

Pengaruh Sudut Blade terhadap *Tip Speed Ratio (TSR)* dan *Coefficient of Power (Cp)* pada Turbin Angin Savonius Type V

Sadri Mahmud^{a,1}, Witono Hardi^a, Bambang Tjiroso^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Khairun, Ternate, 97719

¹sadrimahmud251100@gmail.com

ABSTRACT

Turbin angin sumbu vertikal jenis savonius merupakan salah satu turbin angin berdasarkan *drag* yang memiliki banyak kelebihan diantaranya adalah bisa bekerja pada kecepatan angin rendah, memiliki kemampuan untuk berputar sendiri (*self-starting*) dan tidak perlu pengarah karena bisa berputar ketika mendapat angin dari berbagai arah. Namun demikian turbin angin jenis ini memiliki efisiensi terendah diantara jenis turbin angin yang lain. Berbagai modifikasi telah dilakukan untuk meningkatkan kemampuan turbin angin jenis ini diantaranya dengan melakukan modifikasi type dan bentuk blade agar mendapatkan kinerja maksimal. Penelitian ini berfokus pada pengaruh sudut blade terhadap *tip speed ratio (TSR)* dan *Coefficient of Power (Cp)* pada turbin angin savonius type V dengan dua buah blade. Pengambilan data dilakukan pada kecepatan angin bervariasi 3.5 m/s, 4.5 m/s, 5.5 m/s, 6.5 m/s dan 7 m/s di terowongan angin dan melakukan variasi sudut blade 50°, 80°, 110° dan 140°. Kecepatan sudut diukur dengan tachometer. Tip speed ratio (TSR) dihitung dengan membandingkan kecepatan linier ujung turbin dan kecepatan angin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada semua tingkat kecepatan, sudut 80° memiliki nilai putaran tertinggi 653.994 rpm pada kecepatan angin 7 m/s dan TSR tertinggi 1.011 pada kecepatan angin 4.5 m/s. Berdasarkan penelitian sebelumnya daerah operasi turbin angin savonius ada pada TSR 0 – 2 dan nilai efisiensi maksimal terjadi sekitar TSR 1. Oleh karena itu pada penelitian ini disimpulkan bahwa semakin besar TSR maka semakin besar nilai efisiensi. Nilai Coefficient of Power (Cp) maksimum terjadi pada sudut blade 80° dengan kecepatan angin 4.5 m/s dan TSR sebesar 1.011.

Keywords: turbin angin sumbu vertikal, turbin savonius, TSR, Coefficient of Power, putaran

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

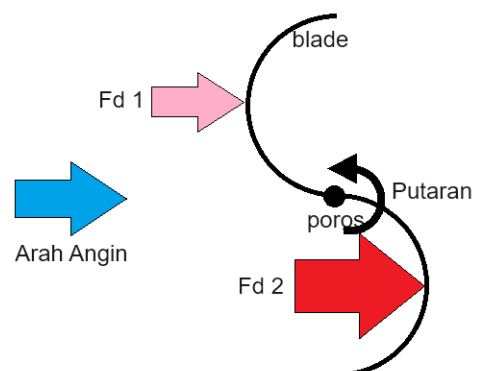
DOI: 10.71452/590801

PENDAHULUAN

Turbin angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang layak untuk dikembangkan. Salah satunya adalah dengan menciptakan desain yang mudah dibuat dan mudah diterapkan. Salah satu turbin angin yang dipakai adalah turbin angin savonius. Turbin angin Savonius adalah salah satu jenis turbin angin vertikal yang memiliki desain yang sederhana, terdiri dari dua atau lebih bilah berbentuk setengah silinder yang dipasang secara berlawanan, membentuk pola seperti huruf S saat dilihat dari atas.

Salah satu keunggulan utama dari turbin ini adalah kemampuannya untuk beroperasi pada kecepatan angin rendah sambil tetap menghasilkan torsi yang tinggi, meskipun efisiensi konversi energinya cenderung lebih rendah dibandingkan dengan jenis turbin angin lainnya, seperti turbin angin sumbu horizontal. Turbin Savonius umumnya digunakan dalam aplikasi yang memerlukan torsi tinggi tetapi dengan kecepatan rendah, seperti dalam sistem pompa air dan ventilasi udara. Selain itu, desainnya yang mampu menahan perubahan arah angin membuatnya menjadi pilihan ideal untuk digunakan di daerah perkotaan dengan tingkat turbulensi angin yang tinggi.

Banyak jenis type turbin angin savonius. Ada yang berbetuk L, berbentuk S dan ada juga yang berbentuk V. Bentuk V ini adalah pengembangan bentuk L tetapi dibuat simetris pada tekukan bladenya. Secara umum saat ini telah dikembangkan berbagai model seperti model tulip, model cone, model savonius berganda. Namun demikian turbin angin itu tetap bekerja berdasarkan prinsip turbin angin savonius yaitu berdasarkan perbedaan gaya drag yang terjadi pada kedua sisi blade.



Gambar 1. Prinsip Kerja Turbin Savonius

Gambar 1 menunjukkan prinsip kerja turbin angin savonius. Selanjutnya turbin angin savonius

dikembangkan dalam berbagai jenis bentuk dengan pertimbangan efisiensi dan estetika.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mendapatkan desain optimum turbin angin sumbu vertikal savonius type V agar mendapatkan desain terbaik dan mudah dilakukan manufaktur. Penyederhanaan bilah menjadi bentuk garis-garis lurus pada type V ini tentu ada efisiensi yang dikorbankan namun demikian dibuat agar penurunan efisiensi ini tidak signifikan dibandingkan penyederhanaan bentuk dan kemudahan dalam proses pembuatan.

REVIEW LITERATUR

Pengembangan turbin angin savonius telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Penting untuk menentukan konfigurasi paling optimal dari turbin angin sumbu vertikal Savonius yang mencapai kinerja terbaik dengan kemampuan self-starting yang tinggi. Dengan demikian, efek dari beberapa parameter desain termasuk sudut puntir, rasio tumpang tindih, dan rasio ukuran pelat ujung, bersama dengan kecepatan angin pada kinerja turbin angin Savonius diselidiki. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rotor Savonius dengan sudut puntir 45° , rasio tumpang tindih nol, dan rasio ukuran pelat ujung 1,1 mencapai daya keluaran bersih tertinggi dibandingkan dengan desain lainnya. [1]

Bilah berbentuk V telah dikembangkan sebelumnya dan memberikan hasil sebagai berikut. Selain peningkatan besar efisiensi daya, bilah berbentuk V terbukti mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh beban lateral pada turbin angin. Selain itu, struktur aliran di atas permukaan bilah dipelajari untuk mengungkap mekanisme penghentian dinamis dengan alasan peningkatan daya yang dijelaskan. Selain itu, ditemukan bahwa bilah berbentuk V dapat secara efektif menekan pemisahan aliran dan menunda kemacetan dinamis di bagian tengah bilah, dan efek ujung bilah yang tidak diinginkan tidak akan lebih serius dibandingkan dengan bilah lurus konvensional. Akhirnya disimpulkan bahwa pekerjaan saat ini dapat diterapkan secara praktis pada desain dan pengoptimalan bilah VAWT.[2]

Seringkali turbin savonius digunakan secara bersama sama dengan turbin angin darius untuk memberi kemampuan self-starting. Walaupun turbin angin darius memiliki efisiensi yang lebih tinggi namun tidak memiliki kemampuan berputar sendiri. Turbin angin sumbu vertikal hibrida Savonius-Darrieus yang telah dikembangkan memiliki kemampuan self-starting yang cukup baik ketika terkena angin dengan kecepatan rata-rata 7,3 m/s pada semua variasi tinggi

bilah Savonius. Variasi turbin angin hibrida Savonius-Darrieus yang paling optimal dan memiliki kemampuan self-starting terbaik adalah yang memiliki bilah Savonius setinggi 12 cm. Variasi ini menghasilkan daya sebesar 0,42 Watt, dengan putaran poros turbin mencapai 550,92 rpm, rasio kecepatan ujung (tip speed ratio) sebesar 1,18, dan efisiensi turbin sebesar 2,6%. Turbin jenis ini membutuhkan waktu 4,75 detik untuk memulai sendiri (self-starting) ketika tertiuip angin dengan kecepatan rata-rata 7,3 m/s dan memerlukan 18,94 detik untuk mencapai putaran konstan.[3]

Penggabungan turbin angin darius savonius juga berkaitan dengan masalah efisiensi. Dengan melihat kinerja masing-masing rotor, diamati bahwa efisiensi konversi rotor tipe-H meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan angin. Namun, dalam kasus rotor tipe-S, efisiensinya lebih tinggi pada kecepatan angin yang lebih rendah dan cenderung menurun seiring dengan peningkatan kecepatan operasi. Dengan demikian, efisiensi maksimum rotor tipe S tercapai pada kecepatan rendah, sedangkan rotor tipe H mencapai efisiensi maksimumnya pada kecepatan angin operasi tertinggi. Efisiensi rata-rata rotor putar balik Savonius-Darrieus saat ini telah ditingkatkan hingga mencapai hampir 42% lebih efisien dalam hal torsi.[3 - 5].

Jumlah blade juga merupakan hal yang diteliti dan mempengaruhi kinerja. Semakin banyak jumlah blade maka TSR semakin meningkat. Namun demikian ada metode tertentu untuk mendapatkan jumlah blade yang optimum pada sebuah turbin [6 - 8]

Solidity merupakan perbandingan antara luasan total luasan rotor dibanding dengan luasan sapuan angin. Pada turbin angin sumbu horizontal merupakan luasan lingkaran yang dihitung dari jarak antar ujung blade sebagai diameter. Sedangkan pada turbin angin sumbu vertikal luasan total angin adalah tinggi dikalikan diameter turbin, Solidity ini sangat mempengaruhi efisiensi turbin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bilah pitch variabel dengan soliditas tinggi lebih disukai ketika torsi self-starting awal diperlukan. Selain itu, bilah pitch variabel mampu menghasilkan lebih banyak torsi pada soliditas tinggi. Oleh karena itu, interaksi pusaran antara pusaran angin dan bilah di aliran angin menurun. Hasilnya membuktikan bahwa pengurangan daya VAWT dengan pitch tetap pada soliditas tinggi dapat diatasi dengan memanfaatkan teknik pitch variabel.[7], [10], [11].

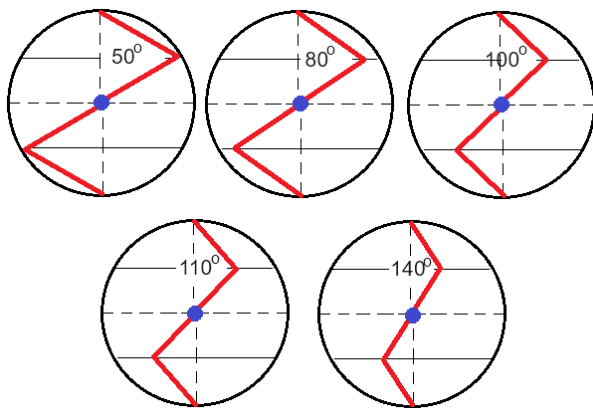
Saat ini penggunaan software komputer sangat lazim pada desain turbin angin. Beberapa software seperti QBlade, ANSYS, CFD dan lain lain seringkali digunakan dan bisa mendapatkan bentuk maupun

variasi skenario simulasi dalam jumlah yang sangat banyak. Namun demikian penggunaan software juga harus dibarengi dengan percobaan yang sebenarnya. Simulasi ini menggunakan pendekatan numerik maupun finite element method yang disediakan oleh berbagai paket program. [12 - 26]

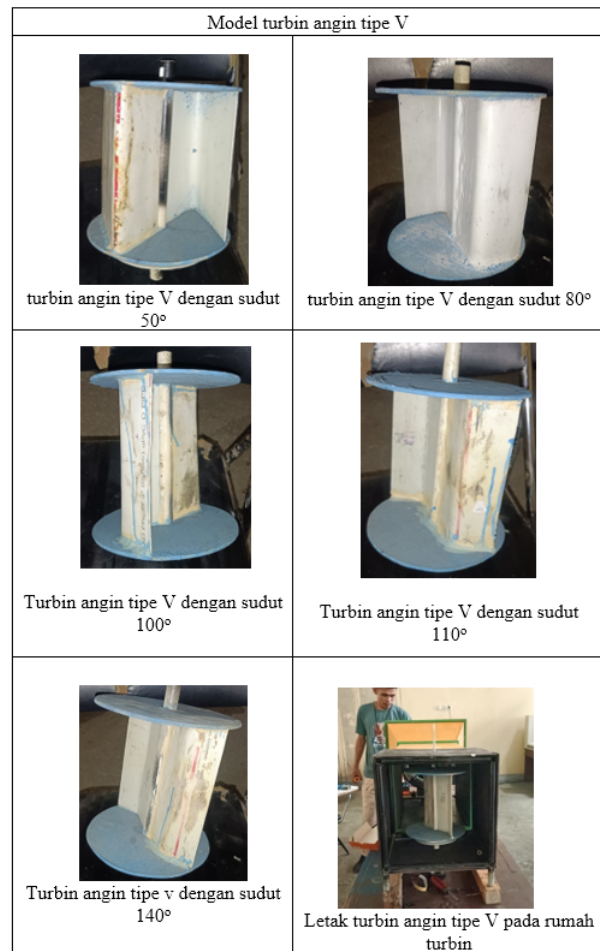
Penelitian ini memakai turbin angin sumbu vertikal tipe V yang diharapkan bisa mendapatkan bentuk desain yang optimum dan mudah dikerjakan dengan peralatan sederhana dan bermanfaat secara menyeluruh.

METODOLOGI

Specimen yang dipakai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.



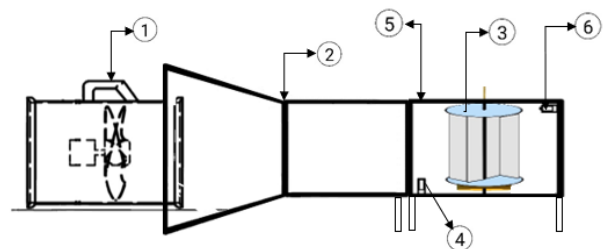
Gambar 2. Variasi Sudut Turbin Blade



Gambar 3. Rotor yang dipakai percobaan

Gambar 3 menunjukkan turbin angin dengan berbagai sudut yang dipakai pada percobaan.

Peralatan percobaan adalah sebagai berikut



Gambar 4. Peralatan Percobaan

Gambar 2 menunjukkan peralatan percobaan yang terdiri dari (1) Blower Ventilator, (2) Terowongan Angin, (3) Turbin angin tipe V, (4) Anemometer, (5) Rumah turbin, dan (6) Tachometer.



Gambar 5. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan membuat turbin angin savonius type V dengan ukuran tinggi 20 cm dan diameter terluar adalah 20 cm. Type blade dan variasi yang dilakukan bisa dilihat pada gambar 2 dan 3. Dilakukan pengujian dengan beberapa tingkat kecepatan angin yaitu 3.5 m/s, 4.5 m/s, 5.5 m/s, 6.5 m/s dan 7 m/s. Sebuah tachometer digital digunakan untuk mengamati putaran poros. Percobaan diulang 10 kali agar data yang dihasilkan valid.

Perbandingan Kecepatan ujung atau Tip Speed Ratio

$$\lambda = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot v}$$

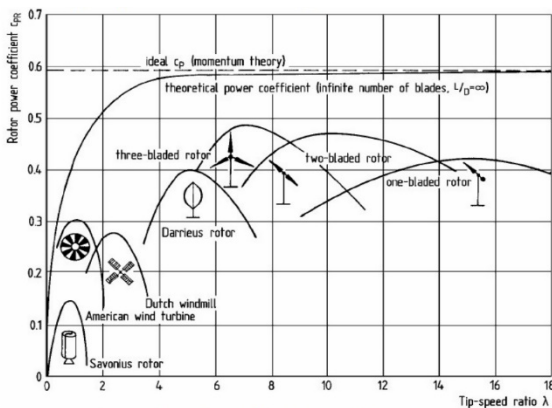
Dimana: λ = tip speed ratio

D = diameter turbin

n = putaran poros

v = kecepatan angin (m/s)

Semua percobaan pada setiap model blade dihitung TSR-nya untuk bisa dilihat kecenderungan nilai efisiensinya.



Gambar 6. Efisiensi Berbagai Turbin

Gambar 6 merupakan efisiensi dari berbagai turbin angin yang telah dilakukan penelitian sebelumnya. TSR hasil penelitian dibandingkan dengan TSR sesuai grafik savonius pada grafik itu. Dari situ bisa

ditentukan pada TSR yang mana nilai efisiensi yang paling besar.

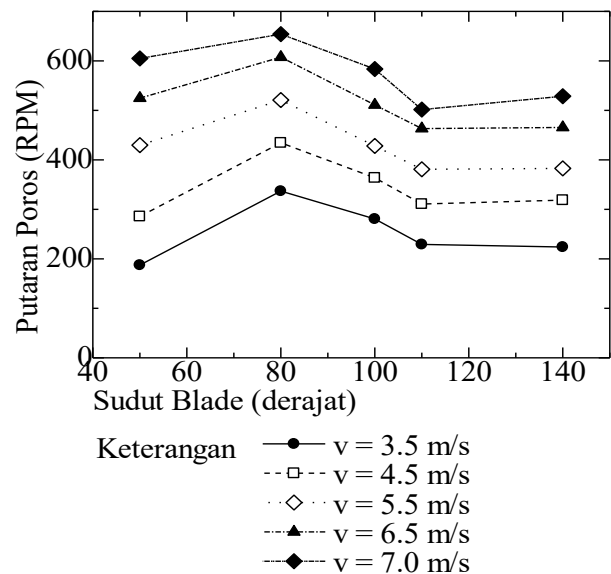
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengambilan data percobaan adalah sebagai berikut. Faktor beban diperhitungkan dalam hal ini.

Tabel 1. Data Putaran Turbin

V angin (m/s)	Sudut Blade (derajat)				
	50	80	100	110	140
3.5	187.47	336.906	280.602	229.212	223.902
4.5	285.732	434.466	363.726	310.77	318.708
5.5	429.732	520.884	428.148	380.952	382.788
6.5	524.718	607.518	511.002	463.194	465.48
7	604.944	653.994	583.542	501.588	528.552

Tabel di atas dibuat grafik sebagai berikut.



Gambar 7. Hubungan Sudut Blade Terhadap Putaran

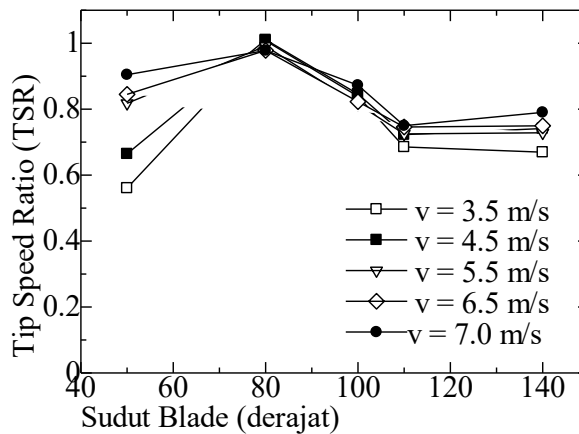
Gambar 7 menunjukkan pada sudut 80° putaran poros paling tinggi untuk semua tingkat kecepatan angin. Kenaikan dari sudut 50° ke 80° sangat signifikan. Setelah itu putaran mengalami penurunan. Penurunan terjadi sampai sudut 110°. Setelah itu pada sudut 140° cenderung stagnan atau terjadi kenaikan sedikit.

Kenaikan yang sangat signifikan pada sudut 80° ini karena pada sudut itu gaya drag total sebagai selisih kedua permukaan blade mengalami nilai yang paling besar. Sudut 50° memiliki panjang kaki V yang paling panjang sehingga terjadi gesekan dengan udara yang paling besar yang berakibat turunnya putaran. Selanjutnya dengan menaikkan sudut blade gaya drag semakin mengecil karena selisih gaya drag makin kecil. Sampai akhirnya jika dibuat sudut 180° putaran akan nol karena selisih gaya drag adalah nol.

Tabel 2. Data TSR

Kecepatan Angin (m/s)	TSR pada sudut				
	50°	80°	100°	110°	140°
3,5	0.560625	1.007509	0.839134	0.685453	0.669574
4,5	0.664591	1.010536	0.846	0.722828	0.741291
5,5	0.817793	0.991258	0.814779	0.724963	0.728457
6,5	0.844931	0.97826	0.822844	0.745861	0.749542
7	0.904535	0.977877	0.872534	0.749993	0.790311

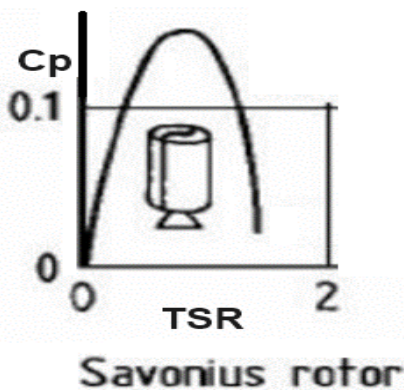
Jika dibuat grafik adalah sebagai berikut:



Gambar 8. Hubungan Sudut Blade Terhadap TSR

Gambar 8 menunjukkan hubungan sudut blade dengan TSR. TSR merupakan perbandingan antara kecepatan linier ujung blade dengan kecepatan angin. Dari gambar 8 didapatkan informasi bahwa nilai TSR turbin savonius pada penelitian ini tidak melebihi dari 1. (Tepatnya 1.01 pada sudut 80° dan v=4.5 m/s.)

Dari gambar 6 khusus untuk savonius bisa dilihat sebagai berikut.



Gambar 9. Daerah Kinerja Turbin Savonius

Gambar 9 menunjukkan sampai dengan TSR = 1 maka semakin besar TSR semakin besar nilai Cp. Oleh karena itu dari penelitian ini dapat disimpulkan semakin besar nilai TSR nilai Cp semakin meningkat.

Jadi pada sudut 80° merupakan sudut yang memiliki efisiensi terbesar untuk semua kecepatan angin.

KESIMPULAN

Perbedaan bentuk dari turbin angin sumbu vertikal tipe V berpengaruh pada putaran turbin dimana turbin dengan sudut 50° memiliki sudut paling kecil mengakibatkan angin yang di dapat oleh turbin sangat sedikit, pada sudut 80° lebih terbuka dan angin yang di peroleh turbin tidak banyak yang terbuang melewati turbin. Pada sudut 100° dan sudut 110° lebih terbuka akibatnya angin yang melewati bilah turbin banyak yang terbuang tetapi lebih banyak ditangkap oleh bilah turbin. Turbin dengan sudut 140° nyaris lurus dengan arah angin mengakibatkan angin yang ditangkap tidak maksimal. Jadi jika di buat turbin dengan sudut yang kurang dari 50° sudah tidak efektif karena sudutnya menyempit dan mengakibatkan angin yang tangkap turbin tidak maksimum, begitu pula jika dibuat turbin dengan sudut yang melebihi 140° maka bilah turbin akan lurus dan sejajar dengan arah angin menyebabkan tidak ada putaran jika terkena angin.

Pada sudut 80° memiliki TSR yang paling besar untuk semua tingkat kecepatan. Pada sudut itu efisiensinya paling tinggi. Hal itu berdasarkan peta kinerja turbin angin savonius yang mana pada TSR kurang dari 1 semakin besar TSR semakin besar nilai Cp nya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada semua rekan dalam grup penelitian turbin angin Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Khairun atas kerja sama nya. Ucapan terima kasih kepada pengelola workshop Teknik Mesin yang membantu dalam pengambilan data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Saad, I. I. El-Sharkawy, S. Ookawara, and ..., "Performance enhancement of twisted-bladed Savonius vertical axis wind turbines," *Energy Conversion and ...*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420302119>
- [2] J. Su, Y. Chen, Z. Han, D. Zhou, Y. Bao, and Y. Zhao, "Investigation of V-shaped blade for the performance improvement of vertical axis wind turbines," *Appl Energy*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919320136>
- [3] W. Hardi et al., "Desain dan Optimasi Turbin Angin Sumbu Vertikal Kombinasi Type Darius dan Type Savonius untuk Meningkatkan Efisiensi Pembangkit Listrik Sumber Energi Terbarukan," *Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal* |, vol. 9, no. 1, pp. 2528–3723, 2024, doi: 10.21070/rem.v9i1.1693.
- [4] D. H. Didane, S. M. Maksud, M. F. Zulkafli, and ..., "Experimental Study on the Performance of a Savonius-Darrius Counter-Rotating Vertical Axis Wind Turbine," ... Series: *Earth and ...*, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/268/1/012060.
- [5] ..., M. S. ul Haq, A. H. Memon, and M. S. J. Energy, "Experimental study to assess the performance of combined Savonius Darrius vertical axis wind turbine at different arrangements," *2018 IEEE 21st ...*, 2018, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8595538/>
- [6] H. Su, B. Dou, T. Qu, P. Zeng, and L. Lei, "Experimental investigation of a novel vertical axis wind turbine with pitching and self-starting function," *Energy Convers Manag*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420305562>
- [7] P. L. Delafin, T. Nishino, L. Wang, and ..., "Effect of the number of blades and solidity on the performance of a vertical axis wind turbine," *Journal of Physics ...*, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/753/2/022033.
- [8] T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, K. Furukawa, and ..., "Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine," *Energy*, 2015, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215010105>
- [9] M. Zheng, Y. Li, H. Teng, J. Hu, Z. Tian, and Y. Zhao, "Effect of blade number on performance of drag type vertical axis wind turbine," *Applied solar energy*, 2016, doi: 10.3103/S0003701X16040150.
- [10] A. Subramanian, S. A. Yogesh, H. Sivanandan, A. Giri, and ..., "Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model," *Energy*, 2017, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217308757>
- [11] A. Sagharichi, M. Zamani, and A. Ghasemi, "Effect of solidity on the performance of variable-pitch vertical axis wind turbine," *Energy*, 2018, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218314579>
- [12] M. Zamani, M. J. Maghrebi, and S. R. Varedi, "Starting torque improvement using J-shaped straight-bladed Darrius vertical axis wind turbine by means of numerical simulation," *Renew Energy*, 2016, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116302531>
- [13] R. A. L. Minetto and M. Paraschivoiu, "Simulation based analysis of morphing blades applied to a vertical axis wind turbine," *Energy*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220308124>
- [14] D. H. Didane, M. N. A. Bajuri, B. Manshoor, and ..., "Performance Investigation of Vertical Axis Wind Turbine with Savonius Rotor using Computational Fluid Dynamics (CFD)," *CFD Letters*, 2022, [Online]. Available: https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/CFD_Letters/article/view/700
- [15] G. Naccache and M. Paraschivoiu, "Parametric study of the dual vertical axis wind turbine

- using CFD,” *Journal of Wind Engineering and Industrial ...*, 2018, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610517301782>
- [16] R. Gosselin, G. Dumas, and M. Boudreau, “Parametric study of H-Darrieus vertical-axis turbines using CFD simulations,” ... and *Sustainable Energy*, 2016, [Online]. Available: <https://pubs.aip.org/aip/jrse/article/8/5/053301/1013423>
- [17] C. Li, Y. Xiao, Y. Xu, Y. Peng, G. Hu, and S. Zhu, “Optimization of blade pitch in H-rotor vertical axis wind turbines through computational fluid dynamics simulations,” *Appl Energy*, 2018, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917317531>
- [18] Y. T. Lee and H. C. Lim, “Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine,” *Renew Energy*, 2015, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115003237>
- [19] M. Zamani, A. Sangtarash, and M. J. Maghrebi, “Numerical study of porous media effect on the blade surface of vertical axis wind turbine for enhancement of aerodynamic performance,” *Energy Conversion and ...*, 2021, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421007743>
- [20] B. Hand, G. Kelly, and A. Cashman, “Numerical simulation of a vertical axis wind turbine airfoil experiencing dynamic stall at high Reynolds numbers,” *Computers & Fluids*, 2017, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793017300713>
- [21] F. Arpino, M. Scungio, and G. Cortellessa, “Numerical performance assessment of an innovative Darrieus-style vertical axis wind turbine with auxiliary straight blades,” *Energy Convers Manag*, 2018, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041830637X>
- [22] F. Kanyako and I. Janajreh, “Numerical investigation of four commonly used airfoils for vertical axis wind turbine,” *ICREGA’14-Renewable Energy: Generation and ...*, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-05708-8_35.
- [23] S. O. Akansu, T. Dagdevir, and N. Kahraman, “Numerical investigation of the effect of blade airfoils on a vertical axis wind turbine,” *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2017, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/isibted/issue/33976/376110>
- [24] Y. Wang, X. Sun, X. Dong, B. Zhu, D. Huang, and ..., “Numerical investigation on aerodynamic performance of a novel vertical axis wind turbine with adaptive blades,” *Energy Conversion and ...*, 2016, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415010080>
- [25] C. Song, G. Wu, W. Zhu, X. Zhang, and J. Zhao, “Numerical investigation on the effects of airfoil leading edge radius on the aerodynamic performance of H-rotor Darrieus vertical axis wind turbine,” *Energies (Basel)*, 2019, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3794>
- [26] S. D. Karmakar, S. M. Rahman, and ..., “Numerical investigations on the performance of Darrieus vertical axis wind turbine with NACA0017 blade profile,” ... *Fluid Dynamics, an ...*, 2023, doi: 10.1504/PCFD.2023.134191.