

Performance enhancement of an H-Type Darrieus vertical axis wind turbine equipped with NACA profile flap

Mohamad Yamin^{a,1}, Cokorda Prapti Mahandari^b, Riyan Firmansyah^c

^{a,b,c}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Jakarta

¹mohay@staff.gunadarma.ac.id

ABSTRACT

This present study performs a numerical investigation to improve the performance of the H-Darrieus type Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), which consists of 3 main blades with flaps on each blade. This research evaluates performance and geometry optimization, especially the gap distance between the main blade and the flap. The Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical method is used to analyze the performance of the VAWT turbine and optimize the gap distance between the blade and flap. NACA profile 0018 is used on the main blade, while NACA profile 7715 on the flaps. The two-dimensional CFD model of the VAWT turbine was analyzed using the Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) approach with the $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST $k-\omega$) turbulence model. Simulations were carried out using ANSYS Fluent software with turbine models without and with flaps. The simulation results without a flap turbine are validated experimentally and numerically. Simulations with flaps are varied based on the parameter of the gap distance between the blade and the flap at various Tip Speed Ratio (TSR) values. The results show an optimum gap between the main blade and the flap where the power coefficient is maximum. Overall, adding flaps improves the aerodynamic performance of the VAWT turbine.

Keywords: *H-Darrieus VAWT, aerodynamic performance, CFD, ANSYS*

Received 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

PENDAHULUAN

Konsumsi energi dunia hingga saat ini masih bergantung bahan bakar fosil yang menjadi penyebab terbentuknya emisi karbon. Emisi sektor energi global meningkat 1,3% mencapai rekor tertinggi sepanjang masa pada tahun 2022; namun, intensitas karbon rata-rata dari pembangkitan listrik turun menjadi rekor terendah yaitu 436 gram CO₂ per kWh secara global [1]. Dalam dekade terakhir, menurut Dewan Energi Angin Global, energi angin mengalami perkembangan signifikan dengan terpasangnya turbin angin di lepas pantai, dimana pada akhir 2018 kapasitas daya angin terpasang mencapai 591 GW [2]. Disamping itu penggunaan turbin angin dalam penyediaan energi merupakan salah satu cara dalam menangani masalah emisi karbon.

Berdasarkan sumbu rotasinya, turbin angin dapat diklasifikasikan menjadi turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWT). Dalam penelitian ini, turbin angin VAWT tipe Darrieus dipilih karena tipe ini selain memiliki keunggulan sifat arah anginnya yang *omnidirectional*, juga memiliki kemampuan menahan turbulensi yang tinggi [3].

Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan VAWT [4]. Solusi numerik yang

umum dilakukan berdasarkan pemodelan *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes* (URANS) banyak digunakan karena waktu simulasinya yang cepat [5]–[7]. Pada model 2D akurasi dalam analisis aerodinamis VAWT masih terbatas [8]. Meskipun demikian, solusi numerik menggunakan metode CFD masih tetap diperlukan untuk mendeskripsikan dan mengkarakterisasi fenomena kompleks dan tidak stabil yang sulit dideteksi melalui eksperimental [9].

Dalam beberapa tahun akhir, simulasi CFD tipe Darrieus telah dilakukan dengan model 2D [10]–[12] dan model 3D [11], [13], [14]. Dalam analisis komputasi, model 2D disimulasikan dalam kondisi aliran tidak tunak dengan menggunakan berbagai model turbulensi meliputi: (a) model Spalart-Allmaras, (b) model $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST $k-\omega$) [3], [14]–[21], (c) Realizable $k-\epsilon$ [22]–[25], dan (d) Transition SST [17], [26]–[29]. Dari keempat model tersebut, model Transition SST memberikan hasil paling akurat sesuai dengan data eksperimen, meskipun waktu komputasinya tinggi. Model turbulensi yang lainnya, seperti $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) memiliki waktu komputasi yang cepat, juga berkinerja baik dalam penanganan lapisan batas di atas bilah [16], [30], [31] dimana banyak peneliti sebelumnya telah melakukan

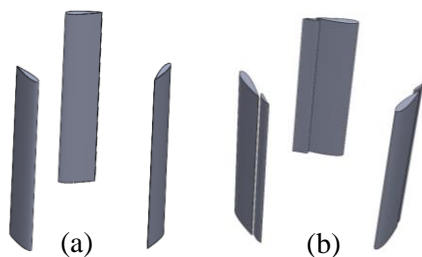
simulasi dan membandingkan hasilnya dengan data eksperimen [10], [32]–[34].

Dalam penelitian ini, simulasi 2D VAWT dilakukan dengan pendekatan URANS dimana pendekatan ini dipilih karena memiliki waktu simulasi yang cepat. Model turbulensi yang digunakan adalah SST $k-\omega$, selain akurat model ini telah banyak direkomendasikan oleh peneliti sebelumnya. Tujuan dari penelitian ini mengevaluasi kinerja VAWT dengan penambahan flap profil NACA 7715 pada bilah utama dan optimasi jarak gap antara bilah utama dengan flap.

METODE

1. Model Geometri

Pada penelitian ini, model geometri VAWT tipe H-Darrieus dibuat dengan menggunakan software Solidworks versi student 2020. Dua konfigurasi dengan tiga bilah profil yang dipasang pada poros berputar secara vertikal, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada konfigurasi pertama menggunakan profil NACA 0018 (Gambar 1.a) [15] dan konfigurasi kedua dengan modifikasi penambahan flap NACA 7715 (Gambar 1.b) [14].



Gambar 1. Skema model geometri turbin angin tipe H-Darrieus. (a) konfigurasi NACA 0018 tanpa flap, (b) konfigurasi NACA 0018 dengan flap.

Profil NACA 0018 dipilih karena banyaknya data eksperimen dan simulasi untuk VAWT [35]–[37]. Parameter desain dan dimensi model geometris yang diterapkan dalam penelitian ini sesuai dengan dimensi turbin angin H-Darrieus yang diuji secara eksperimental oleh Elkhoury, dkk. [38]. Parameter desain turbin angin tipe H-Darrieus diperlihatkan pada Tabel 1.

2. Domain komputasi

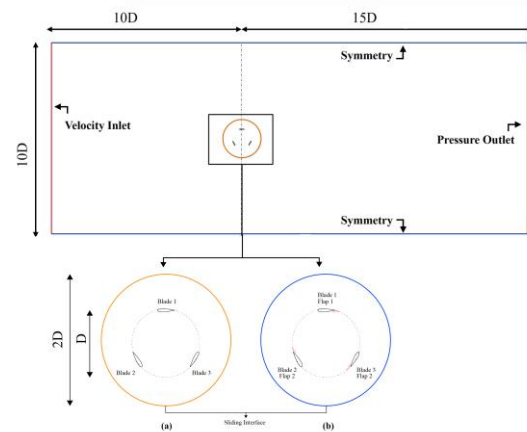
Gambar 2. Memperlihatkan domain komputasi yang digunakan dalam simulasi. Terdapat dua domain yang menjadi pertimbangan: pertama domain tetap sebagai volume kontrol dan domain berputar sebagai rotor. Dalam penelitian ini, ukuran domain tetap $10D \times 25D$ dan domain

berputar 2D. Pusat rotor terletak di $10D$ dari batas *inlet* dan di $15D$ dari batas *outlet*.

Kondisi batas pada *inlet* dengan kecepatan *inlet*, sedangkan pada *outlet* dengan tekanan *outlet*. Dinding simetri dengan kondisi *no-slip*.

Tabel 1. Parameter desain turbin angin H-Darrieus

Parameter	Symbol	Value
Rotor Diameter [m]	D	0.8
Blade Airfoil	-	NACA 0018
Blade Flap	-	NACA 7715
Blade Shape	-	Straight
Chord Length [m]	c	0.2
Rotor Height	H	1 m
Blades Number	N	3



Gambar 2. Deskripsi domain komputasi dan kondisi batas yang digunakan untuk perhitungan. (a) Konfigurasi tanpa flap, (b) Konfigurasi dengan flap



Gambar 3. Skema model geometri dengan flap

Simulasi dilakukan pada berbagai jarak gap yang berbeda yaitu, $\Delta=15$ mm, $\Delta=20$ mm, dan $\Delta=25$ mm.

3. Set-Up

Simulasi numerik ini menggunakan software ANSYS Fluent versi 2023 R1 (*Academic Licence*) dengan metode CFD untuk menyelesaikan simulasi URANS. Persamaan kontinuitas dan momentum diberikan pada persamaan (1) dan (2) berikut [5], [6], [39].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) \quad (2)$$

dengan, \bar{u}_i dan \bar{u}_j adalah nilai rata-rata kecepatan dan dalam sistem koordinat aksial, \bar{u}_i' dan \bar{u}_j' merupakan komponen fluktuasi, \bar{p} adalah tekanan rata-rata, v adalah viskositas kinematik, ρ adalah densitas fluida dan t adalah waktu. $\bar{u}_i' \bar{u}_j'$, mewakili tensor tegangan Reynolds, yang bergantung pada model turbulensi yang dipilih [40].

Untuk perhitungan URANS, penyelesaian menggunakan *pressure-based solver* sementara *pressure-velocity coupling* diselesaikan dengan *coupled algorithm* [11], [41]–[44]. Skema *upwind* orde dua digunakan untuk dikritisasi spasial tekanan, model turbulensi, dan persamaan momentum. Pengaturan utama yang diterapkan untuk semua simulasi tercantum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Detail pengaturan numerik

Parameter	Symbol	Value
Viscous Model	SST $\kappa\omega$	$\kappa\omega$ SST
Air Density	ρ	1.225 kg/m ³
Air Viscosity	μ	1.79 x 10 ⁻⁵ Pa s
Air Velocity	U_∞	8 m/s
Turbulent Intensity		5%
Tip Speed Ratio	λ	0.4 – 0.8
Solver Type		Pressure-Based
Calculation algorithm		Coupled
Spatial Discretization		2nd
Time Discretization		1° of rotation per time step
Residuals		1 x 10 ⁻⁴

Model turbulensi yang digunakan yaitu $k - \omega$ shear-stress transport (SST). Model ini dipilih karena efektif untuk simulasi CFD pada VAWT [11], [13]–[15], [18].

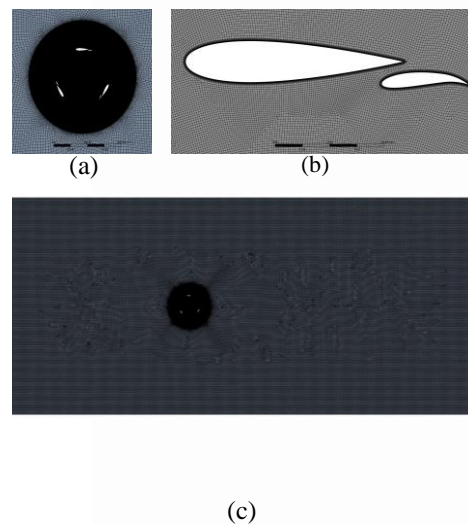
4. Meshing

Proses meshing dalam penelitian ini dilakukan dengan dua domain yaitu domain berputar dan domain tetap. Kedua domain menggunakan metode *Quadrilateral Dominant* (*quadrilateral* dan *triangular*). Dimana domain berputar dan tetap diatur dengan *face sizing*, dan domain antara tetap dan berputar menggunakan *edge sizing*. Terakhir, permukaan bilah diberi ukuran grid dengan menambah jumlah elemen di sekelilingnya dan dengan membuat lapisan inflasi pada setiap bilah [11].

Tabel 4. Detail pengaturan mesh

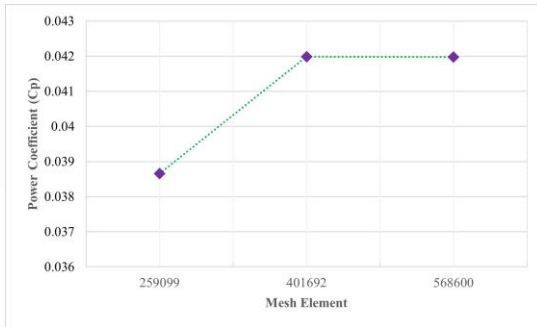
Mesh set	Domain	Element Size
Face Sizing	Fixed	40 (mm)
	Rotor	2 (mm)
Edge Sizing	Number of Divisions	600
	Elements Number	417186 Rotor 151416 Total 568602
Skewness max.	(0.98346)	(0.65717)

Detail pengaturan mesh diberikan pada Tabel 4. Sedangkan hasil proses meshing diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Detail Mesh: (a) Mesh di Domain Berputar, (b) Mesh di sekitar Blade 1, (c) Mesh Domain Komputasi.

Untuk menentukan ukuran mesh yang akurat dilakukan dengan *mesh independence study*. Gambar 5 menunjukkan analisis grid dimana jumlah elemen mesh dan hasil koefisien daya VAWT untuk kecepatan 8 m/s pada kondisi TSR 0.5.



Gambar 5. *mesh independence study* pada kecepatan 8 m/s dan TSR 0.5.

Dari Gambar 5 untuk nilai koefisien daya yang tidak berubah jumlah meshnya minimum 4.01×10^5 .

5. Analisis Parameter

Pada bilah profil NACA, parameter yang dianalisis adalah C_L dan C_D yang menunjukkan prestasi aerodinamika VAWT. Persamaan C_L dan C_D diberikan sebagai berikut.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S}; C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S} \quad (3)$$

Tip speed ratio (TSR) yaitu rasio antara kecepatan tangensial dan kecepatan aliran udara bebas, U_∞ . diberikan melalui persamaan (5).

$$TSR = \lambda = \frac{R\omega}{U_\infty} \quad (4)$$

Sedangkan persamaan (5) menunjukkan koefisien daya (C_p) yaitu rasio daya turbin (P_T) terhadap daya angin (P_W).

$$C_p = \frac{P_T}{P_W} = \frac{M\omega}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} \quad (5)$$

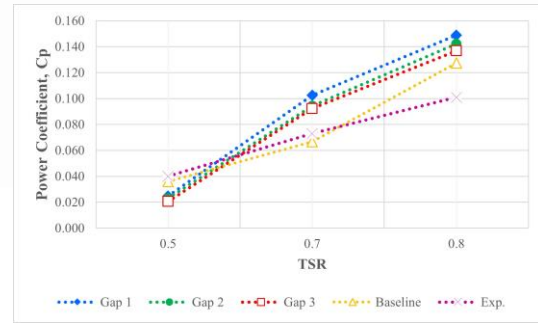
Dimana A adalah luas referensi yang diberikan pada persamaan berikut.

$$A = H \times D \quad (6)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Validasi Model

Validasi simulasi CFD model konfigurasi 1 (VAWT tanpa flap) dilakukan dengan membandingkan koefisien daya hasil eksperimen [38], dan hasil simulasi peneliti lain [15], [31].

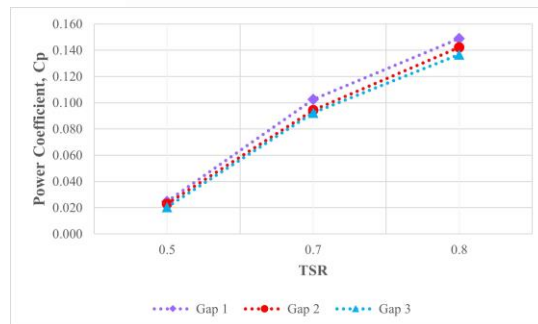


Gambar 6. Perubahan koefisien daya terhadap nilai TSR untuk kecepatan 8 m/s.

Gambar 6 menunjukkan hasil yang diperoleh dari simulasi ini, bahwa relatif error yang paling minimum dibandingkan dengan hasil eksperimen dan simulasi CFD peneliti lain 0.26% pada TSR 0.8.

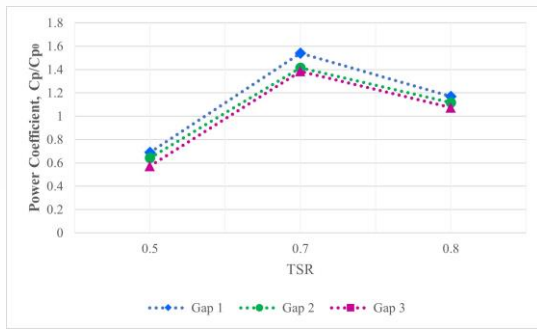
2. Koefisien Daya

Koefisien daya pada persamaan (5) dihitung menggunakan torsi yang diperoleh melalui simulasi CFD pada berbagai jarak gap antara bilah utama dengan flap. Seluruh perhitungan dilakukan dengan minimal tiga kali putaran rotor untuk semua simulasi, agar menjamin konsistensi dalam perhitungan.



Gambar 7. Koefisien daya terhadap nilai TSR untuk kecepatan 8 m/s.

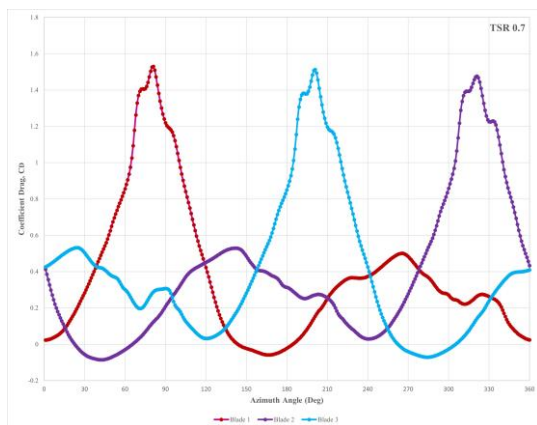
Dari Gambar 7 terlihat semakin tinggi nilai TSR maka koefisien dayanya semakin meningkat untuk setiap konfigurasi gap. Untuk menentukan konfigurasi gap yang optimum dimana nilai rasio koefisien daya memiliki nilai maksimum. Gambar 8 menunjukkan perbandingan koefisien daya dengan dan tanpa flap untuk berbagai konfigurasi gap dan TSR. Terlihat dalam Gambar 8 tersebut nilai koefisien daya yang maksimum pada konfigurasi dengan jarak gap 15 mm (gap 1).



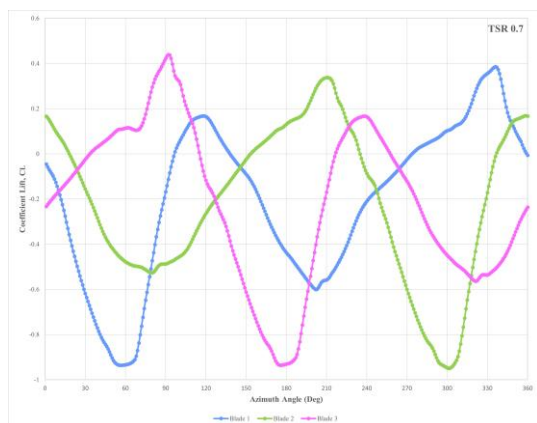
Gambar 8. Perbandingan koefisien daya dengan flap dan tanpa flap (C_p/C_{p0}) untuk berbagai nilai TSR.

3. Koefisien Lift dan Koefisien Drag

Untuk turbin tipe H-Darriues gaya aerodinamik yang dihasilkan pada profil penampang bilah dipengaruhi secara signifikan oleh sudut azimuth (θ) [9] dan sudut serang α dari angin [45].



(a)



(b)

Gambar 9. Koefisien drag dan lift bilah 1,2, dan 3 pada berbagai sudut azimuth untuk nilai TSR 0.7. (a) Koefisien drag, C_D , (b) Koefisien lift, C_L .

Gambar 9 menunjukkan maksimum dan minimum nilai koefisien drag (a) dan koefisien lift (b) untuk ketiga bilah pada berbagai sudut azimuth dengan TSR 0.7. Terlihat bahwa untuk koefisien drag, nilai maksimum 1.529, 1.512,

dan 1.477 pada masing-masing bilah untuk sudut $\theta = 81^\circ, 321^\circ, 201^\circ$. Untuk koefisien lift nilai maksimum dicapai 0.382, 0.337, dan 0.436 pada masing-masing bilah untuk sudut $\theta = 337^\circ, 211^\circ$, dan 93° .

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, simulasi menggunakan software ANSYS Fluent versi 2023 R1 (*Academic Licence*) dengan pendekatan *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes* (URANS) dilakukan untuk mengevaluasi kinerja turbin angin tipe H-Darrieus berdasarkan konfigurasi dengan dan tanpa flap pada kecepatan 8 m/s dalam berbagai TSR. Penelitian ini divalidasi dengan membandingkan dari hasil simulasi 2D [15], 3D [14], dan data eksperimen [38]. Dari simulasi 2D ini, menunjukkan beberapa hal sebagai berikut. Secara keseluruhan nilai koefisien daya secara keseluruhan pada konfigurasi dengan flap mengalami peningkatan dibandingkan dengan konfigurasi tanpa flap, sedangkan kondisi optimum nilai koefisien daya terjadi pada konfigurasi dengan flap pada jarak 15 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "REN21 - Building the sustainable energy future with renewable energy," *REN21*, Jul. 19, 2023. <https://www.ren21.net/> (accessed Aug. 24, 2023).
- [2] "GWEC - Global Wind Energy Council." <https://gwec.net/> (accessed Aug. 24, 2023).
- [3] J. Michna and K. Rogowski, "Numerical Study of the Effect of the Reynolds Number and the Turbulence Intensity on the Performance of the NACA 0018 Airfoil at the Low Reynolds Number Regime," *Processes*, vol. 10, no. 5, Art. no. 5, May 2022, doi: 10.3390/pr10051004.
- [4] Y. Li, S. Yang, F. Feng, and K. Tagawa, "A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines," *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 4360–4379, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.03.082.
- [5] "Energies | Free Full-Text | Two-Dimensional URANS Numerical Investigation of Critical Parameters on a Pitch Oscillating VAWT Airfoil under Dynamic Stall." <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/15/5625> (accessed Aug. 25, 2023).
- [6] A. Sheidani, S. Salavatidezfouli, G. Stabile, and G. Rozza, "Assessment of URANS and LES methods in predicting wake shed

- behind a vertical axis wind turbine,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 232, p. 105285, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jweia.2022.105285.
- [7] A. Rezaeiha, H. Montazeri, and B. Blocken, “On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines,” *Energy*, vol. 180, pp. 838–857, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.053.
- [8] J. Durkacz *et al.*, “CFD modelling and prototype testing of a Vertical Axis Wind Turbines in planetary cluster formation,” *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 119–126, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.019.
- [9] M. T. Nguyen, F. Balduzzi, A. Bianchini, G. Ferrara, and A. Goude, “Evaluation of the unsteady aerodynamic forces acting on a vertical-axis turbine by means of numerical simulations and open site experiments,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 198, p. 104093, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104093.
- [10] M. Javaid *et al.*, “Power enhancement of vertical axis wind turbine using optimum trapped vortex cavity,” *Energy*, vol. 278, p. 127808, May 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127808.
- [11] S. ed-Dîn Fertahi, A. Samaouali, and I. Kadiri, “CFD comparison of 2D and 3D aerodynamics in H-Darrieus prototype wake,” *E-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 4, p. 100178, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100178.
- [12] H. F. M. Yusri *et al.*, “2D Numerical Simulation of H-type Darrieus Vertical-Axis Wind Turbine (VAWT),” *J. Des. Sustain. Environ.*, vol. 5, no. 1, Art. no. 1, Apr. 2023.
- [13] “Energies | Free Full-Text | Investigation into the Aerodynamic Performance of a Vertical Axis Wind Turbine with Endplate Design.” <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/6925> (accessed Aug. 24, 2023).
- [14] “Energies | Free Full-Text | 3D CFD Modeling of Performance of a Vertical Axis Turbine.” <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1144> (accessed Aug. 24, 2023).
- [15] “Processes | Free Full-Text | CFD Modeling of an H-Type Darrieus VAWT under High Winds: The Vorticity Index and the Imminent Vortex Separation Condition.” <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/2/644#B33-processes-11-00644> (accessed Aug. 24, 2023).
- [16] A. Dessoky, G. Bangga, T. Lutz, and E. Krämer, “Aerodynamic and aeroacoustic performance assessment of H-rotor darrieus VAWT equipped with wind-lens technology,” *Energy*, vol. 175, pp. 76–97, May 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.066.
- [17] “IJTTP | Free Full-Text | Three-Dimensional CFD Simulation and Experimental Assessment of the Performance of a H-Shape Vertical-Axis Wind Turbine at Design and Off-Design Conditions.” <https://www.mdpi.com/2504-186X/4/3/30> (accessed Aug. 24, 2023).
- [18] S. M. H. Karimian and A. Abdolahifar, “Performance investigation of a new Darrieus Vertical Axis Wind Turbine,” *Energy*, vol. 191, p. 116551, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116551.
- [19] J. He *et al.*, “CFD modeling of varying complexity for aerodynamic analysis of H-vertical axis wind turbines,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 2658–2670, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.132.
- [20] Y. Chakroun and G. Bangga, “Aerodynamic Characteristics of Airfoil and Vertical Axis Wind Turbine Employed with Gurney Flaps,” *Sustainability*, vol. 13, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13084284.
- [21] T. P. Syawitri, Y. Yao, J. Yao, and B. Chandra, “Geometry optimisation of vertical axis wind turbine with Gurney flap for performance enhancement at low, medium and high ranges of tip speed ratios,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 49, p. 101779, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101779.
- [22] A. N. C. Gonçalves, J. M. C. Pereira, and J. M. M. Sousa, “Passive control of dynamic stall in a H-Darrieus Vertical Axis Wind Turbine using blade leading-edge protuberances,” *Appl. Energy*, vol. 324, p. 119700, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119700.
- [23] “Energies | Free Full-Text | CFD Prediction for Wind Power Generation by a Small Vertical Axis Wind Turbine: A Case Study for a University Campus.” <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/4912> (accessed Sep. 02, 2023).
- [24] Y. Tominaga, “CFD Prediction for Wind Power Generation by a Small Vertical Axis Wind Turbine: A Case Study for a University Campus,” *Energies*, vol. 16, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16134912.
- [25] O. O. Ajayi, L. Unser, and J. O. Ojo, “Implicit rule for the application of the 2-parameters RANS turbulence models to solve flow problems around wind turbine rotor profiles,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 13, p.

- 100609, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.clet.2023.100609.
- [26] E. B. Tingey and A. Ning, "Development of a parameterized reduced-order vertical-axis wind turbine wake model," *Wind Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 494–508, Oct. 2020, doi: 10.1177/0309524X19849864.
- [27] N. Ogrodnik *et al.*, "Pseudo three-dimensional numerical investigation of legacy vertical axis wind turbine configurations," *Energy Convers. Manag.* X, vol. 17, p. 100338, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100338.
- [28] L. Srinivasan, N. Ram, S. B. Rengarajan, U. Divakaran, A. Mohammad, and R. K. Velamati, "Effect of Macroscopic Turbulent Gust on the Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbine," *Energies*, vol. 16, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16052250.
- [29] J. Radhakrishnan, M. Zuber, S. Sridhar, E. Y. Ng, and S. B. Shenoy, "Comparative analysis of counter rotating and conventional vertical axis wind turbine," in *2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*, Apr. 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEPE55035.2022.9798188.
- [30] A. Subramanian *et al.*, "Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model," *Energy*, vol. 133, pp. 179–190, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.118.
- [31] N. Ma *et al.*, "Airfoil optimization to improve power performance of a high-solidity vertical axis wind turbine at a moderate tip speed ratio," *Energy*, vol. 150, pp. 236–252, May 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.115.
- [32] A. H. Rajpar, I. Ali, A. E. Eladwi, and M. B. A. Bashir, "Recent Development in the Design of Wind Deflectors for Vertical Axis Wind Turbine: A Review," *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14165140.
- [33] "2D CFD Modeling of H-Darrieus Wind Turbines Using a Transition Turbulence Model - ScienceDirect." <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214000162> (accessed Aug. 24, 2023).
- [34] A. Barnes, D. Marshall-Cross, and B. R. Hughes, "Validation and comparison of turbulence models for predicting wakes of vertical axis wind turbines," *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 339–362, Nov. 2021, doi: 10.1007/s40722-021-00204-z.
- [35] N. Babu P, V. Dhinesh, A. Ashif, A. Vijay, and D. Mohankumar, "Design and fabrication of NACA 0018 straight bladed vertical axis wind turbine," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 573, p. 012047, Oct. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/573/1/012047.
- [36] P. Ghiasi, G. Najafi, B. Ghobadian, A. Jafari, and M. Mazlan, "Analytical Study of the Impact of Solidity, Chord Length, Number of Blades, Aspect Ratio and Airfoil Type on H-Rotor Darrieus Wind Turbine Performance at Low Reynolds Number," *Sustainability*, vol. 14, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14052623.
- [37] C. Rainone, D. De Siero, L. Iuspa, A. Viviani, and G. Pezzella, "A Numerical Procedure for Variable-Pitch Law Formulation of Vertical-Axis Wind Turbines," *Energies*, vol. 16, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16010536.
- [38] M. Elkhoury, T. Kiwata, and E. Aoun, "Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 139, pp. 111–123, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.004.
- [39] A. García Auyanet, R. E. Santoso, H. Mohan, S. S. Rathore, D. Chakraborty, and P. G. Verdin, "CFD-Based J-Shaped Blade Design Improvement for Vertical Axis Wind Turbines," *Sustainability*, vol. 14, no. 22, Art. no. 22, Jan. 2022, doi: 10.3390/su142215343.
- [40] J.-H. Lee, Y.-T. Lee, and H.-C. Lim, "Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 231–244, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.12.012.
- [41] "JMSE | Free Full-Text | Load Characteristics and Extreme Response of Straight-Bladed Floating VAWT Using a Fully Coupled Model." <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/1/185> (accessed Aug. 25, 2023).
- [42] Z. Trivković, J. Svorcan, M. Baltić, N. Zorić, and O. Peković, "Multi-objective Optimization and Experimental Testing of a Laminated Vertical-Axis Wind Turbine Blade," in *Current Problems in Experimental and Computational Engineering*, N. Mitrovic, G. Mladenovic, and A. Mitrovic, Eds., in *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham: Springer International

Publishing, 2022, pp. 39–65. doi:
10.1007/978-3-030-86009-7_3.

- [43] D. Gemayel, M. Abdelwahab, T. Ghazal, and H. Aboshosha, “Modelling of vertical axis wind turbine using large eddy simulations,” *Results Eng.*, vol. 18, p. 101226, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101226.
- [44] F. Ahsan, D. T. Griffith, and J. Gao, “Modal dynamics and flutter analysis of floating offshore vertical axis wind turbines,” *Renew. Energy*, vol. 185, pp. 1284–1300, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.041.
- [45] “Aerodynamic shape optimization of H-VAWT blade airfoils considering a wide range of angles of attack | International Journal of Low-Carbon Technologies | Oxford Academic.” <https://academic.oup.com/ijlct/article/doi/10.1093/ijlct/ctab092/6485165> (accessed Sep. 02, 2023).