

Analisis Optimasi Sudut Pitch pada Turbin Angin Sumbu Horizontal untuk Meningkatkan Nilai Coefficient of Power (Cp) Secara Simulasi dan Eksperimental

Witono Hardi^{1*}, Mohammad Muzni Harbelubun², Tri Suyono³, Dimas Putra Wardani⁴
*Email corresponding author: Witono@unkhair.ac.id

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Khairun, Jl. Jusuf Abdul Rahman, Gambesi, Ternate Selatan, Kota Ternate, Maluku Utara, Indonesia

Article history: Received: 27 Oktober 2024 | Revised: 6 Maret 2025 | Accepted: 21 Maret 2025

Abstract. Renewable energy is a critical issue at this time. Fossil fuel power plants must be systematically reduced not to pollute the environment. Wind turbines are one of the renewable energy power plants. However, research on wind turbines must be constantly improved because wind turbines have limited efficiency, unlike machines in general, where the efficiency is relatively high. This study aims to optimize the pitch angle in horizontal axis wind turbines to increase the coefficient of power (Cp) value in a simulated and experimental manner. This optimization must be done so that the elevator force that occurs on the horizontal axis of the wind turbine blade has an optimal value by paying attention to the drag force that arises. The turbine's pitch angle varies from the position near the hub to the tip position. Three variations are carried out, namely 200-00, 250-50, and 300-100. Simulations were carried out with Qblade software on the three types of variations, and experiments were carried out in the laboratory. The results of simulations and experiments show that the 20-0 variation has the highest efficiency compared to others. This result is a recommendation for making horizontal-axis wind turbine blades.

Keywords - horizontal axis wind turbine, blades, pitch angle, Coefficient of Power

Abstrak. Energi terbarukan merupakan isu yang sangat penting pada saat ini. Penggunaan pembangkit listrik berbahan bakar fosil harus dikurangi secara sistematis agar tidak memberikan pencemaran lingkungan. Turbin angin merupakan salah satu pembangkit listrik energi terbarukan. Namun demikian penelitian tentang turbin angin harus senantiasa ditingkatkan karena turbin angin memiliki efisiensi yang terbatas. Tidak seperti mesin pada umumnya yang mana efisiensinya cukup tinggi. Penelitian ini bertujuan melakukan optimasi sudut pitch pada turbin angin sumbu horizontal untuk meningkatkan nilai coefficient of power (Cp) secara simulasi dan eksperimental. Optimasi ini harus dilakukan agar gaya lift yang terjadi pada bilah turbin angin sumbu horizontal memiliki nilai optimum dengan memperhatikan gaya drag yang terjadi. Sudut pitch pada turbin dibuat bervariasi dari posisi dekat hub sampai dengan posisi tip. Ada tiga jenis variasi yang dilakukan yaitu 20⁰-0⁰, 25⁰-5⁰ dan 30⁰-10⁰. Simulasi dilakukan dengan software Qblade pada tiga jenis variasi itu kemudian dilakukan eksperimen di laboratorium. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan pada variasi 20-0 memiliki efisiensi paling tinggi dibanding yang lain. Hasil ini merupakan rekomendasi pada proses pembuatan bilah turbin angin sumbu horizontal.

Kata Kunci - turbin angin sumbu horizontal, bilah, sudut pitch, Coefficient of Power

PENDAHULUAN

Turbin angin merupakan salah satu pembangkit energi listrik sumber terbarukan. Namun demikian efisiensi turbin angin sangat terbatas karena sifat aerodinamis yang dimiliki. Turbin angin sumbu horizontal yang berputar terlalu cepat *bladenya* seolah-olah akan membentuk sebuah disk yang susah ditembus oleh angin berikutnya. Pada kondisi ini maka energi yang bisa dipanen dari angin akan menurun. Sifat aerodinamis profil *blade* yang dipakai pada penelitian ini (NACA 0010) yang bekerja optimal pada sudut pitch tertentu harus dioptimalkan agar mendapatkan desain yang terbaik.

Kinerja turbin angin sumbu horizontal sangat dipengaruhi sudut pitch. Namun demikian kecepatan linier blade dipengaruhi jari-jarinya. Semakin jauh dari hub maka kecepatan linier semakin besar. Oleh karena itu pada sebuah turbin angin harus memiliki sudut pitch yang berbeda sepanjang blade. Bagaimana menentukan sudut pitch yang optimum agar mendapatkan Cp semaksimal mungkin merupakan permasalahan pada penelitian.

Penelitian ini bertujuan khusus untuk menentukan gradasi sudut *pitch* dari arah *hub* ke *tip* secara cepat pada panjang blade tertentu. Dengan demikian jika ada blade yang akan dibuat sudah ada formulasi khusus dan cepat untuk mendapatkan nilai optimum dengan mempertimbangkan dimensinya.

Sebagaimana dijelaskan bahwa jika turbin angin dibuat secara sempurna maka hanya akan mendapatkan efisiensi maksimum 59% yang disebut *betz number*. Selanjutnya secara nyata efisiensi turbin angin sumbu horizontal berkisar antara 40-50%. Oleh karena itu optimasi sudut *pitch* merupakan hal yang sangat penting. Pada turbin angin skala kecil dengan optimasi yang baik akan mendapatkan daya yang maksimum.

Pendekatan teoritik dan simulasi merupakan metode untuk melakukan validasi atas hasil percobaan. Dengan demikian pada dimensi blade yang dikehendaki akan dapat ditentukan berapa sudut pada ujung blade dekat hub dan ujung blade dekat tip termasuk pada TSR (Tip Speed Rasio) dan kecepatan angin yang digunakan. Dengan demikian angin yang melewati aerofoil pada blade akan memberikan daya angkat yang optimum walaupun kecepatan linier pada setiap titik berbeda sebagai fungsi jari-jari. Secara kekuatan struktur optimasi sudut pitch ini akan membuat beban yang diterima bilah lebih merata. Namun demikian penelitian ini membatasi permasalahan hanya pada perilaku aerodinamik akibat optimasi dalam hubungannya dengan peningkatan Cp.

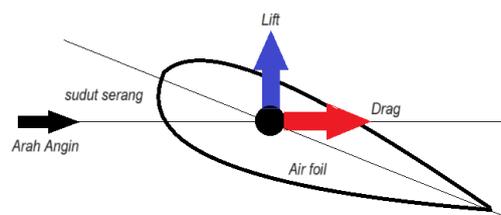
Turbin angin merupakan salah satu pembangkit listrik energi terbarukan yang sangat terkenal. Secara tradisional pada masa lalu turbin angin telah digunakan untuk pompa air dan menggiling hasil bumi. Di era modern turbin angin telah menjadi salah satu alternatif energi terbarukan yang ramah lingkungan. Penelitian tentang turbin angin dilakukan dengan meneliti kondisi aerodinamik dan wake [1], penggunaan CFD [2], maupun penggunaan counter rotating [3]. Penggunaan energi angin pada kapal telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Pada penelitian di Jawa barat turbin angin dipasang di kapal ikan Rancabuaya. Mampu menyediakan energi yang dibutuhkan pada kapal ikan Rancabuaya 720 Wh per hari. Sistem ini dilengkapi dengan tiga baterai yang masing-masing berkapasitas 35 Ah. Turbin dipasang pada ketinggian 1.7 m dan kondisi kapal masih stabil [4]

Namun demikian turbin angin merupakan salah satu pembangkit energi terbarukan yang memiliki efisiensi terbatas.. Efisiensi maksimum sebuah turbin angin adalah 59% sebagaimana dirumuskan oleh Betz [5], [6]. Turbin angin sumbu horizontal menempati peringkat tinggi dalam hal efisiensi dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu vertikal model darius memiliki efisiensi yang lebih tinggi tetapi turbin jenis ini tidak bisa berputar sendiri dari kondisi diam walaupun terkena angin kencang. Harus ada mekanisme untuk memberikan putaran awal. Turbin angin sumbu vertikal type savonius bekerja berdasarkan gaya seret (drag) dan mampu bekerja pada kecepatan angin yang rendah. Namun demikian efisiensi turbin ini sangat rendah hanya sekitar 15%-20%.

Berdasarkan penelitian terdahulu nilai Cp sebagai fungsi TSR pada beberapa jenis turbin angin berbeda-beda. Turbin savonius memiliki nilai paling kecil yaitu 0.15. Turbin darius merupakan turbin angin sumbu vertikal yang bekerja berdasarkan lift yang memiliki Cp lebih besar daripada savonius yaitu sekitar 0.2 sd 0.35. Sedangkan turbin angin horizontal memiliki nilai Cp yang tinggi sekitar 0.4 sd 0.5 [7]. Publikasi yang berkaitan dengan perbandingan performansi turbin ini telah dijelaskan dan memang secara umum turbin angin horizontal memiliki Cp paling tinggi [8], [9]. Upaya untuk meningkatkan efisiensi turbin angin sumbu horizontal dilakukan dengan melakukan optimasi bilah [10], termasuk penggunaan metode baru[11]. Selain itu penelitian dilakukan secara Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics) Turbin Angin Sumbu Horizontal Tipe Propeler Tiga Blade Rotor Ganda Melalui Variasi Geometri[10]. Simulasi Konversi Energi Kinetik Menjadi Energi Listrik Pada Kincir Angin 3 Sudu Sumbu Horizontal juga dilakukan agar dalam desain bisa berjalan baik sebelum pembuatan prototype yang sesungguhnya.[12].

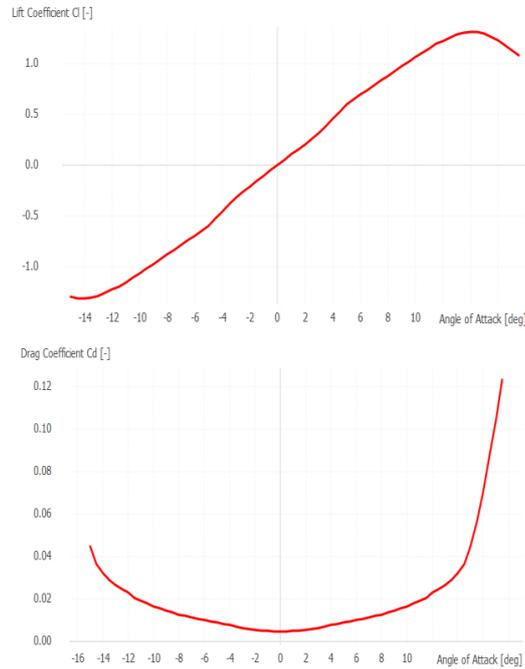
Jumlah blade juga mempengaruhi kinerja turbin angin berdasarkan penelitian bahwa sudu 3 memiliki kinerja yang optimum dengan mempertimbangkan konstruksi dan biaya pembuatan turbin [13], [14], [15]. Performansi aerodinamik juga diteliti secara eksperimen dan investigasi numerik pada HAWT skala kecil [16]. Selain itu ntuk cross section dari turbin angin sesuai standard NACA memiliki pengaruh berbeda. Penelitian tentang pengaruh NACA dilakukan dan didapatkan bahwa pada Turbin Angin Sumbu Horizontal BladeTaperless Berbahan Komposit Hybrid sesuai hasil penelitian menunjukkan tegangan dan daya blade NACA 4412 lebih tinggi dibandingkan blade NACA 4712 dan 5513 [17]Penelitian sudut pitch telah diteliti oleh peneliti sebelumnya dan memberikan rekomendasi sudut optimum berdasarkan dimensi yang diinginkan.[18]

Turbin angin sumbu horizontal bekerja berdasarkan prinsip lift. Udara yang bergerak melalui sebuah profil akan memberikan gaya angkat (lift) dan gaya hambat (drag).



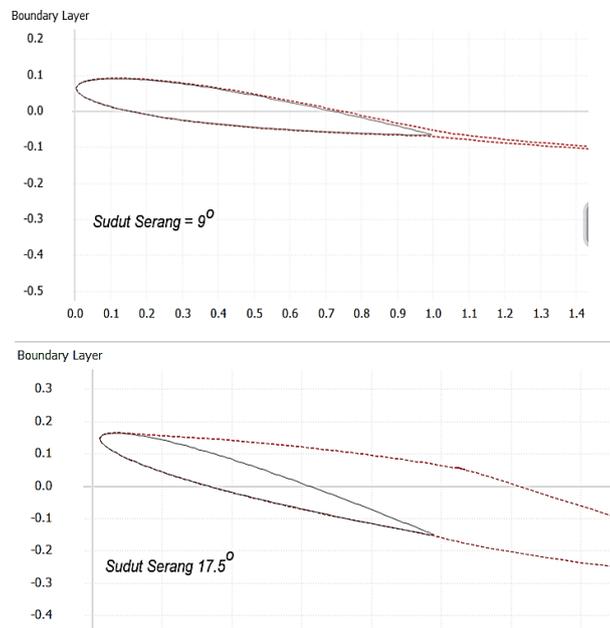
Gambar 1. Lift dan Drag pada airfoil

Nilai lift dan drag itu dipengaruhi oleh sudut serang. Grafik yang berkaitan dengan lift dan drag sebagai fungsi sudut serang adalah sebagai berikut.



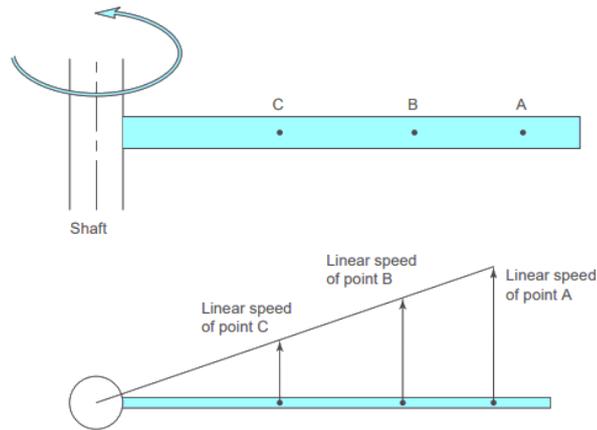
Gambar 2. Hubungan Lift dan Drag terhadap sudut serang

Pada gambar 2 terlihat lift semakin naik dengan semakin naiknya sudut serang. Pada nilai tertentu lift justru akan turun.



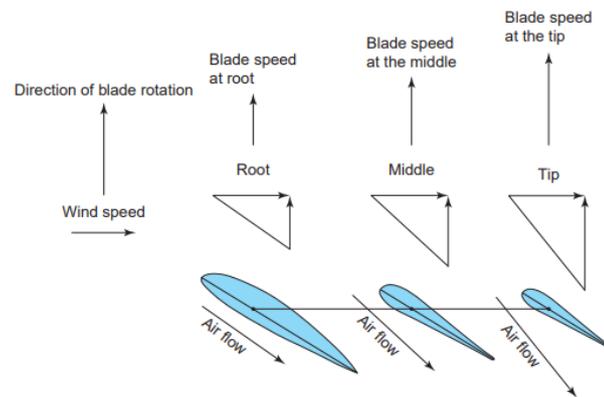
Gambar 3. Boundary Layer pada airfoil

Hal ini disebabkan adanya separasi pada airfoil seperti terlihat pada gambar 3. Oleh karena itu diperlukan pemilihan sudut yang paling optimum.



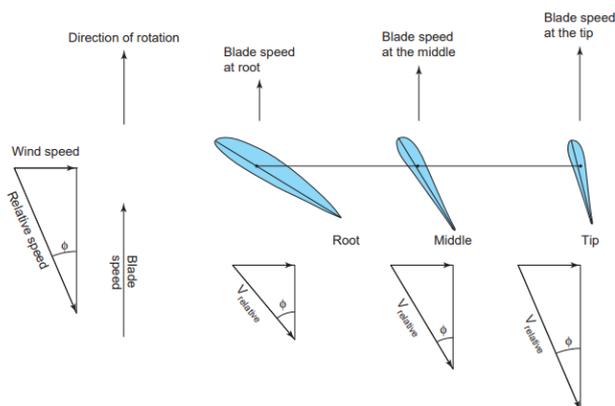
Gambar 4. Kecepatan Linier sepanjang Blade

Gambar 4 memperlihatkan kecepatan linier sepanjang blade tidak sama tergantung jarak dengan pusat. Makin besar jari-jari, makin besar kecepatan linier. Oleh karena itu jika sudut pitch dibuat sama tentu tidak tepat.



Gambar 5. sudut pitch sama

Jika sudut pitch sama seperti pada gambar 5 arah angin menjadi tidak akurat seperti ditunjukkan.

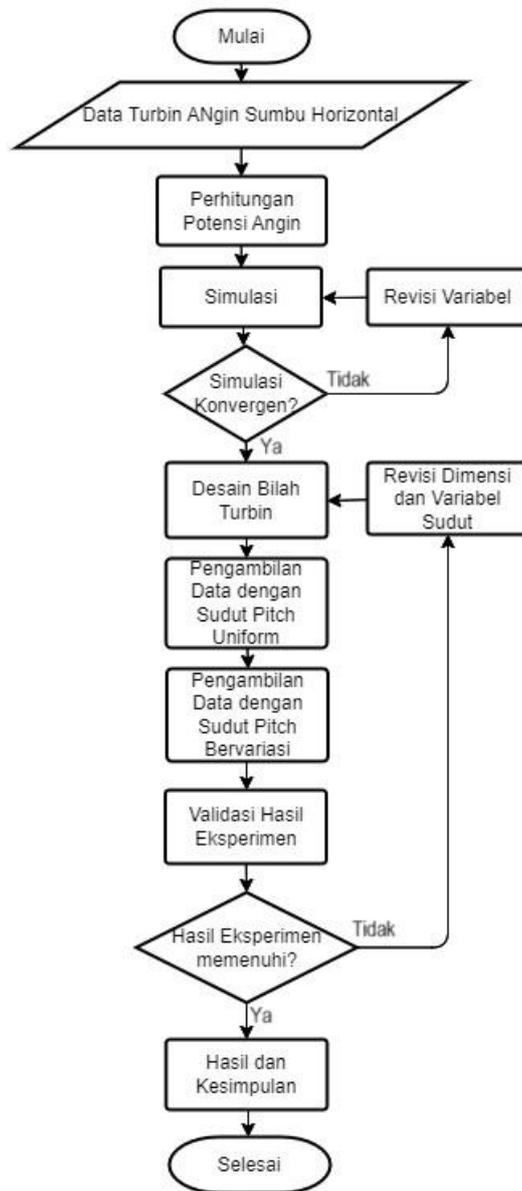


Gambar 6. Optimasi variasi sudut pitch

Gambar 6 menunjukkan variasi sudut pitch untuk meningkatkan performa turbin sehingga arah angin bisa sama sesuai dengan arah yang sesungguhnya.

METODE

Penelitian ini dilakukan dengan tahapan sebagaimana pada diagram alir berikut.



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

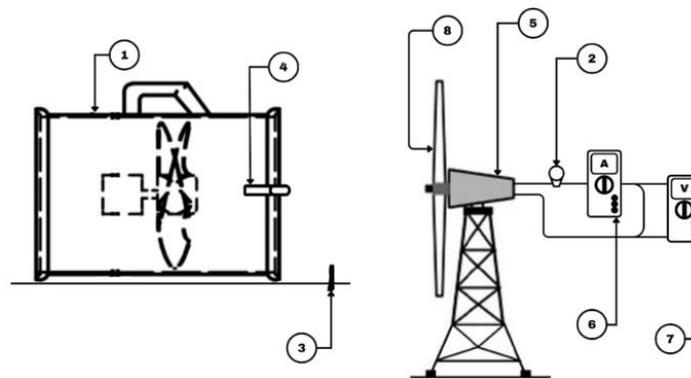
Langkah-langkah penelitian;

1. Data turbin angin sumbu horizontal
Penelitian ini menggunakan turbin angin sumbu horizontal dengan jumlah blade = 3 dan diameter rotor adalah 30 cm. Lebar blade adalah 6 cm menggunakan sirfoil NACA 0010.
2. Perhitungan potensi angin
Energi angin pada luasan sapuan turbin A adalah :

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

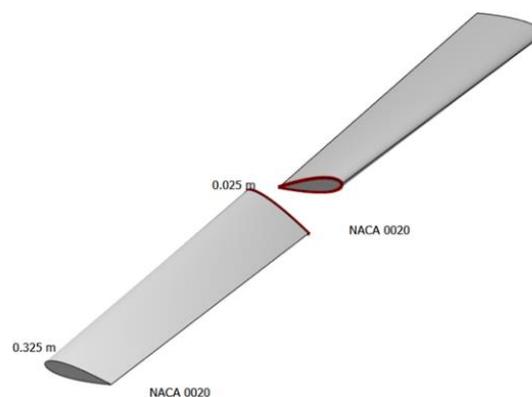
E_k adalah energi, ρ densitas udara sebesar 1.2 kg/m^3 , A luasan sapuan rotor dan v adalah kecepatan angin. Betz number sebesar 0.59 merupakan angka Cp pada kondisi ideal.

3. Simulasi
Simulasi menggunakan perangkat lunak QBlade. Jika hasil simulasi belum konvergen akan diulang lagi dengan memperbaiki variabel yang ada sehingga didapatkan penyelesaian konvergen.
4. Desain bilah turbin
Dari hasil simulasi dilakukan fabrikasi bilah turbin di workshop teknik mesin.
5. Pengambilan data sudut pitch uniform
Pengambilan data dilakukan dengan dua kondisi, yang pertama dengan sudut blade secara utuh adalah sama. Hanya dirubah orientasi terhadap hub. Sudut yang dipakai adalah 0° sd 20° increment 5°
6. Pengambilan Data Sudut Pitch Variasi
Pada blade diberikan optimasi dengan twist. Sudut yang dipakai ada 3 kondisi :
 20° dekat hub sampai dengan 0° di dekat tip, 25° dekat hub sampai dengan 5° di dekat tip dan 30° dekat hub sampai dengan 10° di dekat tip
7. Validasi hasil Percobaan
Antara hasil percobaan, simulasi dan perhitungan manual divalidasi. Jika ada kesalahan dilakukan desain ulang sampai tercapai hasil yang baik.
8. Hasil dan kesimpulan
Merupakan hasil dan kesimpulan dari penelitian.



Gambar 8. Peralatan Percobaan

New Blade
Swept Area: 0.33 [m²]



Gambar 9. Desain Bilah dengan simulasi

Gambar 9 menunjukkan desain bilah yang dipakai pada simulasi maupun percobaan. Sudut pitch sepanjang bilah tidak sama tetapi diplintir pada tiga kondisi ($20^{\circ} - 0^{\circ}$) 20 derajat dekat hub 0 derajat di ujung, ($25^{\circ} - 5^{\circ}$) 25 derajat dekat hub 5 derajat di ujung, dan ($30^{\circ} - 10^{\circ}$) 30 derajat dekat hub 10 derajat di ujung.



Gambar 10 Desain Bilah

Gambar 10 merupakan desain bilah pada percobaan di laboratorium. Desain bilah disesuaikan dengan desain yang sudah dilakukan pada simulasi.

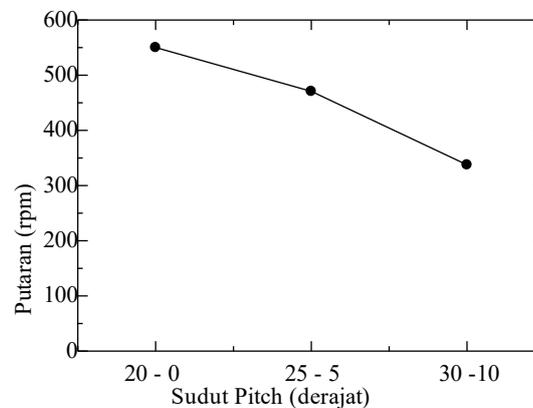
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil percobaan dapat ditabelkan sebagai berikut

Tabel 1. Data hasil Percobaan

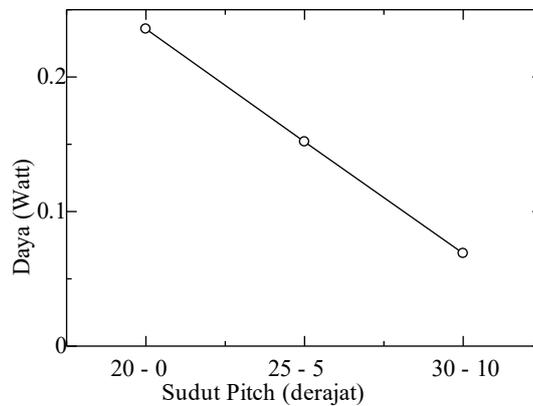
Sudut	Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Poros (rpm)	Daya Turbin (Watt)	TSR	Cp
0-20°	7	550,18	0,23570	1,6453	0,04541
5-25°	7	470,78	0,1518	1,4079	0,02925
10-30°	7	337,64	0,06885	1,0097	0,01327

Tabel 1 menunjukkan data hasil eksperimen pada tiga jenis bilah. Terlihat ada perbedaan pada tiga jenis bilah yang digunakan.



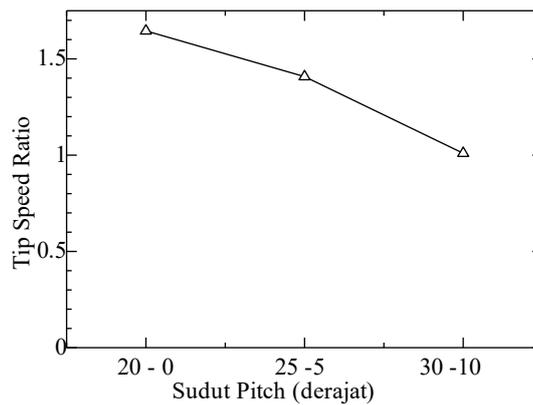
Gambar 11. Hubungan Sudut Pitch terhadap Putaran

Pada gambar 11 terlihat bahwa putaran tertinggi terjadi pada sudut ($20^0 - 0^0$) 20 derajat dekat hub 0 derajat di ujung sebesar 550,18 rpm. Kenaikan sudut pitch menurunkan putaran sudut.



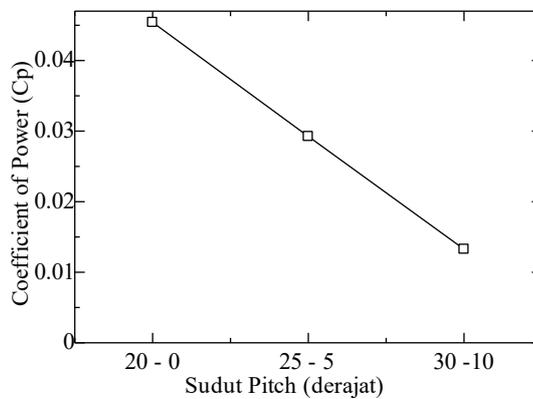
Gambar 12. Hubungan Sudut Pitch terhadap Daya

Pada gambar 12 terlihat bahwa daya tertinggi terjadi pada sudut ($20^0 - 0^0$) 20 derajat dekat hub 0 derajat di ujung sebesar 550,18 rpm. Kenaikan sudut pitch menurunkan daya sudut.



Gambar 13. Hubungan Sudut Pitch terhadap TSR

Pada gambar 13 terlihat bahwa TSR tertinggi terjadi pada sudut ($20^0 - 0^0$) 20 derajat dekat hub 0 derajat di ujung sebesar 550,18 rpm. Kenaikan sudut pitch menurunkan TSR.



Gambar 14. Hubungan Sudut Pitch terhadap Cp

Pada gambar 14 terlihat bahwa putaran tertinggi terjadi pada sudut ($20^0 - 0^0$) 20 derajat dekat hub 0 derajat di ujung sebesar 550,18 rpm. Kenaikan sudut pitch menurunkan Cp.

Dari gambar 11 – 14 memperlihatkan bahwa desain sudut pith optimum terjadi pada sudut ($20^0 - 0^0$) yaitu 20 derajat dekat hub 0 derajat di ujung. Pada sudut itu berdasarkan percobaan memiliki performa tertinggi baik pada putaran, TSR, daya turbin maupun Cp. Bilah yang dipakai pada penelitian ini menggunakan airfoil NACA 0020 yang mana performa lift dan drag bisa dilihat pada gambar 1 dan 2. Hubungan antara lift dan drag itu mempengaruhi performa turbin secara keseluruhan. Gaya sentrifugal yang terjadi pada ujung hub paling besar karena pengaruh jari jari turbin oleh karena itu sudut pitch di ujung dibuat lebih kecil agar mendapatkan resultan gaya yang sama dengan di dekat hub.

Puntiran (twisted) pada blade turbin angin sumbu horizontal sangat mempengaruhi kinerjanya dibandingkan dengan taper pada body blade. Hal ini telah diteliti pada penelitian lain dengan menggunakan CFD-BEM [19] Pada penelitian yang telah kami lakukan, performansi tertinggi ketika sudut puntir berada pada $0-20^0$. Kenaikan sudut puntiran semakin menurunkan kecepatan putar maupun daya turbin karena daerah operasi optimum Cl/Cd dari NACA 0020 terletak pada sudut $0-20^0$.

Hasil studi dengan menggunakan pendekatan ANSYS CFX dan ANSYS Fluent menunjukkan pengaruh sudut putar yang signifikan pada turbin angin sumbu horizontal ukuran kecil. [20]. Pada nilai TSR yang sesuai, efisiensi sangat dipengaruhi oleh desain turbin yang diantaranya terdapat sudut bilah.

KESIMPULAN

Sudut pitch sangat mempengaruhi performa turbin angin secara keseluruhan. Desain turbin angin dengan sudut pitch bervariasi sepanjang bilah bisa meningkatkan performa turbin dibandingkan bilah dengan sudut pitch tunggal. Semakin besar sudut pith performa turbin akan naik sampai vatas tertentu kemudian mengalami penurunan, hal ini dipengaruhi oleh jenis airfoil yang dipakai pada bilah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa performa tertinggi terjadi pada sudut pitch bervariasi $20 - 0$ atau 20 derajat di dekat hub dan 0 derajat di ujung. Pada desain ini memiliki kecepatan putar, TSR, daya dan Cp tertinggi dibandingkan dengan dua desain yang lain. Penggunaan metode variable ini sangat meningkatkan efisiensi secara signifikan dibandingkan dengan sudut seragam sepanjang blade.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih saya haturkan kepada LPPM Universitas Khairun atas pendanaan pada penelitian PKUPT Fakultas Teknik ini. Ucapan terima kasih juga saya haturkan kepada staf Laboratorium Pengujian Program Studi Teknik Mesin Universitas Khairun.

REFERENSI

- [1] L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, and A. Crespo, "Wind turbine wake aerodynamics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 39, no. 6–7, pp. 467–510, 2003, doi: 10.1016/S0376-0421(03)00078-2.
- [2] J. O. Mo and Y. H. Lee, "CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 81–92, Jan. 2012, doi: 10.1007/S12206-011-1014-7.
- [3] S. Lee, H. Kim, and S. Lee, "Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine," *Current Applied Physics*, vol. 10, no. 2 SUPPL., Mar. 2010, doi: 10.1016/J.CAP.2009.11.073.
- [4] D. A. Banjarnahor, M. Hanifan, and E. M. Budi, "Design of Hybrid Solar and Wind Energy Harvester for Fishing Boat," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Aug. 2017. doi: 10.1088/1755-1315/75/1/012007.
- [5] A. Hemami, "WIND TURBINE TECHNOLOGY." [Online]. Available: www.cengage.com/highered
- [6] "Advances in Renewable Energies and Power Technologies."
- [7] "Figure 3. Cp to TSR in different types of wind turbines [5] : Review of Recent Advances of Wind Energy : Science and Education Publishing." Accessed: Feb. 09, 2023. [Online]. Available: <http://pubs.sciepub.com/rse/8/1/3/figure/3>
- [8] H. Eftekhari, A. S. Mahdi Al-Obaidi, and S. Eftekhari, "Aerodynamic Performance of Vertical and Horizontal Axis Wind Turbines: A Comparison Review," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 65–88, 2022, doi: 10.17509/ijost.v7i1.43161.
- [9] Y. El Khchine and M. Sriti, "Tip Loss Factor Effects on Aerodynamic Performances of Horizontal Axis Wind Turbine," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 136–140. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.028.

- [10] V. A. Koehuan, R. A. Hale, and D. P. Mangesa, "Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics) Turbin Angin Sumbu Horizontal Tipe Propeler Tiga Blade Rotor Ganda Melalui Variasi Geometri," *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana*, vol. 10, no. 02, pp. 49–60, Oct. 2023, doi: 10.35508/LJTMU.V10I02.11503.
- [11] M. N. Hamlaoui, A. Bouhelal, A. Smaili, S. Khelladi, and H. Fellouah, "A New Methodology for Optimizing Hawt Rotor Blades," Jan. 2023, doi: 10.2139/SSRN.4628398.
- [12] S. Konversi *et al.*, "Simulasi Konversi Energi Kinetik Menjadi Energi Listrik Pada Kincir Angin 3 Sudu Sumbu Horizontal," *Jurnal Sains Benuanta*, vol. 2, no. 2, pp. 26–31, 2023, doi: 10.61323/JSB.V2I2.82.
- [13] K. A. Adeyeye, N. Ijumba, and J. Colton, "The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 801, no. 1, p. 012020, Jun. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/801/1/012020.
- [14] N. M. Nasab, J. Kilby, and L. Bakhtiarfard, "Effect of Number of Blades on Generating Power In Wind Turbines," *2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2019*, Nov. 2019, doi: 10.1109/AUPEC48547.2019.211880.
- [15] A. F. Sudarma, M. Kholil, S. Subekti, and I. Almahdy, "The Effect of Blade Number on Small Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Performance: An Experimental and Numerical Study," *International journal of environmental science and development*, vol. 11, no. 12, pp. 555–560, Jan. 2020, doi: 10.18178/IJESD.2020.11.12.1307.
- [16] A. Eltayesh *et al.*, "Experimental and numerical investigation of the effect of blade number on the aerodynamic performance of a small-scale horizontal axis wind turbine," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 4, pp. 3931–3944, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.02.048.
- [17] Akmal, Mastariyanto Perdana, Rahmadani Saputra, Hendriwan Fahmi, and Sulaiman, "Analisa Daya Turbin Angin Sumbu Horizontal BladeTaperless Berbahan Komposit Hybrid dengan AirfoilBlade Tipe NACA," *JURNAL REKAYASA ENERGI DAN MEKANIKA*, vol. 2, no. Volume 2 No 2, pp. 145–153, Mar. 2022.
- [18] "Tampilan Pemilihan Bilah Turbin Angin Sumbu Horizontal Model Air Foil Taperless dan Untwisted." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.jpti.journals.id/index.php/jpti/article/view/334/218>
- [19] S. Mauro, R. Lanzafame, and M. Messina, "Detailed CFD-BEM analysis about the effects of twist and taper of HAWTs on the rotational augmentation phenomenon," *Energy*, vol. 314, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2024.134158.
- [20] D. Tanovic, A. Simonovic, O. Kostic, and J. Svorcan, "The effect of blade turning angle on rotation improvement of a small horizontal axis wind turbine," *Measurement and Control (United Kingdom)*, 2025, doi: 10.1177/00202940241312659.