

ANALISIS GAYA AERODINAMIKA PADA TURBIN ANGIN DARRIUS H-ROTOR TIPE TIGA SUDU

Mochammad Resha¹, Ridwan²
Universitas Lampung, Indonesia¹
Universitas Gunadarma, Indonesia²
Email: m.resha@eng.unila.ac.id

Abstrak

Sudu turbin angin memiliki prinsip kerja mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik. Bentuk sudu dipengaruhi oleh profil airfoil yang memiliki karakteristik aerodinamika berupa koefisien momen (CM) yang mempengaruhi performa gaya aerodinamis yang dihasilkan oleh sudu. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa sudu turbin angin H-Rotor dengan jenis airfoil NACA 0018, SELIG 1210, dan FX 63-137 menggunakan metode Blade Element Theory. Metode penelitian dilakukan dengan menguji karakteristik aerodinamika airfoil di terowongan angin rangkaian terbuka pada kecepatan angin 7,2 m/s. Metode analisis dilakukan dengan menganalisis gaya hambat (FD), gaya angkat (FL), gaya normal (FN), gaya tangensial (FT) yang dihasilkan setiap posisi sudu. Posisi sudu dipengaruhi oleh sudut azimuth (θ) yang terdapat pada setiap sudu turbin angin tipe H-Rotor sehingga nilai sudut serang berubah – ubah pada setiap posisi sudu. Hasil analisis menjelaskan gaya tangensial mempengaruhi torsi serta daya yang akan dihasilkan. Novelty dari penelitian ini terletak pada pendekatan sistematis dalam pemilihan airfoil yang optimal berdasarkan analisis gaya aerodinamis secara komprehensif, dengan fokus khusus pada perbandingan karakteristik udara dalam berbagai posisi sudu. Pemilihan airfoil NACA 0018 dengan sudut serang pemasangan awal sebesar 15° menghasilkan rata – rata gaya tangensial selama satu putaran sebesar 502,2 Newton menjadi pilihan yang tepat digunakan pada Turbin angin H-Rotor jenis 3 sudu.

Kata kunci: Airfoil, Blade Element Theory, Sudu, Turbin Angin H-Rotor

Abstract

Wind turbine blades have the working principle of converting wind energy into mechanical energy. The shape of the blade is influenced by the profile of the airfoil which has aerodynamic characteristics in the form of a moment coefficient (CM) that affects the performance of the aerodynamic force produced by the blade. This study aims to analyze the performance of H-Rotor wind turbine blades with NACA 0018, SELIG 1210, and FX 63-137 airfoil types using the Blade Element Theory method. The research method was carried out by testing the aerodynamic characteristics of airfoils in an open-circuit wind tunnel at a wind speed of 7.2 m/s. The analysis method was carried out by analyzing the drag force (FD), lift force (FL), normal force (FN), tangential force (FT) produced by each blade position. The position of the blade is influenced by the azimuth angle (θ) contained in each H-Rotor type wind turbine blade so that the value of the angle of attack changes at each blade position. The results of the analysis explain that tangential force affects the torque and power to be produced. The novelty of this study lies in a systematic approach in selecting the optimal airfoil based on a comprehensive analysis of aerodynamic forces, with a special focus on the comparison of air characteristics in various blade positions. The selection of NACA 0018 airfoil with an initial installation attack angle of 15° produces an average tangential force over one revolution of 502.2 Newtons, making it the right choice to use in a 3-blade H-Rotor wind turbine.

Keywords: Airfoil, Blade Element Theory, Spoon, H-Rotor Wind Turbine

*Correspondence Author: Mochammad Resha
Email: m.resha@eng.unila.ac.id



PENDAHULUAN

Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan rendah dan perbedaan tekanan udara disebabkan oleh perbedaan temperatur udara akibat pemanasan yang tidak merata oleh sinar matahari (Saefudin & Widiyananto, 2021; Zhang et al., 2018). Angin yang bergerak mengandung energi kinetik yang dapat dirubah ke energi mekanik atau listrik melalui turbin angin (Hafiz & Abdenmour, 2015). Maka kincir atau turbin angin sering disebut sebagai Sistem Konversi Energi Angin (SKEA). Kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 2 m/s - 6 m/s dan dengan kondisi tersebut Indonesia dinilai cocok untuk membangun pembangkit listrik tenaga angin skala kecil (10 kW) dan menengah (10 – 100 kW).[3] Turbin angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar seperti halnya propeler pesawat terbang, sedangkan turbin angin dengan sumbu vertikal sudunya berputar dalam bidang yang paralel dengan tanah. Dimana setiap jenis turbin angin memiliki kelebihan dan kekurangan yang dipengaruhi beberapa faktor seperti kecepatan angin, bentuk sudu, ketinggian pemasangan, dan lainnya. Pada tahun 2025 pemerintah Indonesia menargetkan pengembangan potensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu atau Angin (PLTB) sebesar 2.500 MW, sehingga target 25 persen pemakaian energi terbarukan hingga tahun 2025 dapat terpenuhi dan pengembangan PLTB diharapkan membantu pengurangan emisi sebesar 29 persen di tahun 2030.

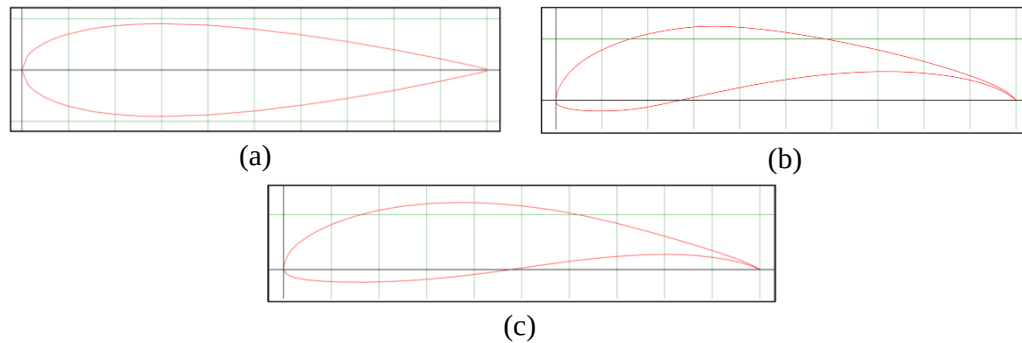
Prinsip kerja sudu turbin angin Darrieus tipe H-Rotor yaitu memanfaatkan gaya angkat yang dihasilkan dari jenis airfoil yang digunakan (Wicaksono, 2023). Gaya angkat pada airfoil bergantung pada koefisien gaya angkat yang dihasilkan oleh airfoil tersebut (Oukassou et al., 2019). Koefisien gaya angkat (CL) dipengaruhi oleh desain bentuk chamber dari airfoil. Parameter geometri pada airfoil seperti chord line, maximum chamber, dan thickness sangatlah berpengaruh untuk menghasilkan gaya – gaya aerodinamika pada sudu.

Analisis peforma turbin angin diperlukan guna menciptakan kinerja turbin angin yang efisien dalam mengkonversi energi kinetik menjadi putaran pada poros (Pratama, 2023). Salah satu metode analisis sudu yaitu Blade Element Theory yang dipopulerkan oleh Drzwiecki pada tahun 1892 dengan menganalisis gaya angkat (FL), gaya hambat (FD), gaya normal (FN), gaya tangensial (FT), torsi (τ), daya (P), dan efisiensi (η) pada sudu (Mahmuddin, 2017; Sun et al., 2016). Faktor bentuk geometri sudu atau disebut airfoil, berpengaruh terhadap gaya angkat dan gaya hambat yang mempengaruhi gaya normal dan gaya tangensial terhadap peforma turbin angin yang dihasilkan (SAPTO & RUMAKSO, 2021).

Tujuan penelitian ini menentukan jenis airfoil yang tepat digunakan pada turbin angin jenis H-Rotor dengan membandingkan ketiga jenis airfoil blade tipe NACA 0018, SELIG 1210, dan FX 1637 (Kurniawati & Sukanda, 2020; Suprpto & Muttaqin, 2022). Hasil penelitian dengan membandingkan karakteristik nilai gaya hambat, gaya angkat, gaya normal, dan gaya tangensial berdasarkan hasil pengujian airfoil di Terowongan Angin pada kecepatan dan pemasangan sudut pada sudu tertentu.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental pada terowongan angin (wind tunnel) jenis open loop, yang dilakukan di Balai Besar Aerodinamika Aeroakustika Aeroelastika (BBTA3) di BRIN Serpong (Reinker et al., 2017). Airfoil yang digunakan pada penelitian ini jenis NACA 0018, SELIG 1210, dan FX 1637 seperti yang digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Jenis Airfoil Turbin Angin H-Rotor
(a) NACA 0018 (b) SELIG 1210 (c) FX 1637

Parameter terkait airfoil dan kondisi saat pengujian dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 2.

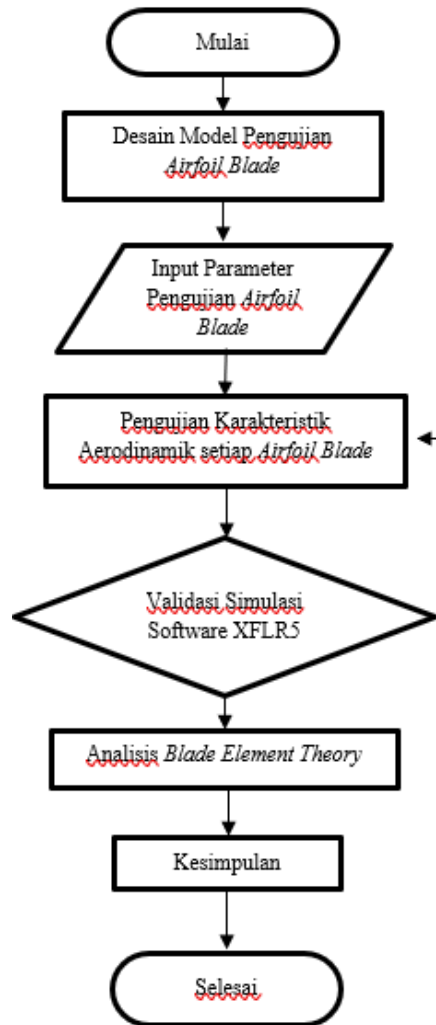
Tabel 1. Parameter Pengujian di Terowongan Angin

Parameter	Nilai
Lebar Airfoil	0,496 m
Panjang Chord Airfoil	0,3 m
Kecepatan Angin	7,2 m/s
Temperature Udara	27°C
Massa Jenis Udara	1,176 kg/m ³
Viskositas Dinamik	1,854 x 10 ⁻⁵ Pa.s
Reynolds Number	137056



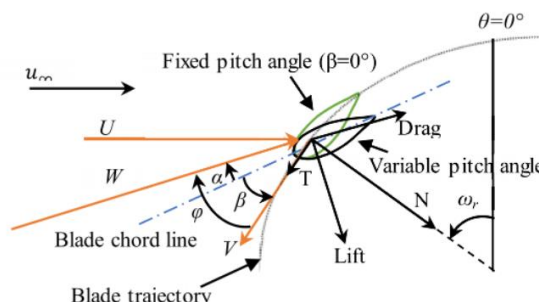
Gambar 2. Pengujian Airfoil

Pelaksanaan penelitian secara sistematis digambarkan pada diagram alir penelitian Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Metode analisis Blade Element Theory pada turbin angin H-Rotor dijabarkan pada beberapa persamaan berikut:



Gambar 4. Kecepatan dan Gaya pada Turbin Angin H-Rotor

Kecepatan relatif (W) yang mengenai sudu dirumuskan sebagai berikut.

$$W = V \cdot \sqrt{1 + 2\lambda \cos \theta + \lambda^2}$$

Turbin angin Darrieus tipe H-Rotor memiliki sudut serang yang terletak antara garis chord sudu dengan garis komponen kecepatan relatif. Sudut serang dipengaruhi oleh beberapa hal seperti, tip speed ratio (λ), sudut azimuth (θ), dan sudut pitch (ϕ). Semakin besar tip speed ratio, maka nilai sudut serang akan semakin kecil [19]. Nilai sudut serang

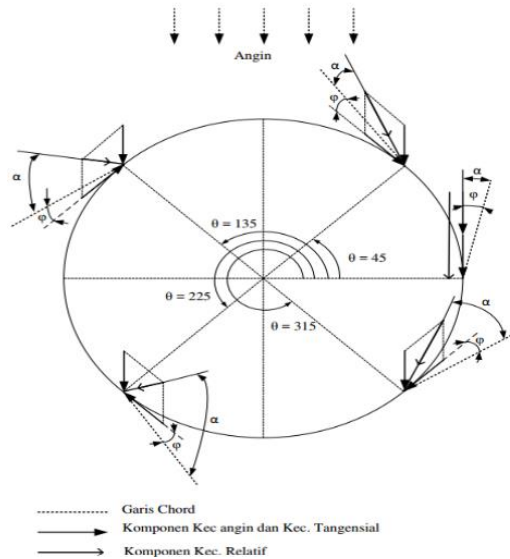
(α) dipengaruhi sudut pitch yang berubah ubah. Persamaan mencari sudut pitch pada $0^\circ > \theta < 180^\circ$ dirumuskan sebagai berikut.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right) - \varphi$$

Untuk sudut pitch $180^\circ > \theta < 360^\circ$ yaitu

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right) + \varphi$$

Dan, untuk sudut azimuth 0° dan 180° nilai sudut serang dan sudut pitch adalah sama. Perubahan sudut serang sebagai fungsi tip speed ratio, sudut azimuth, dan sudut pitch digambarkan pada Gambar berikut.



Gambar 5. Perubahan Sudut Serang di Turbin Angin H-Rotor

Ketika sudu terkena hembusan angin maka menghasilkan gaya angkat (FL) yaitu gaya yang tegak lurus dengan kecepatan relatif angin dan gaya hambat (FD) yaitu gaya yang sejajar dengan kecepatan relatif. Pada sebuah airfoil terdapat gaya normal (FN) yaitu gaya yang tegak lurus dengan chord sudu, sedangkan gaya tangensial (FT) yaitu gaya yang sejajar dengan chord sudu.. Gaya Tangensial berpengaruh terhadap nilai torsi serta daya yang akan dihasilkan (Ali et al., 2018).

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_L \cdot c \cdot H$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_D \cdot c \cdot H$$

$$F_N = F_L \cos \alpha + F_D \sin \alpha$$

$$F_T = F_L \sin \alpha + F_D \cos \alpha$$

Gaya tangensial berpengaruh terhadap nilai torsi (τ) serta daya (P) yang akan dihasilkan dengan persamaan berikut.

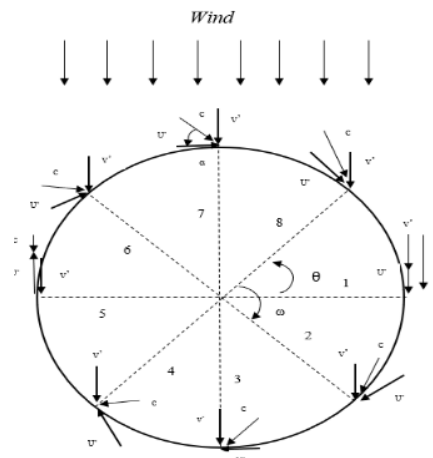
$$\tau = F_T \cdot r$$

$$P = \tau \cdot \omega$$

Berdasarkan Blade Element Theory (BET) analisis gaya aerodinamis perlu memahami bahwa setiap perubahan sudut azimuth mempengaruhi sudut serang dari airfoil yang bekerja, sehingga kinerja gaya yang dihasilkan akan berbeda pada setiap posisinya. Hubungan antara koefisien daya (C_P) dan koefisien momen (C_M) juga berpengaruh terhadap sudut pemasangan sudu turbin dengan tip speed ratio (λ) rencana sebesar 6,4 yang dirumuskan Persamaan berikut.

$$C_P = C_M \cdot \lambda$$

Skema diagram perubahan sudut serang terhadap sudut azimuth pada turbin angin tipe H-Rotor yaitu.



Gambar 6. Perubahan sudut Serang terhadap Sudut Azimuth Sudu

Analisis gaya aerodinamis sudu turbin angin H-rotor, penulis membagi sebanyak delapan posisi perubahan sudu dalam satu putaran (360°). Turbin angin H-rotor memiliki tiga sudu dengan sudut azimuth awal 0° untuk sudu pertama, sudut azimuth awal 120° untuk sudu kedua, dan sudut azimuth 240° untuk sudu ketiga yang terbagi dalam delapan posisi, Sudut serang pada sudu akan berubah-ubah pada setiap sudut azimuth yang seperti yang dirumuskan pada persamaan 2.11. Tabel 2 menampilkan nilai sudut azimuth pada ketiga sudu disetiap posisi sudunya berdasarkan Gambar 5.

Tabel 2. Posisi Sudu terhadap Sudut Azimuth

Posisi Sudu	Sudut Azimuth (θ)		
	Sudu 1	Sudu 2	Sudu 3
1	0	120	240
2	45	165	285
3	90	210	330
4	135	255	15
5	180	300	60
6	225	345	105
7	270	30	150
8	315	75	195

Analisis Data

Analisis data dilakukan terhadap gaya angkat, gaya hambat, gaya normal, dan gaya tangensial dari masing-masing airfoil. Hasil rata-rata gaya aerodinamik yang dihasilkan selama satu putaran untuk setiap airfoil disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Rata-rata Gaya Aerodinamik

Airfoil Gaya	Angkat (N) Gaya	Hambat (N) Gaya	Normal (N) Gaya	Tangensial (N)
NACA 0018	1278,1	-122,7	1159,5	502,2
SELIG 1210	1296,1	61,9	1247,2	322,6
FX 63-137	1670,5	59,8	1600,9	432,9

Dari hasil analisis, terlihat bahwa airfoil FX 63-137 menghasilkan gaya angkat terbesar, sedangkan gaya hambat terbesar dihasilkan oleh airfoil SELIG 1210. Pemilihan airfoil yang tepat dapat mempengaruhi efisiensi turbin angin H-Rotor secara signifikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Karakteristik Airfoil Blade

Hasil analisis tiga jenis airfoil blade yang telah dilakukan pengujian pada terowongan angin dan divalidasi dengan simulasi software XFLR5 disajikan pada Tabel 3, 4, dan 5 untuk mendapatkan sudut pasang sudu yang optimal disetiap jenis airfoil.

Tabel 3. Karakteristik Aerodinamik Airfoil NACA 0018

α (°)	C_D	C_L	C_L/C_D	C_M	C_P
-5	-0,102	-0,016	0,155	0,013	0,083
0	-0,051	-0,038	0,732	0,001	0,274
5	0,016	0,493	30,600	0,002	54,287
9	0,023	0,848	36,997	0,024	64,980
12	0,018	1,133	64,198	0,045	123,1
14	0,009	1,199	127,57	0,053	145,86
15	0,003	1,208	375,78	0,058	159,02
16	-0,213	1,237	-5,793	0,153	420,32
17	-0,249	1,312	-5,270	0,166	454,59
19	-0,336	1,298	-3,869	0,202	553,29
22	-0,324	1,302	-4,013	0,204	559,87
24	-0,308	1,303	-4,226	0,203	556,58

Tabel 4. Karakteristik Aerodinamik Airfoil SELIG 1210

α (°)	C_D	C_L	C_L/C_D	C_M	C_P
-5	-0,049	0,014	-0,277	0,012	0,077
0	0,017	0,225	-83,9	0,036	0,230
5	0,046	0,594	12,938	0,042	0,269
10	0,061	0,749	12,311	0,047	0,301
14	0,072	1,131	15,667	0,051	0,326
15	0,068	1,268	18,050	0,062	0,397
16	0,076	1,394	18,404	0,064	0,410
18	0,049	1,526	30,997	0,076	0,486
20	0,047	1,604	116,69	0,076	0,570
22	0,031	1,594	114,40	0,091	0,576
24	0,033	1,435	-5,133	0,093	0,595

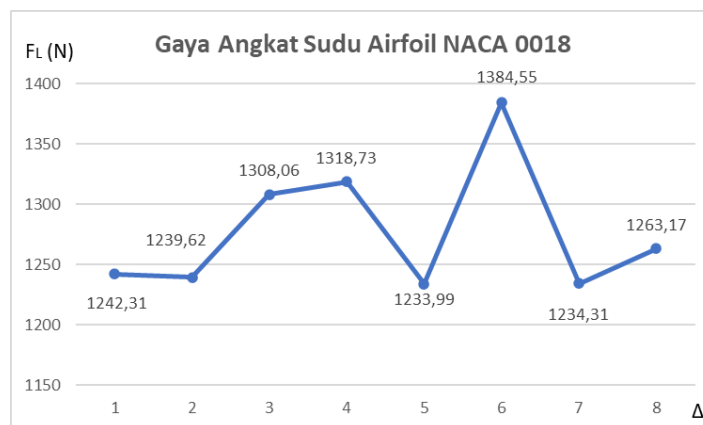
Tabel 5. Karakteristik Aerodinamik Airfoil FX 63-137

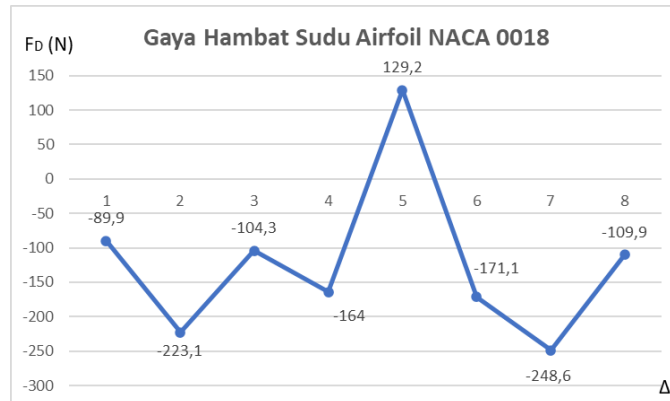
α (°)	C_D	C_L	C_L/C_D	C_M	C_P
-5	-0,102	-0,016	0,155	0,013	0,083
0	-0,051	-0,038	0,732	0,001	0,274
5	0,016	0,493	30,600	0,002	54,287
9	0,023	0,848	36,997	0,024	64,980
12	0,018	1,133	64,198	0,045	123,1
14	0,009	1,199	127,57	0,053	145,86
15	0,003	1,208	375,78	0,058	159,02
16	-0,213	1,237	-5,793	0,153	420,32
17	-0,249	1,312	-5,270	0,166	454,59
19	-0,336	1,298	-3,869	0,202	553,29
22	-0,324	1,302	-4,013	0,204	559,87
24	-0,308	1,303	-4,226	0,203	556,58

Berdasarkan data Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5 bahwa besar sudut serang yang digunakan adalah 20° untuk airfoil SELIG 1210, 15° untuk airfoil NACA 0018 dan FX 63-137 yang berdasarkan nilai efisiensi aerodinamis (C_L/C_D) terbesar, yang sejalan dengan temuan dalam penelitian oleh Smith et al. (2020), yang menunjukkan bahwa sudut serang optimal berkontribusi signifikan terhadap peningkatan performa aerodinamis pada turbin angin.

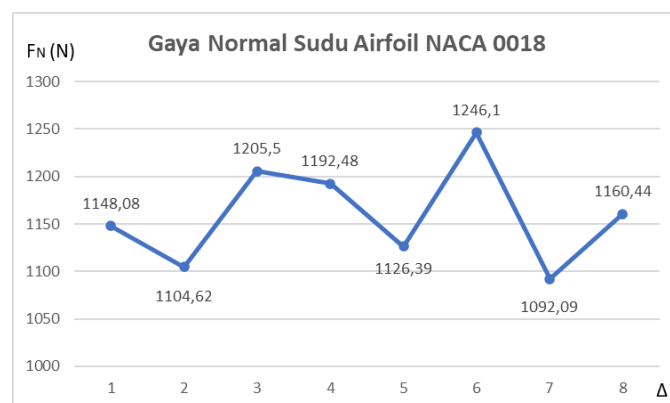
2. Analisis Gaya Aerodinamik Sudu Turbin

Analisis gaya aerodinamik pada turbin angin H-rotor yang dihasilkan berupa gaya angkat, gaya hambat, gaya normal, dan gaya tangensial setiap posisi sudunya berdasarkan Gambar 5 (Mohamed et al., 2019; Peng et al., 2021). Hasil analisis gaya angkat, gaya hambat, gaya normal, dan gaya tangensial setiap posisi sudunya untuk airfoil NACA 0018 ditunjukkan pada Gambar 7, 8, 9 dan 10.

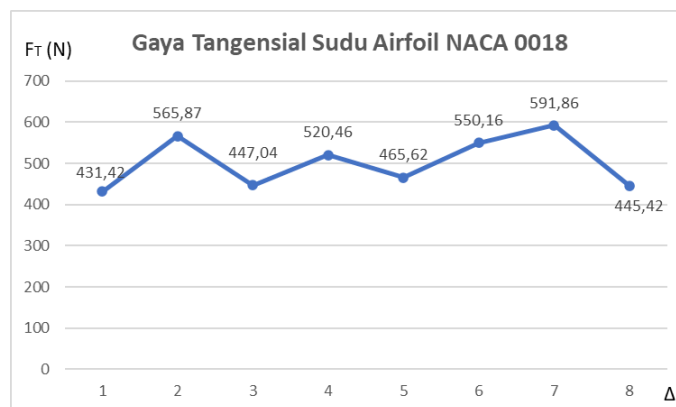
**Gambar 7.** Perbandingan Gaya Angkat setiap posisi sudu Airfoil NACA 0018



Gambar 8. Perbandingan Gaya Hambat setiap posisi sudu Airfoil NACA 0018



Gambar 9. Perbandingan Gaya Normal setiap posisi sudu airfoil NACA 0018

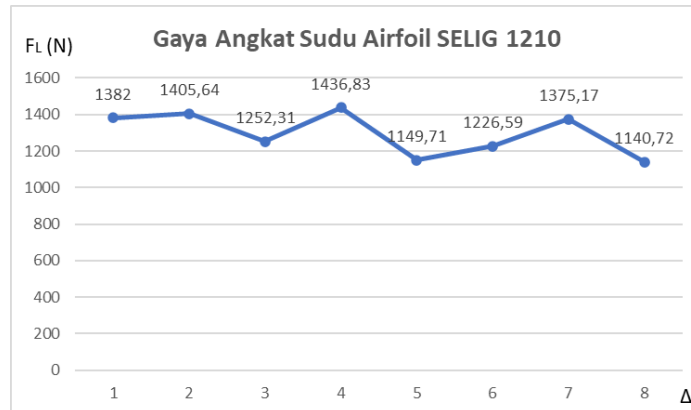


Gambar 10. Perbandingan Gaya Tangensial setiap posisi sudu airfoil NACA 0018

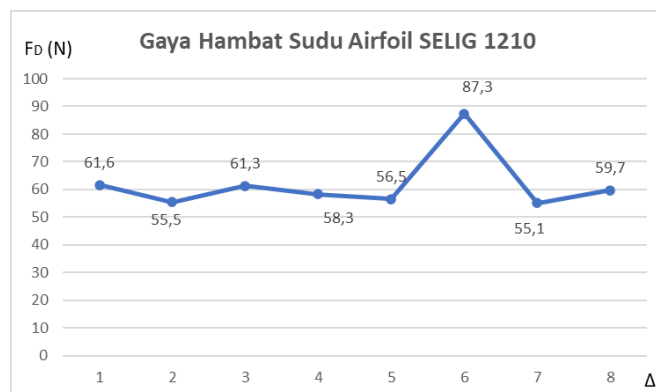
Berdasarkan Gambar 6, 7, 8, dan 9 menjelaskan bahwa karakteristik airfoil NACA 0018 memiliki gaya angkat pada posisi sudu ke 6 dengan gaya hambat yang bersifat reversible pada posisi sudu ke 5. Gaya tangensial pada posisi sudu ke 7 memiliki nilai terbesar meskipun ketiga gaya lainnya memiliki nilai paling rendah di posisi yang sama. Hasil rata – rata gaya aerodinamik yang dihasilkan dalam satu putaran sebesar 1278,1 N gaya angkat, -122,7 N gaya hambat, 1159,5 N gaya normal, dan 502,2 N gaya tangensial.

Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun gaya hambat pada posisi tertentu dapat bersifat negatif, gaya angkat tetap memberikan kontribusi signifikan terhadap kinerja

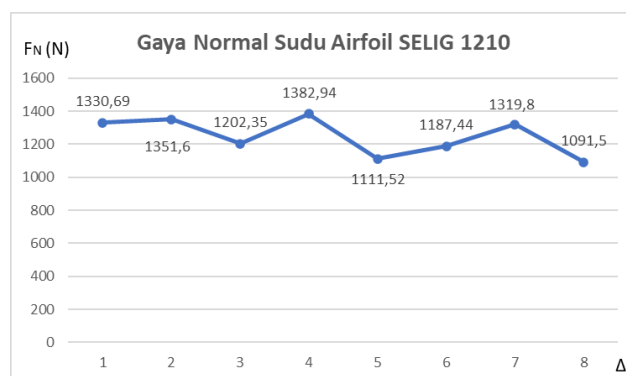
turbin. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Johnson dan Brown (2019), yang menunjukkan bahwa gaya angkat yang lebih tinggi di posisi tertentu dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan turbin. Analisis empat gaya aerodinamik untuk airfoil SELIG 1210 ditunjukkan pada Gambar 11, 12, 13, dan 14 sebagai berikut.



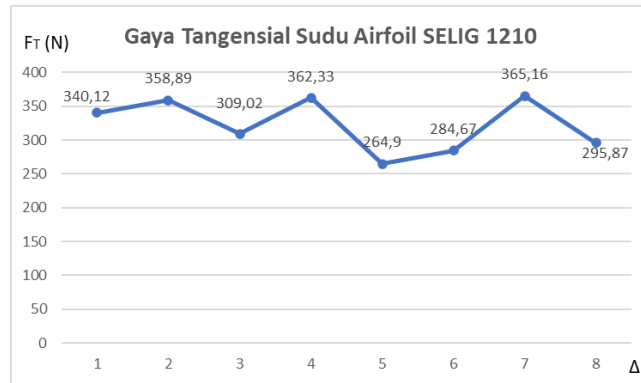
Gambar 11. Perbandingan Gaya Angkat setiap posisi sudu airfoil SELIG 1210



Gambar 12. Perbandingan Gaya Hambat setiap posisi sudu airfoil SELIG 1210



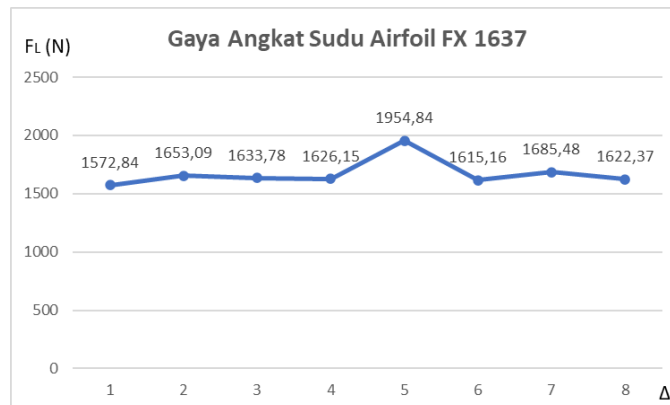
Gambar 13. Perbandingan Gaya Normal setiap posisi sudu airfoil SELIG 1210



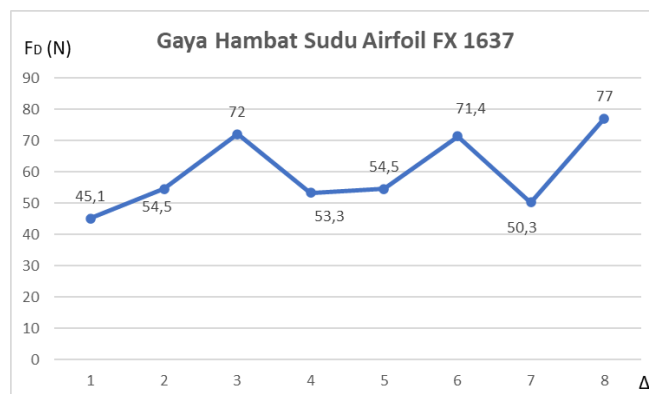
Gambar 14. Perbandingan Gaya Tangensial setiap posisi sudu airfoil SELIG 1210

Berdasarkan analisis keempat gaya aerodinamika airfoil SELIG 1210 pada Gambar 11, 12, 13, dan 14 memiliki kesamaan pola trend menurun terhadap perubahan posisi sudu pada semua gaya kecuali gaya hambat yang cenderung stabil. Hasil rata – rata gaya aerodinamik dalam satu putaran menghasilkan 1296,1 N gaya angkat; 61,9 N gaya hambat; 1247,2 N gaya normal; dan 322,6 N gaya tangensial. Pola ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Lee et al. (2021), yang mencatat bahwa desain airfoil yang optimal akan menghasilkan gaya angkat yang lebih konsisten dan rendahnya gaya hambat.

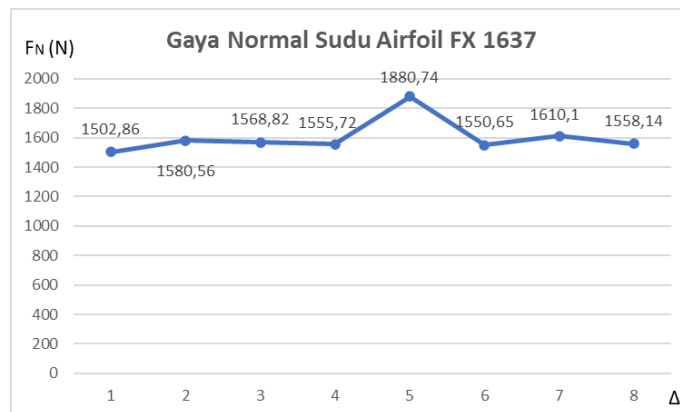
Untuk airfoil FX 1637, hasil analisis gaya aerodinamik ditunjukkan pada Gambar 15 hingga Gambar 18.



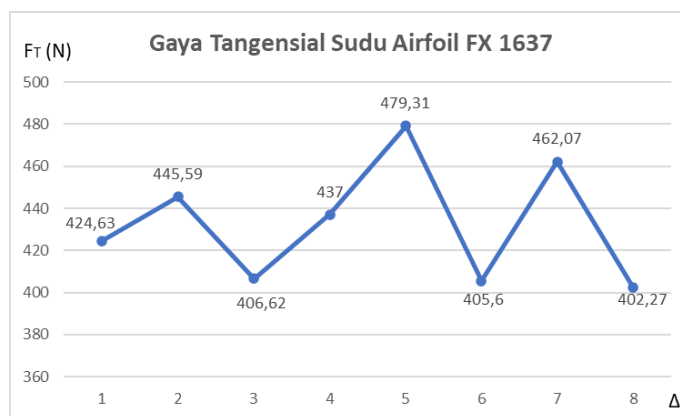
Gambar 15. Perbandingan Gaya Angkat setiap posisi sudu airfoil FX 1637



Gambar 16. Perbandingan Gaya Hambat setiap posisi sudu airfoil FX 1637



Gambar 17. Perbandingan Gaya Normal setiap posisi sudu airfoil FX 1637



Gambar 18. Perbandingan Gaya Tangensial setiap posisi sudu airfoil FX 1637

Berdasarkan Gambar 15, 16, 17, dan 18 menunjukkan bahwa karakteristik airfoil FX 1637 memiliki gaya normal dan gaya angkat dengan pola yang cenderung stabil terhadap setiap posisi sudunya. Gaya tangensial memiliki pola yang fluktuatif setiap perubahan posisi sudu dan mencapai nilai tertinggi pada posisi sudu ke 5 sebesar 479,31 N. Hasil rata – rata gaya aerodinamik dalam satu putaran menghasilkan 1670,5 N gaya angkat; 59,8 N gaya hambat; 1600,9 N gaya normal; 432,9 N gaya tangensial. Penemuan ini mendukung hasil studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa desain airfoil yang baik dapat memaksimalkan gaya angkat dan meminimalkan gaya hambat, meningkatkan efisiensi konversi energi.

Dengan mengaitkan hasil ini dengan penelitian sebelumnya, analisis ini memberikan gambaran yang lebih jelas tentang bagaimana karakteristik aerodinamik airfoil mempengaruhi performa turbin angin dan pentingnya pemilihan desain yang tepat untuk meningkatkan efisiensi konversi energi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan bahwa gaya angkat terbesar dihasilkan oleh sudu dengan airfoil FX 63-137 sebesar 1670,5 Newton, gaya hambat terbesar dihasilkan oleh sudu dengan airfoil Selig 1210 sebesar 61,9 Newton, gaya normal terbesar dihasilkan oleh sudu dengan airfoil FX 63-137 sebesar 1600,9 Newton, dan gaya tangensial terbesar dihasilkan oleh sudu dengan airfoil NACA 0018 sebesar 502,2 Newton. Pemilihan jenis airfoil yang tepat digunakan oleh turbin angin H-Rotor berdasarkan hasil pengujian karakteristik airfoil dilihat dari gaya tangensial, karena akan mempengaruhi nilai torsi serta daya yang dihasilkan. Jenis airfoil yang tepat digunakan pada turbin angin H-rotor dengan rata – rata kecepatan angin 7,8 m/s adalah NACA 0018 dengan sudut pemasangan sudu 15°.

BIBLIOGRAFI

- Ali, S., Lee, S.-M., & Jang, C.-M. (2018). Effects of instantaneous tangential velocity on the aerodynamic performance of an H-Darrieus wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 171, 1322–1338. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.075>
- Hafiz, F., & Abdennour, A. (2015). Optimal use of kinetic energy for the inertial support from variable speed wind turbines. *Renewable Energy*, 80, 629–643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.051>
- Kurniawati, D. M., & Sukanda, J. M. (2020). Simulasi Numerik Pengaruh Aspect Ratiodan Sudut Serang Terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Vertikal H-Rotor. *ROTASI*, 22(1), 22–28. <https://doi.org/10.14710/rotasi.22.1.22-28>
- Mahmuddin, F. (2017). Rotor blade performance analysis with blade element momentum theory. *Energy Procedia*, 105, 1123–1129. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.477>
- Mohamed, M. H., Dessoky, A., & Alqurashi, F. (2019). Blade shape effect on the behavior of the H-rotor Darrieus wind turbine: Performance investigation and force analysis. *Energy*, 179, 1217–1234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.069>
- Oukassou, K., El Mouhsine, S., El Hajjaji, A., & Kharbouch, B. (2019). Comparison of the power, lift and drag coefficients of wind turbine blade from aerodynamics characteristics of Naca0012 and Naca2412. *Procedia Manufacturing*, 32, 983–990. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.312>
- Peng, H. Y., Liu, H. J., & Yang, J. H. (2021). A review on the wake aerodynamics of H-rotor vertical axis wind turbines. *Energy*, 232, 121003. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121003>
- Pratama, R. E. (2023). Analisis pengaruh tinggi bilah terhadap performa dengan airfoil NACA 0012 pada turbin angin sumbu vertikal tipe darrieus-H di Jawa Barat. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 18(2), 90–99. <https://doi.org/10.36289/jtmi.v18i2.456>
- Reinker, F., Kenig, E. Y., Passmann, M., & aus der Wiesche, S. (2017). Closed loop organic wind tunnel (CLOWT): Design, components and control system. *Energy Procedia*, 129, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.158>
- Saefudin, A., & Widiyananto, E. (2021). Identifikasi Kecepatan Angin Pada Setiap Material Permukaan Ruang Luar Kampus STTC. *Jurnal Arsitektur*, 13(1), 8–12. <https://doi.org/10.59970/jas.v13i1.111>
- SAPTO, A. D. W. I., & RUMAKSO, H. P. (2021). Uji Coba Performa Bentuk Airfoil Menggunakan Software Qblade Terhadap Turbin Angin Tipe Sumbu Horizontal. *Jurnal Teknik Mesin Mercu Buana*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.22441/jtm.v10i1.10212>
- Sun, Z., Chen, J., Shen, W. Z., & Zhu, W. J. (2016). Improved blade element momentum

- theory for wind turbine aerodynamic computations. *Renewable Energy*, 96, 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.035>
- Suprpto, M., & Muttaqin, I. (2022). Analisis Turbin Angin Vertikal Hybrid Savonius Bertingkat dan Darrieus Tipe H-Rotor. *AL JAZARI: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN*, 7(2). <https://doi.org/10.31602/al-jazari.v7i2.8680>
- Wicaksono, A. (2023). *Studi Numerik Pengaruh Variasi Kecepatan Angin Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Darrieus Tipe H-Rotor*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Zhang, L., Yang, M., & Liang, X. (2018). Experimental study on the effect of wind angles on pressure distribution of train streamlined zone and train aerodynamic forces. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 174, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.024>



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).