi 5 *guide vane* (gambar 7c), distribusi tekanan mulai mengalami penyebaran dan intensitas daerah bertekanan tinggi di sekitar sudu cenderung menurun. Penambahan jumlah *guide vane* menyebabkan ruang antar vane menjadi lebih sempit sehingga sebagian aliran mengalami hambatan sebelum mencapai rotor. Akibatnya, kecepatan aliran yang masuk ke daerah kerja turbin berkurang dan beda tekanan yang terbentuk pada sudu tidak sebesar konfigurasi 4 *guide vane*. Fenomena ini menjelaskan mengapa peningkatan jumlah *guide vane* tidak selalu menghasilkan peningkatan performa, bahkan dapat meningkatkan rugi-rugi aerodinamika akibat penyempitan jalur aliran dan pembentukan turbulensi di sekitar vane.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dapat disimpulkan bahwa variasi jumlah *guide vane* memberikan pengaruh terhadap karakteristik aliran udara dan performa turbin angin Darrieus–Savonius. Pengaruh tersebut ditunjukkan melalui perubahan nilai koefisien torsi ( $C_T$ ), koefisien daya ( $C_P$ ), serta distribusi kecepatan dan tekanan di sekitar rotor. Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut.

1. Variasi jumlah *guide vane* memengaruhi performa turbin angin Darrieus–Savonius. Konfigurasi 4 *guide vane* menghasilkan performa terbaik dengan koefisien torsi ( $C_T$ ) sebesar 0,35 dan koefisien daya ( $C_P$ ) sebesar 0,175, lebih tinggi



- dibandingkan konfigurasi 3 *guide vane* ( $C_T = 0,33$ ;  $C_P = 0,165$ ) dan 5 *guide vane* ( $C_T = 0,29$ ;  $C_P = 0,145$ ).
2. Variasi jumlah *guide vane* memengaruhi karakteristik aliran di sekitar rotor. Konfigurasi 4 *guide vane* menghasilkan distribusi kecepatan dan tekanan yang paling efektif dalam mengarahkan aliran menuju daerah sapuan rotor, sedangkan konfigurasi 5 *guide vane* menyebabkan efek *blockage* dan peningkatan turbulensi yang menurunkan efektivitas aliran.
  3. Berdasarkan evaluasi parameter performa dan karakteristik aliran, konfigurasi 4 *guide vane* merupakan konfigurasi optimum untuk turbin angin Darrieus–Savonius pada kondisi simulasi dengan kecepatan angin 10 m/s dan kecepatan sudut rotor 5 rad/s, karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan performa aerodinamis dan kestabilan aliran.

### Ucapan terimakasih

Ucapan terimakasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, yang telah memberikan pendanaan penelitian ini lewat skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) tahun 2025.

### Referensi

- [1] N. A. Pambudi *et al.*, “Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development,” Feb. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/su15032342.
- [2] E. Ramalho *et al.*, “Understanding wind Energy Economic externalities impacts: A systematic literature review,” Mar. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2024.115120.
- [3] N. A. Pambudi *et al.*, “The Future of Wind Power Plants in Indonesia: Potential, Challenges, and Policies,” Feb. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su17031312.
- [4] A. R. Setiawan and F. Massitoh, “Analisis Perubahan Garis Pantai Menggunakan Citra Landsat 8 Pada Kawasan Pesisir Kabupaten Pacitan Tahun 2014 - 2024,” *Geomatika*, vol. 30, pp. 67–76, Nov. 2024.
- [5] K. Calautit and C. Johnstone, “State-of-the-art review of micro to small-scale wind energy harvesting technologies for building integration,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100457.
- [6] C. Bak, “Aerodynamic design of wind turbine rotors,” in *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, Elsevier Inc., 2013, pp. 59–108. doi: 10.1533/9780857097286.1.59.
- [7] R. Whittlesey, “Vertical Axis Wind Turbines: Farm and Turbine Design,” in *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Elsevier Inc., 2017, pp. 185–202. doi: 10.1016/B978-0-12-809451-8.00010-2.
- [8] H. J. Sutherland, D. E. Berg, and T. D. Ashwill, “A Retrospective of VAWT Technology,” California, Jan. 2012. [Online]. Available: <http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4->
- [9] P. M. Kumar, K. Sivalingam, T. C. Lim, S. Ramakrishna, and H. Wei, “Strategies for Enhancing the Low Wind Speed Performance of H-Darrieus Wind Turbine—Part 1,” Dec. 01, 2019, *MDPI*. doi: 10.3390/cleantechnol1010013.
- [10] A. Pallotta, D. Pietrogiaconi, and G. P. Romano, “HYBRI – A combined Savonius-Darrieus wind turbine: Performances and flow fields,” *Energy*, vol. 191, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116433.

- [11] R. G. da S. Inácio *et al.*, “Numerical Investigation of Hybrid Darrieus/Savonius Vertical Axis Wind Turbine Subjected to Turbulent Airflows,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 10, Oct. 2025, doi: 10.3390/jmse13101979.
- [12] M. Bakırcı, “Numerical investigation on torque performance of darrieus-savonius hybrid designs,” *International Journal of Energy Studies*, vol. 9, no. 4, pp. 637–678, Dec. 2024, doi: 10.58559/ijes.1564583.
- [13] A. Abdolahifar and A. Zanj, “A review of available solutions for enhancing aerodynamic performance in Darrieus vertical-axis wind turbines: A comparative discussion,” Mar. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.enconman.2025.119575.
- [14] K. H. Wong, W. T. Chong, N. L. Sukiman, S. C. Poh, Y. C. Shiah, and C. T. Wang, “Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review,” 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2017.01.160.
- [15] M. Eshagh Nimvari, H. Fatahian, and E. Fatahian, “Performance improvement of a Savonius vertical axis wind turbine using a porous deflector,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 220, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113062.
- [16] H. Aboujaoude, F. Beaumont, S. Murer, G. Polidori, and F. Bogard, “Aerodynamic performance enhancement of a Savonius wind 3 turbine using an axisymmetric deflector,” 2021. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- [17] W. Tian, J. Bian, G. Yang, X. Ni, and Z. Mao, “Influence of a passive upstream deflector on the performance of the Savonius wind turbine,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 7488–7499, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.244.
- [18] I. F. Zidane, H. M. Ali, G. Swadener, Y. A. Eldrainy, and A. I. Shehata, “Effect of upstream deflector utilization on H-Darrieus wind turbine performance: An optimization study,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 63, pp. 175–189, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.07.052.
- [19] R. Ansaf, H. S. Abdelhameed, I. Hashem, and Z. Harun, “Efficiency-based design optimization of the H-type Darrieus wind turbine with fixed guiding-walls,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 3576–3592, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.01.117.
- [20] A. Abdolahifar and A. Zanj, “A review of available solutions for enhancing aerodynamic performance in Darrieus vertical-axis wind turbines: A comparative discussion,” Mar. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.enconman.2025.119575.
- [21] I. Lázár, I. Hadnagy, B. Bertalan-Balázs, L. Bertalan, and S. Szegedi, “Comparative examinations of wind speed and energy extrapolation methods using remotely sensed data – A case study from Hungary,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 24, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100760.
- [22] S. Mathew, *Wind energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, 2007. doi: 10.1007/3-540-30906-3.
- [23] W. Yahya, K. Ziming, W. Juan, M. S. Qurashi, M. Al-Nehari, and E. Salim, “Influence of tilt angle and the number of guide vane blades towards the Savonius rotor performance,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 3317–3327, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.05.053.