

ANALISIS SUDUT SERANG TERHADAP KARAKTERISTIK AERODINAMIKA PADA BILAH 4412 RPM RENDAH DENGAN METODE CFD 6DOF

Danang Febriyanto ^{*1}, Hangga Wicaksono², Bayu Pranoto³, Mochamad Muzaki⁴

^{1,2,3,4} (Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang)

^{*1} danangfebriyanto96@gmail.com

² wicaksonohangga@polinema.ac.id

³ bayupranoto@polinema.ac.id

⁴ mochamad.muzaki@gmail.com

Abstrak— Kebutuhan energi di masa depan merupakan salah satu dari banyak masalah yang selalu menjadi perhatian oleh semua negara, termasuk Indonesia. Pada saat ini pembangkit listrik masih banyak menggunakan bahan bakar batu bara, dimana penggunaan batu bara lama kelamaan pasti habis, sehingga perlu mencari energi alternatif, salah satunya energi angin. Implementasi untuk pemanfaatan energi angin salah satunya menggunakan turbin angin. Turbin angin adalah alat yang dapat merubah energi kinetik pada angin menjadi energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui generator. Metode analisa pada penelitian kali ini menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, *Qblade*, dan pengujian validasi eksperimental menggunakan *wind tunnel*. Jenis airfoil yang disimulasikan terdiri dari 3 jenis yaitu, NACA 4412, NACA 4415, dan FX-60 100 (126). Hasil simulasi menunjukkan bahwa, airfoil paling optimal adalah NACA 4412 dengan sudut serang 25° dan kecepatan angin 8 m/s dapat menghasilkan torsi sebesar 3.55503 Nm, tekanan sebesar 45 Pa, kecepatan tangensial 55,495 m/s, dan kecepatan putar 529.94 rpm, sedangkan hasil simulasi terkecil terdapat pada airfoil FX-60 100 (126) dengan sudut serang 15° dan kecepatan angin yang sama yaitu 8m/s dapat menghasilkan torsi sebesar 1.60390 Nm, tekanan sebesar 40 Pa, kecepatan tangensial sebesar 9.06592 m/s, dan kecepatan putar 108.2164 rpm. Pada hasil pengujian eksperimental turbin angin dimana turbin angin yang dipakai menggunakan geometri dari NACA 4412 menunjukkan bahwa sudut serang 25° dan kecepatan angin 8m/s menghasilkan daya listrik dan rpm yang besar dengan nilai berturut-turut 7.98 Watt dan 482.2 rpm.

Kata Kunci— Aerodinamika, Airfoil, Sudut Serang

Abstract— Future energy needs are one of the many problems that are always of concern to all countries, including Indonesia. At this time the power plant still uses a lot of coal fuel, where the use of coal must run out over time, so it is necessary to look for alternative energy, one of which is wind energy. Wind turbines are devices that can convert kinetic energy in the wind into mechanical energy which is then converted into electrical energy through a generator. The analysis method in this research uses *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, *Qblade*, and experimental validation testing using a *wind tunnel*. The simulated airfoil types consist of 3 types, namely, NACA 4412, NACA 4415, and FX-60 100 (126). The simulation results show that, the most optimal airfoil is NACA 4412 with an angle of attack of 25° and a wind speed of 8 m/s can produce a torque of 3.55503 Nm, a pressure of 45 Pa, a tangential velocity of 55.495 m/s, and a rotational speed of 529.94 rpm, while the smallest simulation results are on the FX-60 100 (126) airfoil with an angle of attack of 15° and the same wind speed of 8m/s can produce a torque of 1.60390 Nm, a pressure of 40 Pa, a tangential velocity of 9.06592 m/s, and a rotational speed of 108.2164 rpm. The results of experimental testing of wind turbines where the wind turbine used uses the geometry of NACA 4412 show that an angle of attack of 25° and a wind speed of 8m / s produces a large electrical power and rpm with a value of 7.98 Watt and 482.2 rpm respectively.

Keywords: Aerodynamics, Airfoil, Angle of attack

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di masa depan merupakan salah satu dari banyak masalah yang selalu menjadi perhatian oleh semua negara, termasuk Indonesia [1]. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan ekonomi dan pertumbuhan penduduk, maka kebutuhan akan energi akan terus meningkat. Salah satu sumber energi terbarukan yang semakin banyak digunakan adalah energi angin [2]. Turbin angin adalah alat yang dapat merubah energi kinetik pada angin menjadi energi mekanik

yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui generator[3]. Pada turbin angin terdapat dua jenis turbin yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu horizontal adalah jenis turbin angin yang paling umum digunakan saat ini. Turbin angin sumbu horizontal memiliki rotor yang berputar pada sumbu horizontal, dengan *blades* yang berputar seperti layaknya kipas dan turbin angin sumbu horizontal dapat mencapai efisiensi tinggi dalam mengubah energi angin menjadi energi listrik dikarenakan bentuk sudu yang bergerak sejajar terhadap arah angin sehingga

semua *blades* atau sudu dapat menangkap energi kinetik dari angin secara sempurna [4]. Kekurangan dari turbin angin sumbu horizontal adalah penggunaannya yang masih memanfaatkan kecepatan angin yang tinggi, sedangkan di Indonesia sendiri mempunyai potensi kecepatan angin yang rendah yaitu sekitar 4-8 m/s [5]. Desain geometri dari NACA 4412 dapat mempengaruhi nilai torsi, daya, dan TSR yang dihasilkan oleh turbin angin[6].

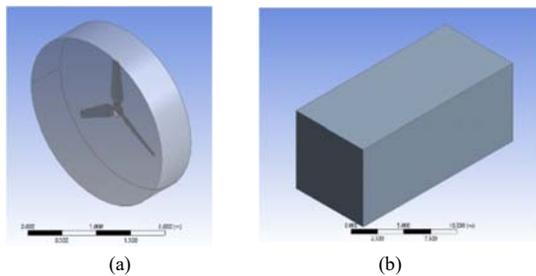
Penggunaan bilah dengan material pipa PVC sudut serang 15⁰ dan 30⁰ dapat meningkatkan torsi hingga 200%[7]. Hal ini menunjukkan peranan dari sudut serang yang cukup signifikan pada aplikasi turbin angin horizontal. Dengan memaksimalkan torsi yang didapat pada zona sudu/bilah maka kekuatan dari material bilah juga perlu dipertimbangkan [8]. Kekurangan yang lain adalah biaya instalasi yang mahal, serta kurangnya produsen manufaktur yang memproduksi jenis turbin angin sumbu horizontal dan penerapannya yang kurang cocok di potensi kecepatan angin di Indonesia. Maka dari itu perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut terhadap optimasi kinerja turbin angin sumbu horizontal yang dapat menyelesaikan permasalahan yang ada. Oleh karena itu, penelitian ini berkaitan dengan salah satu komponen turbin angin sumbu horizontal yaitu sudu atau bilah. Penelitian ini akan membahas tentang “Pengaruh jenis *airfoil* dan variasi sudut serang terhadap karakteristik aerodinamika pada turbin angin konvensional pada kecepatan angin rendah”.

METODE

Metode Penelitian yang digunakan adalah simulasi dan eksperimental, dimana dari hasil simulasi menggunakan software ANSYS CFD (*Computational Fluid Dynamics*) menggunakan 6DOF metode didapatkan airfoil optimum yang kemudian dirancang menjadi bilah turbin angin dan dilakukan pengujian eksperimental untuk validasi. Metode 6DOF pada artikel ini menggunakan metode aliran fluida *k-epsilon realizable turbulence model* dan time step discretization memakai second order, kemudian untuk pengumpulan data berupa kecepatan tangensial (rad/s) [9]. Peningkatan dari sudut serang dapat mempengaruhi gaya angkat dan gaya hambat turbin angin[10]. Pengujian eksperimental dilakukan di lab. Wind tunnel Politeknik Negeri Malang.

1. Langkah-langkah Simulasi 6DOF

a. *Import* Geometri Turbin Angin



Gbr 1 (a) *Inner* Turbin (b) *Outer* Turbin

b. *Setting Mesh*



(a) (b)

Gbr 2 (a) *Mesh Condition*, (b) *Setting Mesh* Pada Turbin Angin

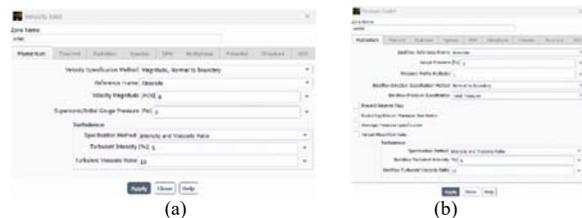
c. *Setup Setting Using 6DOF Method*



(a) (b)

Gbr 3 (a) *Setup Turbin* (b) *6DOF Properties*

d. *Boundary Condition*



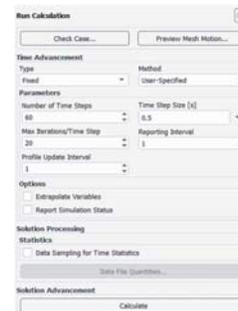
(a) (b)

Gbr 4 (a) *inlet* (b) *Outlet* (c) *Wall*

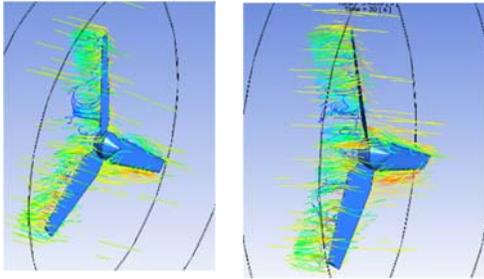


(c)

e. *Run Calculation*



Gbr 5 *Run Calculation*

d. *Result*

Gbr 6 Result of Simulation

2. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2023 sampai bulan Juni 2023. Tempat penelitian dilaksanakan di Lab. *Wind Tunnel* Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang.

3. Variabel Penelitian

a. Variabel bebas

Variasi sudut serang (15° , 20° , 25°), variasi airfoil yaitu, NACA 4412, NACA 4415, NACA FX-60 100 (126).

b. Variabel terkontrol

Dimensi rotor dan jumlah rotor yang digunakan pada turbin angin, dan kecepatan angin 8 m/s.

c. Variabel terikat

Karakteristik aerodinamika (Kecepatan tangensial, Torsi, rpm, voltase, arus, dan daya).

4. Alat dan Bahan**A. Alat Pendukung Uji Simulasi**

1. Software Ansys 19 R3

- Processor : AMD Ryzen 5 5600H Series Processor 3.30 GHz
- RAM : 8 GB
- Operating System : Windows 10 Pro 64-bit

2. Fusion 360 Student License

- Processor : AMD Ryzen 5 5600H Series Processor 3.30 GHz
- RAM : 8 GB
- Operating System : Windows 10 Pro 64-bit

3. Qblade

- Processor : AMD Ryzen 5 5600H Series Processor 3.30 GHz
- RAM : 8 GB
- Operating System : Windows 10 Pro 64-bit

B. Alat Pendukung Uji Eksperimen

- | | |
|---------------------|-----------------------|
| 1. Gerinda Tangan | 7. Anemometer |
| 2. Bor Tangan | 8. Tachometer |
| 3. Mesin Las | 9. Avometer |
| 4. Penggaris Sudut | 10. Kunci Pas Ring |
| 5. Penggaris 100 cm | 11. Kunci L |
| 6. Wind Tunnel | 12. Timbangan Digital |

Bahan

1. Serat Fiber
2. Katalis
3. Resin

4. Rangka Kayu

Metode Pengambilan Data**a. Metode Simulasi**

1. Menyiapkan laptop untuk simulasi
2. Menginstalasi software Qblade, Fusion 360 dan ANSYS 2023 student license yang akan digunakan untuk proses desain dan simulasi.



Gbr 7 Desain Bilah

b. Metode Eksperimental

Metode eksperimental dilakukan menggunakan bilah optimal dari hasil simulasi.

1. Menyiapkan alat dan bahan.
2. Membuat rangka dari segmen geometri bilah yang telah didesain.
3. Merakit segmen bilah dan melapisi rangka bilah dengan mesh/jaring alumunium.
4. Menyemprotkan PU Spray Foam pada rangka bilah yang telah dilapisi mesh alumunium.
5. Menyiapkan campuran komposit yaitu resin dan katalis dengan perbandingan 100 ml resin: 10 tetes katalis.
6. Melapisi rangka bilah dengan serat fiber, kemudian melakukan proses coating dengan campuran komposit di atasnya.
7. Setelah bilah terbentuk, pasang bilah pada Hub turbin angin.
8. Lakukan penyettingan sudut serang pada bilah 15° , 20° , 25°
9. Kemudian, lakukan pengambilan data yang terdiri dari rpm generator, tegangan, arus dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin.



Gbr 8 Rangka Bilah



Gbr 9 Pelapisan Jaring Mesh pada Bilah



Gbr 10 Penyemprotan PU Spray Foam



Gbr 11 Pelapisan Serat Fiber



Gbr 12 Pelapisan Campuran Komposit

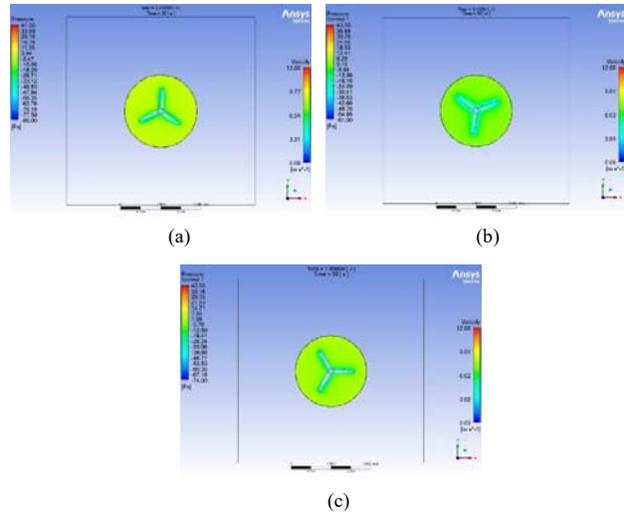
5. Metode Pengolahan dan Analisis Data

Setelah data diperoleh dari hasil simulasi dan eksperimen maka langkah selanjutnya adalah mengolah data yang sudah terkumpul. Data hasil pengujian diolah menjadi grafik dengan Microsoft Excel, sehingga mendapat data berupa grafik agar mudah dilakukan perbandingan pada setiap perlakuan.

HASIL DAN DISKUSI

1. Tekanan

Pengujian simulasi tekanan dilaksanakan secara transient dengan menitikberatkan pengamatan pada angin ketika mulai menumbuk sampai menggerakkan turbin, metode yang digunakan adalah 6DOF dengan menggunakan time step sebesar 60s. Pada simulasi ini turbin angin yang diam akan dihembuskan oleh angin dengan kecepatan angin yang sama yaitu 8 m/s, kemudian turbin akan memulai berputar hingga mencapai tekanan maksimum selama 30 detik. Nilai tekanan maksimal pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 15° dan kecepatan angin 8m/s.



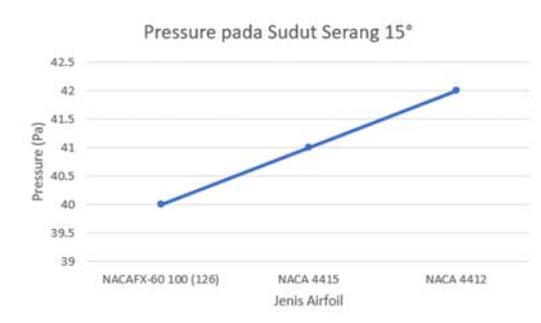
Gbr 13 Pressure Pada Sudut Serang 15° dengan Kecepatan Angin 8 m/s

Tabel 1. Nilai Tekanan Baling-Baling pada Sudut Serang 15°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Tekanan (Pa)
1.	8 m/s	NACA 4412	42
2.	8 m/s	NACA 4415	41
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	40

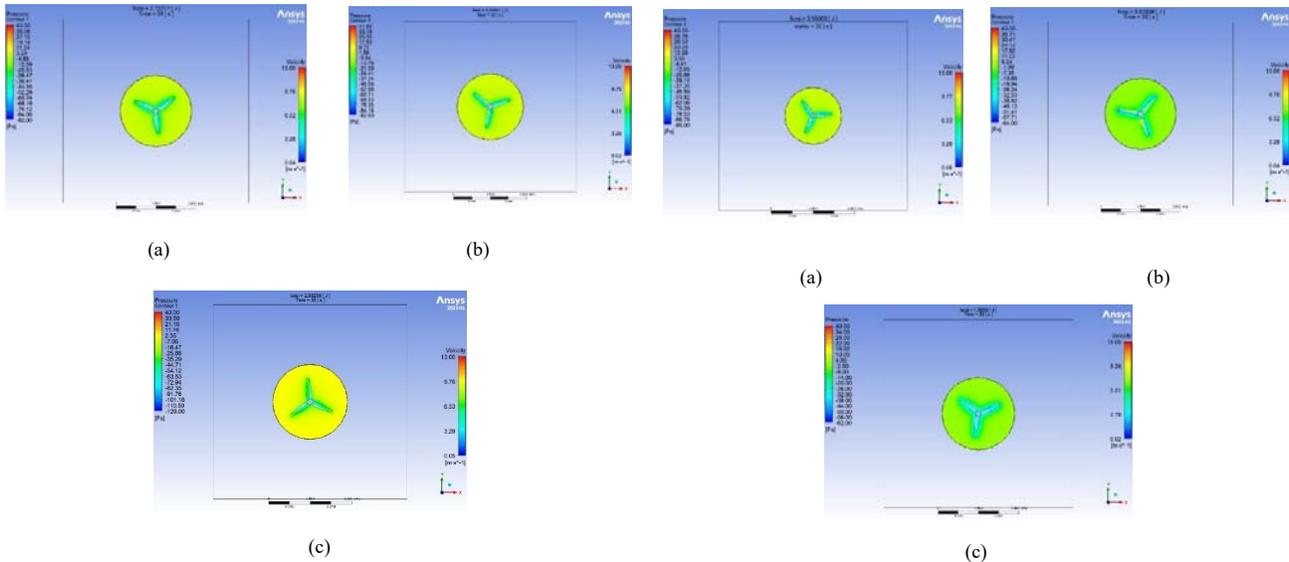
Nilai tekanan maksimum pada sudut serang 15° dengan kecepatan angin 8 m/s didapatkan pada jenis *airfoil* NACA 4412 yaitu, 42 Pa.

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 14 Grafik Tekanan Maksimum Pada Sudut Serang 15°

Nilai tekanan maksimal pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 20° dan kecepatan angin 8 m/s:



Gbr 15 Pressure Pada Sudut Serang 20° dengan Kecepatan Angin 8 m/s

Gbr 13 Pressure Pada Sudut Serang 25° dengan Kecepatan Angin 8 m/s

Tabel 2. Nilai Tekanan Baling-Baling pada Sudut Serang 20°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Tekanan (Pa)
1.	8 m/s	NACA 4412	43
2.	8 m/s	NACA 4415	41
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	40

Tabel 3. Nilai Tekanan Baling-Baling pada Sudut Serang 25°

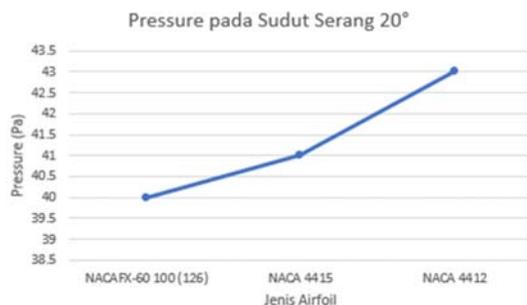
No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Tekanan (Pa)
1.	8 m/s	NACA 4412	45
2.	8 m/s	NACA 4415	43
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	43

Nilai tekanan maksimum pada sudut serang 20° dengan kecepatan angin 8 m/s didapatkan pada jenis *airfoil* NACA 4412 yaitu, 43 Pa.

Nilai tekanan maksimum pada sudut serang 25° dengan kecepatan angin 8 m/s didapatkan pada jenis *airfoil* NACA 4412 yaitu, 45 Pa.

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 12 Grafik Tekanan Maksimum Pada Sudut Serang 20°

Gbr 14 Grafik Tekanan Maksimum Pada Sudut Serang 25°

Nilai tekanan maksimal pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 25° dan kecepatan angin 8 m/s:

2. Torsi

Torsi adalah gaya rotasi berbentuk tenaga untuk memutar turbin, torsi dan gaya merupakan besaran vektor yang memiliki arah. Pada simulasi ini turbin angin yang diam akan dihembuskan oleh angin dengan kecepatan angin yang sama yaitu 8 m/s, kemudian turbin akan memulai berputar hingga mencapai tekanan maksimum selama 30 detik.

Nilai torsi pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 15° dan kecepatan angin sebesar 8 m/s dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai Torsi Baling-Baling pada Sudut Serang 15°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Torsi (Nm)
1.	8 m/s	4412	1.09404
2.	8 m/s	4415	2.03259
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	1.60390

Nilai torsi maksimum pada sudut serang 15° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4415 yaitu, 2.03259 Nm.

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 15 Grafik Torsi Maksimum Pada Sudut Serang 15°

Nilai torsi pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 20° dan kecepatan angin sebesar 8 m/s dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 5. Nilai Torsi Baling-Baling pada Sudut Serang 20°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Torsi (Nm)
1.	8 m/s	4412	2.72170
2.	8 m/s	4415	2.86441
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	2.88256

Nilai torsi maksimum pada sudut serang 20° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA FX- 60 100 (126) yaitu, 2.88256 Nm.

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 16 Grafik Torsi Maksimum Pada Sudut Serang 20°

Nilai torsi pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 25° dan kecepatan angin sebesar 8 m/s dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 6. NilaiTorsi Baling-Baling pada Sudut Serang 25°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Torsi (Nm)
1.	8 m/s	4412	3.55503
2.	8 m/s	4415	3.51938
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	3.45590

Nilai torsi maksimum pada sudut serang 25° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4412 yaitu, 3.55503Nm.

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 17 Grafik Torsi Maksimum Pada Sudut Serang 25°

3. Kecepatan Tangensial

Kecepatan tangensial adalah kecepatan yang dimiliki benda ketika bergerak melingkar dengan arah menyinggung lintasan putarnya dengan kata lain arah kecepatan linear akan selalu tegak lurus (90°) dengan jari-jari lingkaran. Berikut nilai dari kecepatan tangensial diperoleh dari hasil simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Tabel 7. Nilai Kecepatan Tangensial Baling-Baling pada Sudut Serang 15°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Kecepatan Tangensial (m/s)
1.	8 m/s	4412	19.1151
2.	8 m/s	4415	12.2997
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	9.06592

Nilai kecepatan tangensial maksimum pada sudut serang 15° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4412 yaitu, 19.1151 m/s .

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 18 Grafik Kecepatan Tangensial Maksimum Pada Sudut Serang 15°

Nilai Kecepatan Tangensial pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 20° dan kecepatan angin sebesar 8 m/s dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 8. Nilai Kecepatan Tangensial Baling-Baling pada Sudut Serang 20°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Kecepatan Tangensial (m/s)
1.	8 m/s	4412	25.5976
2.	8 m/s	4415	14.0260
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	8.7664

Nilai kecepatan tangensial maksimum pada sudut serang 20° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4412 yaitu, 25.5976m/s .

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 19 Grafik Kecepatan Tangensial Maksimum Pada Sudut Serang 20°

Nilai Kecepatan Tangensial pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 25° dan kecepatan angin sebesar 8 m/s dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 9. Nilai Kecepatan Tangensial Baling-Baling pada Sudut Serang 25°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	Kecepatan Tangensial (m/s)
1.	8 m/s	4412	44.3961
2.	8 m/s	4415	15.4291
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	10.4091

Nilai kecepatan tangensial maksimum pada sudut serang 25° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4412 yaitu, 44.3961m/s .

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 20 Grafik Kecepatan Tangensial Maksimum Pada Sudut Serang 25°

4. RPM

RPM (Revolutions Per Minute) pada turbin angin merujuk pada kecepatan putaran atau kecepatan rotasi baling-baling pada turbin angin. Berikut nilai dari RPM yang diperoleh dari hasil simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Tabel 10. Nilai Kecepatan Putar (RPM) Baling-Baling pada Sudut Serang 15°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	RPM
1.	8 m/s	4412	228.1691
2.	8 m/s	4415	146.8168
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	108.2164

Nilai kecepatan putar (RPM) maksimum pada sudut serang 15° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4412 yaitu, 228.1691 rpm.

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 21 Grafik Kecepatan Putar (RPM) Maksimum Pada Sudut Serang 15°

Nilai Kecepatan putar (RPM) pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 20° dan kecepatan angin sebesar 8 m/s dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 11. Nilai Kecepatan Putar (RPM) Baling-Baling pada Sudut Serang 20°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	RPM
1.	8 m/s	4412	305.5488
2.	8 m/s	4415	167.4229
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	104.6407

Nilai kecepatan putar (RPM) maksimum pada sudut serang 20° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4412 yaitu, 305.5488 rpm. Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 22 Grafik Kecepatan Putar (RPM) Maksimum Pada Sudut Serang 20°

Nilai Kecepatan putar (RPM) pada simulasi turbin angin dengan sudut serang 25° dan kecepatan angin sebesar 8 m/s dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 12. Nilai Kecepatan Putar (RPM) Baling-Baling pada Sudut Serang 25°

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Airfoil	RPM
1.	8 m/s	4412	529.939
2.	8 m/s	4415	450.07
3.	8 m/s	NACA FX- 60 100 (126)	124.249

Nilai kecepatan putar (RPM) maksimum pada sudut serang 25° dengan kecepatan angin yang sama sebesar 8 m/s didapatkan pada jenis NACA 4412 yaitu, 529.939 rpm. Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 23 Grafik Kecepatan Putar (RPM) Maksimum Pada Sudut Serang 25°

Data Hasil Eksperimental

Data hasil eksperimental dilakukan di lab.wind tunnel jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang. Untuk proses pengambilan data diambil adalah seperti berikut:

Tabel 13. Data Hasil Eksperimental dari NACA 4412 Pada Kecepatan Angin 4 m/s

Sudut serang (°)	Kec. Angin (m/s)	Voltase (V)	Kuat Arus (A)	Daya (W)
15	4	8.8	0.12	1.06
	4	8.5	0.12	1.02
	4	8.6	0.12	1.03
20	4	9	0.13	1.17
	4	9	0.135	1.22
	4	8.8	0.135	1.19
25	4	10	0.15	1.5
	4	9.5	0.155	1.47
	4	10	0.145	1.45

Tabel 14. Data Hasil Eksperimental dari NACA 4412 Pada Kecepatan Angin 6 m/s

sudut serang (°)	Kec angin (m/s)	Voltase (V)	Kuat Arus (A)	Daya (W)
15	6	14.2	0.25	3.55
	6	14.4	0.26	3.74
	6	14.5	0.25	3.63
20	6	15.8	0.25	3.95
	6	15.6	0.26	4.06
	6	15.5	0.25	3.88
25	6	17.5	0.25	4.38
	6	18.2	0.26	4.73
	6	17.5	0.27	4.73

Tabel 15. Data Hasil Eksperimental dari NACA 4412 Pada Kecepatan Angin 8 m/s

sudut serang (°)	Kec angin (m/s)	Voltase (V)	Kuat Arus (A)	Daya (W)
15	8	16.2	0.26	4.21
	8	16.4	0.27	4.43
	8	16.5	0.26	4.29
20	8	18.2	0.29	5.28
	8	18.5	0.3	5.55
	8	18.8	0.31	5.83
25	8	22.4	0.33	7.39
	8	22.8	0.35	7.98
	8	22.4	0.32	7.17

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 24 Grafik Hubungan Daya dan Kecepatan Angin

Pada grafik dapat disimpulkan bahwa daya tertinggi dihasilkan pada kecepatan angin 8 m/s dan sudut serang 25° yaitu dengan daya sebesar 7.98 Watt.

Nilai Kecepatan putar (RPM) pada proses eksperimental turbin angin menggunakan bilah NACA 4412 dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 16. Data Hasil Eksperimental RPM Turbin Angin dari NACA 4412 pada Sudut Serang 15°

Sudut Serang (°)	Daya (W)	Kec. Putaran (RPM)	TSR
15	1.06	190.1	1.990
	1.02	192.3	2.013
	1.03	195.2	2.043
	3.55	300.2	2.095
	3.74	302.5	2.111
	3.63	301.6	2.104
	4.21	350.6	2.446
	4.43	351.2	2.451
4.29	351.5	2.453	

Tabel 17. Data Hasil Eksperimental RPM Turbin Angin dari NACA 4412 pada Sudut Serang 20°

Sudut Serang (°)	Daya (W)	Kec. Putaran (RPM)	TSR
20	1.17	207.5	2.172
	1.22	208.6	2.183
	1.19	209.5	2.193
	3.95	340.7	2.377
	4.06	341.5	2.383
	3.88	344	2.400
	5.28	401.3	2.800
	5.55	402.2	2.806
	5.83	402.5	2.809

Tabel 18. Data Hasil Eksperimental RPM Turbin Angin dari NACA 4412 pada Sudut Serang 25°

Sudut Serang (°)	Daya (W)	Kec. Putaran (RPM)	TSR
25	1.50	226.3	2.369
	1.47	221.5	2.318
	1.45	228.2	2.388
	4.38	364.1	2.541
	4.73	367.5	2.564
	4.73	366.8	2.559
	7.39	480.5	3.353
	7.98	482.2	3.365
	7.17	481.4	3.359

Tabel diatas disimpulkan pada grafik dibawah ini:



Gbr 25 Grafik Hubungan Daya dan Kecepatan Angin

Pada grafik dapat disimpulkan bahwa kecepatan putaran (RPM) tertinggi dari turbin angin dihasilkan pada kecepatan angin 8 m/s dan sudut serang 25° yaitu dengan kecepatan putaran (RPM) sebesar 482.2 rpm. Dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin besar kecepatan angin yang bertumbukan dengan turbin angin maka kecepatan putar (RPM) yang dihasilkan semakin besar juga.

KESIMPULAN

- Berdasarkan hasil simulasi turbin angin menggunakan metode 6DOF, airfoil dengan NACA 4412 dan sudut serang 25° menunjukkan hasil yang optimal dengan nilai Torsi yang dihasilkan adalah 3.55503 Nm, Tekanan 45 Pa, Kecepatan tangensial 44.3961 m/s, dan kecepatan putaran turbin 529.939 rpm. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin aerodinamis geometri NACA yang dipakai maka hasil yang simulasi yang didapatkan semakin optimal, serta semakin besar sudut serang turbin angin maka semakin besar pula output simulasi turbin angin yang dihasilkan.
- Pada hasil pengujian eksperimental turbin angin dimana turbin angin yang dipakai menggunakan geometri dari NACA 4412 menunjukkan bahwa sudut serang 25° dan kecepatan angin 8m/s menghasilkan daya listrik dan rpm yang besar dengan nilai berturut-turut 7.98 Watt dan 482.2 rpm. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar sudut serang dan kecepatan angin yang mengenai turbin angin maka daya dan rpm yang dihasilkan turbin angin semakin besar pula.

REFERENSI

- Pradnyana, G. (2016). Pemenuhan kebutuhan energi dalam rangka mewujudkan ketahanan nasional. *Jurnal maksipreneur*, 67.
- Saputra, M., & Pribadyo. (2015). Studi Analisis Potensi Energi Angin Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin Di Kawasan Meulaboh. *Jurnal Mekanova*, 32.
- Suprpto, M. (2016). Analisis turbin angin sumbu vertikal dengan 4, 6 dan 8 sudu. *Jurnal teknik mesin uniska*, 52.
- Nakhoda, I. Y., & Saleh, C. (2015). Rancang Bangun Kincir Angin Sumbu Vertikal. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, 59-68.
- Fachri, M. R., & Hendrayana. (2017). Analisa Potensi Energi Angin Dengan Distribusi Weibull. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 1-8.
- Sapto, A. D., & Rumakso, H. P. (2021). Uji Coba Performa Bentuk Airfoil Menggunakan Software Qblade Terhadap Turbin Angin Tipe Sumbu Horizontal. *Jurnal Teknik Mesin*.
- Wahyudi, B., Faizin, A., Setiawan, A., Susilo, S. H., & Wicaksono, H. (2022). Simulation study of horizontal axis wind turbine using PVC pipe propeller with elbow tip. *EUREKA: Physics and Engineering*, (5), 67-76.
- Dirgantini, D. (2021). Simulasi Kekuatan Struktur Kayu Pinus Terhadap Pembebanan Pada Turbin Angin Sumbu Horizontal Skala Mikro.
- Wicaksono, H., Susilo, S. H., Pranoto, B., & Fakhruddin, M. (2021). Initial Rotation Characteristic Investigation of a Hybrid Savonius - Darrieus Wind Turbine using 6 DOF Computational Fluid Dynamics. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 9-17.

- [10] Hartanto, T., Sarjito, & Aklis, N. (2015). Analisa Aerodinamika Flap Dan Slat Pada Airfoil Naca. Jurnal Teknik Mesin.