



## Perancangan Bilah *Taperless* Menggunakan *Airfoil* NACA 2412 Pada *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) *The Sky Dancer* 500 Watt

Teguh Adipranata<sup>1</sup>, Oleh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Singaperbangsa Karawang

<sup>2</sup>Dosen Magister Teknik Mesin Universitas Singaperbangsa Karawang

Jl. HS. Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Kab. Karawang, 41361

### Abstract

Received: 17 Oktober 2022

Revised: 20 Oktober 2022

Accepted: 23 Oktober 2022

*The wind speed in Indonesia is only around 3 meters/s to 12 meters/s, it is quite difficult to generate electricity on a large scale, it also makes the utilization of wind energy still very low. However, the wind potential in Indonesia is available almost all year round, so there is a possibility of developing technology to utilize this energy with some of the limitations mentioned above. Modifications of windmills need to be carried out which are adapted to low wind speed conditions to be able to produce optimal electrical energy. Therefore, a HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) design was made using a NACA airfoil that has a high  $C_l/C_d$  value to produce 500 W of power at wind speeds of 1 meter/s – 12 meters/s. The research was conducted in 3 stages. The first step is the calculation to determine the radius, chord, and twist of the blade. The two initial design stages of the blade are carried out in a simulation using QBlade software to determine the NACA airfoil used and determine the performance coefficient and the resulting power. The three stages of blade design use Solidworks software which produces a 3D blade design. The design results produce a HAWT blade with a *taperless* NACA 2412 airfoil with a blade radius of 0.75 m, 0.12 m chord width, and a twist angle of 5.42°-15.46°. At a wind speed of 10 m/s, the blades have a maximum  $C_p$  of 49%, maximum power of 923 W at an angular speed of 1000 rpm, and a minimum power of 90 W at an angular speed of 200 rpm. The average power generated is 567W.*

**Keywords:** *Blade, NACA 2412, Wind Turbine.*

(\*) Corresponding Author: [teguh.adipranata55@gmail.com](mailto:teguh.adipranata55@gmail.com)

**How to Cite:** Adipranata, T., & Oleh, O. (2022). Airfoil, Blade Perancangan Bilah *Taperless* Menggunakan Airfoil NACA 2412 Pada Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) *The Sky Dancer* 500 Watt. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(21), 329-343. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7275298>

### PENDAHULUAN

Saat ini, sebagian besar listrik yang dikonsumsi di Indonesia berasal dari bahan bakar fosil: minyak tanah (BBM), gas dan batu bara. Energi fosil merupakan energi yang tidak terbarukan dan ketersediaannya secara bertahap semakin terbatas. Penggunaan energi terbarukan (*renewable energy*) dapat menjadi solusi untuk mengatasi keterbatasan energi fosil. Energi angin ini merupakan jenis energi baru terbarukan dan ketersediaannya yang tidak terbatas merupakan salah satu alasan utama penggunaan energi angin di Indonesia.

Menurut data Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia memiliki potensi energi angin yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Tetapi, kecepatan angin di Indonesia berfluktuasi, sehingga karakteristik kecepatan angin di Indonesia dapat berubah secara drastis dalam periode waktu yang cepat (Badan Litbang ESDM, 2017).



Energi angin ini dapat digunakan sebagai tenaga penggerak untuk memutar sudu-sudu atau bilah turbin angin dengan memanfaatkan energi mekanik yang dihasilkan oleh sudu-sudu turbin angin untuk menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik. Berdasarkan hal tersebut maka perlu dirancang bilah untuk turbin angin yang dapat beroperasi pada kecepatan angin yang lambat dan berfluktuasi. Bilah yang paling umum saat ini yaitu bilah turbin angin sumbu horizontal (HAWT). Selain itu, kincir angin Indonesia umumnya menggunakan tipe HAWT. Jenis bilah rotor yang digunakan adalah kerucut karena memiliki keunggulan seperti gaya dorong (*thrust*) dan gaya hambat (*drag*) yang rendah serta cocok untuk kecepatan angin Indonesia yang relatif sedang hingga lambat (LAN, 2012).

Bilah geometris dibuat menggunakan jenis airfoil NACA untuk menentukan kinerja dan efisiensi aerodinamis. Pada penelitian ini, airfoil yang digunakan adalah NACA 2412 yang diharapkan dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi dengan kecepatan angin yang rendah.

**METODE PENELITIAN**



**Gambar 1** Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

1. Studi Literatur

Studi Literatur dilakukan untuk menemukan metode yang tepat dalam merancang, memprediksi performa, dan menguji turbin angin. Studi literatur dilakukan melalui ebook, paper penelitian, artikel di internet, dan modul perancangan PT Lentera Bumi Nusantara.

2. Analisis Karakteristik Airfoil

Pada langkah ini dilakukan analisis karakteristik blade menggunakan software QBlade. Karakteristik yang akan dianalisis adalah grafik perbandingan gaya angkat terhadap gaya hambat pada sudut serang ( $C_l/C_d-\alpha$ ), dan grafik gaya angkat terhadap sudut serang ( $C_l-\alpha$ ). Tujuannya untuk mengetahui lift force dan drag force.

3. Perhitungan dan Perancangan Bilah Turbin Angin Tipe Taperless

Perancangan bilah ini dimulai dengan penentuan kapasitas daya maksimal yang dihasilkan oleh kincir angin, dimana generator yang digunakan adalah The Sky Dancer (TSD) dengan daya 500 Watt.

#### 4. Implementasi Rancangan Bilah

- 1) Hasil perbaikan rancangan dimensi bilah dimodelkan pada *software* desain 3D.
- 2) Ukuran bilah kayu disesuaikan dengan ukuran pada model 3D.
- 3) Balok bilah kayu dijemur supaya kadar air di dalam kayu berkurang sehingga ketika balok bilah kayu sudah dibentuk maka bilah tidak mengalami penyusutan atau retak.
- 4) Balok bilah kayu dibentuk sesuai model 3D rancangan dimensi bilah dengan mesin serut kayu Modern M2900.
- 5) Penghalusan permukaan bilah turbin angin dengan menggunakan amplas dan dempul untuk mengurangi efek turbulensi yang terjadi pada permukaan bilah.
- 6) *Balancing* ketiga bilah turbin angin memiliki tujuan agar ketiga bilah dapat berputar stabil pada saat pengujian. Terdapat dua jenis uji *balancing* yang dilakukan, yaitu *static balance* dimana bilah menghasilkan  $\sum \tau$  (*torsi*) = 0 pada keadaan diam karena akibat gaya gravitasi antarbilah dan *dynamic balance* dimana antarbilah menghasilkan torsi yang sama akibat adanya gaya aerodinamis.

#### 5. Pengujian Lapangan

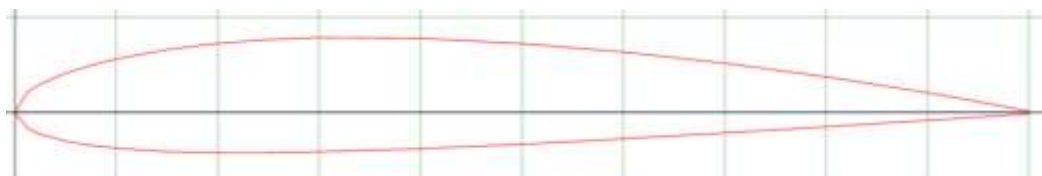
Pengujian lapangan dilaksanakan dengan tujuan memperoleh karakteristik keluaran daya turbin angin terhadap besar kecepatan angin. Pengujian lapangan hasil implementasi rancangan dimensi bilah dilakukan pada TSD-500 di PT Lentera Bumi Nusantara, Jl. Raya Ciheras, Kp. Sindang Asih RT. 02/RW. 02 Dusun Lembur Tengah, Desa Ciheras Kec. Cipatujah, Tasikmalaya. Data keluaran yang diperoleh datalogger adalah tegangan, arus, dan kecepatan angin setiap detik. Data daya merupakan hasil perkalian antara tegangan dengan arus diambil dari sinyal masukan baterai.

#### 6. Pengolahan Data Pengujian Lapangan

Data yang diperoleh dari pengujian lapangan dimasukkan ke dalam tabel pengolahan pada Excel yang sudah PT Lentera Bumi Nusantara sediakan menjadi besar daya dan kecepatan angin rata-rata setiap menit. Data tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik daya dan kecepatan angin terhadap serial waktu dan kurva daya terhadap kecepatan angin dalam bentuk scatter.

### ANALISIS KARAKTERISTIK AIRFOIL

Pada langkah ini dilakukan analisis karakteristik blade menggunakan *software QBlade*. Karakteristik yang akan dianalisis adalah grafik perbandingan gaya angkat terhadap gaya hambat pada sudut serang ( $C_l/C_d-\alpha$ ), dan grafik gaya angkat terhadap sudut serang ( $C_l-\alpha$ ). Tujuannya untuk mengetahui *lift force* dan *drag force*.



**Gambar 2** Geometri Airfoil, Airfoil Naca 2412

Langkah pertama dalam menentukan bentuk bilah adalah mengetahui sudut serang ( $\alpha$ ) dan koefisien angkat Nilai ini diperoleh dari hasil simulasi angin sudu dengan menggunakan software QBlade v0.9.63. Sudut serang itu sendiri adalah sudut datangnya angin relatif terhadap sudu, koefisien angkat (*lift coefficient*, Cl) adalah koefisien angkat dari bilah. Untuk dapat berputar, nilai gaya harus lebih besar dari gaya hambat (*coefficient drag*) (Burhannudin ahlan, 2016).

### **Perhitungan dan Perancangan Bilah Turbin Angin Tipe Taperless**

Perancangan bilah ini dimulai dengan penentuan kapasitas daya maksimal yang dihasilkan oleh kincir angin, dimana generator yang digunakan adalah *The Sky Dancer* (TSD) dengan daya 500 Watt.

#### **Menentukan Data Perancangan Awal Bilah**

1. Menghitung Nilai Efisiensi Sistem Kincir Angin

$$K = \eta_b \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_c$$

Keterangan:

- $\eta_b$  = efisiensi bilah
- $\eta_t$  = efisiensi transmisi
- $\eta_g$  = efisiensi generator
- $\eta_c$  = efisien kontroler

2. Menghitung Nilai Daya Angin yang Diperlukan

$$P_{wind} = \frac{P_{el}}{K}$$

Keterangan:

- $P_{wind}$  = daya angin
- $P_{el}$  = kapasitas daya generator
- $K$  = efisiensi system

3. Menghitung Luas Sapuan Bilah

$$A = \frac{2 \cdot P_{wind}}{\rho v_{max}^3}$$

Keterangan:

- $A$  = luas sapuan bilah
- $P_{wind}$  = daya angin
- $\rho$  = densitas udara
- $v_{max}^3$  = kecepatan angin maksimal

4. Menghitung Jari-Jari Bilah Masing-Masing Luas Sapuan

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Keterangan:

$R$  = jari-jari bilah  
 $A$  = luas sapuan

### Menentukan Nilai Tip Speed Ratio

*Tip Speed Ratio* (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan linear ujung bilah terhadap kecepatan angin.

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{wind}} = \frac{\omega \cdot r}{V_{wind}}$$

Keterangan:

$\lambda$  = tip speed ratio  
 $\omega$  = kecepatan sudut  
 $r$  = jari-jari bilah  
 $V_{wind}$  = kecepatan udara

### Mempersiapkan Data Parameter Awal Geometri Bilah

Pada tahap ini, bilah dibagi menjadi 11 elemen dimana 1 elemen alas dan 10 elemen memiliki panjang yang sama, maka geometri yang di hitung yaitu:

1. Menghitung nilai jari-jari parsial  $r$

$$r = 0,17 + \left[ \left( \frac{R - 0,17}{b} \right) \times (elemen) \right]$$

Keterangan:

$r$  = jari-jari parsial  
 $R$  = jari-jari bilah  
 $N$  = jumlah elemen

2. Menghitung *tip speed ratio* (TSR) parsial

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \cdot \lambda$$

Keterangan:

$\lambda_r$  = tip speed ratio parsial  
 $R$  = jari-jari bilah  
 $r$  = jari-jari parsial  
 $\lambda$  = *tip speed ratio*

3. Menghitung nilai *koefisien lift* ( $C_l$ ) untuk tiap elemen

$$C_l = \frac{16\pi \cdot R \cdot \left(\frac{R}{r}\right)}{9\lambda^2 \cdot B \cdot C_r}$$

Keterangan:

$C_l$  = *koefisien lift*  
 $B$  = jumlah bilah  
 $R$  = jari-jari bilah  
 $C_r$  = Panjang chord bilah  
 $\lambda$  = *tip speed ratio*  
 $r$  = jari-jari parsial

## 4. Menghitung nilai sudut alir

$$\theta = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r}$$

Keterangan:

 $\theta$  = sudut alir $\lambda_r$  = *tip speed ratio* parsial

## 5. Menghitung nilai sudut puntir

$$\beta = \theta - \alpha$$

Keterangan:

 $\beta$  = sudut puntir $\theta$  = sudut alir $\alpha$  = sudut serang**Perancangan Bilah**

Parameter rancangan bilah ditentukan berdasarkan keterangan pada Tabel Bilah turbin angin pada penelitian ini dirancang dan diimplementasikan dengan menggunakan jenis *airfoil* Naca 2412.

**Tabel 3. 1** Parameter rancangan bilah

Parameter	Nilai	Keterangan
$P_{maks}$	500 W	Spesifikasi TSD 500
$U_{rated}$	12 m/s	Batasan QBlade
$\eta_{generator}$ dan controller	0,9	Spesifikasi TSD 500
$\rho_{udara}$	1,225 kg/m <sup>3</sup>	Asumsi pada suhu 20°C
$\nu_{udara}$	1,57 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	Asumsi pada suhu 20°C
$N_{crit}$	9	Asumsi lingkungan standar

**Implementasi Hasil Perancangan Bilah**

1. Hasil perbaikan rancangan dimensi bilah dimodelkan pada *software* desain 3D.
2. Ukuran bilah kayu disesuaikan dengan ukuran pada model 3D.
3. Balok bilah kayu dijemur supaya kadar air di dalam kayu berkurang sehingga ketika balok bilah kayu sudah dibentuk maka bilah tidak mengalami penyusutan atau retak.
4. Balok bilah kayu dibentuk sesuai model 3D rancangan dimensi bilah dengan mesin serut kayu Modern M2900.
5. Penghalusan permukaan bilah turbin angin dengan menggunakan amplas dan dempul untuk mengurangi efek turbulensi yang terjadi pada permukaan bilah.
6. *Balancing* ketiga bilah turbin angin memiliki tujuan agar ketiga bilah dapat berputar stabil pada saat pengujian. Terdapat dua jenis uji *balancing* yang dilakukan, yaitu *static balance* dimana bilah menghasilkan  $\sum \tau$  (*torsi*) = 0 pada keadaan diam karena akibat gaya gravitasi antarbilah dan *dynamic*

*balance* dimana antarbilah menghasilkan torsi yang sama akibat adanya gaya aerodinamis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

**Tabel 1 Data awal perhitungan**

No.	Data Awal	Simbol	Nilai	Satuan
1	Kapasitas daya Listrik	$P_{el}$	500	W
2	Efisiensi Bilah	$\eta$	Batas Bawah	0,3
			Batas Atas	0,4
3	Efisiensi Transmisi		0,9	
4	Efisiensi Generator		0,9	
	Efisiensi Controller		0,9	
5	Kecepatan angin maksimal	V max	12	m/s
6	Densitas udara	$\rho$	1.225	kg/m <sup>3</sup>

### Menghitung Perancangan Awal Bilah

#### Menghitung Nilai Efisiensi Sistem Kincir Angin

1. Efisiensi sistem dengan efisiensi batas bawah bilah

$$K = \eta_b \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_c$$

$$K = 0,3 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,9$$

$$K = 0,22$$

Jadi dari hasil perhitungan dengan menggunakan efisiensi bilah batasbawah di dapatkan efisiensi sistem sebesar 0,22

2. Efisiensi sistem dengan efisiensi batas atas bilah

$$K = \eta_b \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_c$$

$$K = 0,4 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,9$$

$$K = 0,29$$

Jadi dari hasil perhitungan dengan menggunakan efisiensi bilah batas atas di dapatkan efisiensi sistem sebesar 0,29

#### Menghitung nilai daya angin yang diperlukan

3. Daya angin dengan efisiensi bilah batas bawah

$$P_{wind} = \frac{P_{el}}{K}$$

$$P_{wind} = \frac{500}{0,22}$$

$$P_{wind} = 2286,2 \text{ watt}$$

Jadi dengan efisiensi bilah batas bawah kita membutuhkan daya angin sebesar 2286,2 watt

4. Daya angin dengan efisiensi bilah batas atas

$$P_{wind} = \frac{P_{el}}{K}$$

$$P_{wind} = \frac{500}{0,29}$$

$$P_{wind} = 1714,7 \text{ watt}$$

Jadi dengan efisiensi bilah batas atas dibutuhkan daya angin sebesar 1714,7 watt

### **Menghitung luas sapuan bilah**

5. Luas sapuan bilah dengan efisiensi bilah batas bawah

$$A = \frac{2 \cdot P_{wind}}{\rho v_{max}^3}$$

$$A = \frac{2 \cdot 2286,2}{1225 \cdot 12^3}$$

$$A = 2,16 \text{ m}^2$$

Jadi dari hasil perhitungan didapatkan luas sapuan bilah sebesar 2,16 m<sup>2</sup> dengan efisiensi bilah batas bawah

6. Luas sapuan bilah dengan efisiensi bilah batas atas

$$A = \frac{2 \cdot P_{wind}}{\rho v_{max}^3}$$

$$A = \frac{2 \cdot 1714,7}{1225 \cdot 12^3}$$

$$A = 1,62 \text{ m}^2$$

Jadi dari hasil perhitungan didapatkan luas sapuan bilah sebesar 1,62 m<sup>2</sup> dengan efisiensi bilah batas bawah

### **Menghitung jari-jari bilah masing-masing luas sapuan**

7. Jari-jari bilah dengan efisiensi bilah batas bawah

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$R = \sqrt{\frac{2,16}{\pi}}$$

$$R = 0,83m$$

Jadi dari hasil perhitungan didapatkan jari-jari bilah sebesar 0,83 m dengan efisiensi bilah batas bawah

8. Jari-jari bilah dengan efisiensi bilah batas atas

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$R = \sqrt{\frac{1,62}{\pi}}$$

$$R = 0,72m$$

Jadi dari hasil perhitungan didapatkan jari-jari bilah sebesar 0,72 m dengan efisiensi bilah batas atas

Untuk merancang bilah dengan keluaran daya sebesar 500 watt di pengaruhi oleh 2 faktor yaitu kecepatan angin dan panjang jari-jari bilah, oleh karena itu, kecepatan angin yang fluktuatif maka kecepatan angin maksimal di asumsikan 12 m/s dan efisiensi bilah 0.3 jari-jari bilah yang digunakan 0.75m dengan airfoil NACA 2412 jenis *taperless*.

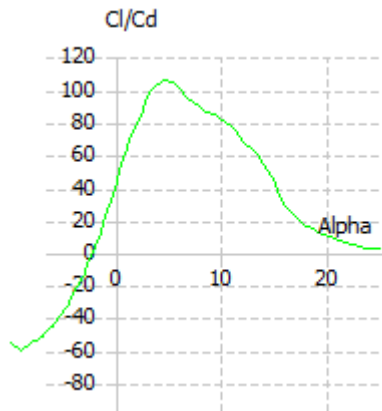
**Menentukan Nilai Tip Speed Ratio (TSR)**

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan linear ujung bilah terhadap kecepatan angin. Estimasi TSR dapat dilakukan dengan melihat referensi bahwa TSR untuk turbin angin dengan 3 bilah berkisar pada rentang 6-8. Pada perancangan ini menggunakan nilai TSR 7. Pada tabel 4.2 memperlihatkan nilai TSR dengan jumlah 3 bilah airfoil NACA 2412.

**Tabel 4. 1** Nilai TSR yang digunakan dengan jumlah bilah 3.

TSR	Airfoil	Cl/Cd	Cr	Jumlah Bilah (B)
7	NACA-2412	105,3	0,12	3

Dari hasil simulasi Cl/Cd terhadap Alpha (Cl/Cd-Alpha) pada gambar 4.1 memperlihatkan bahwa hasil perbandingan hasil koefisien *lift/drag* di dapatkan sebesar 105,3.



**Gambar 4. 1** Grafik Cl/Cd terhadap alfa

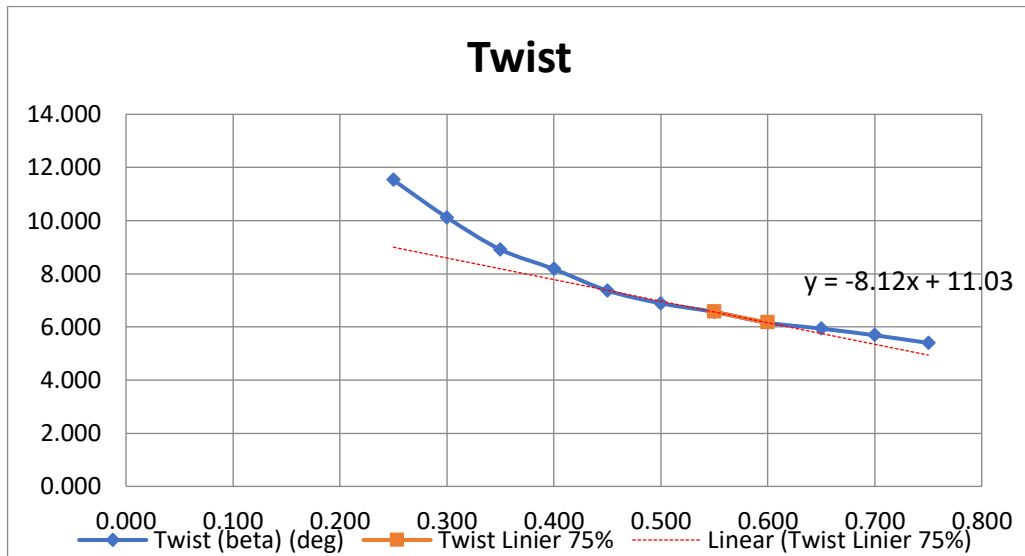
**Mempersiapkan Data Parameter Geometri Bilah**

Pada bagian ini, bilah dibagi menjadi 11 elemen yang mana 1 elemen pangkal dan 10 elemen sama panjang, tabel 4.3 memperlihatkan hasil perhitungan geometri bilah dari menghitung nilai jari-jari parsial r sampai nilai sudut puntir.

**Tabel 4. 2** Data Parameter Geometri bilah

GEOMETRI BILAH							
r	TSR Parsial	Cl	Alpha	Flow Angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Twist Linier 75%	Twist Linier 75%
0,250	2,33	0,71	3,940	15,466	11,526		9,00
0,300	2,80	0,59	2,983	13,103	10,120		8,59
0,350	3,27	0,51	2,433	11,347	8,914		8,19
0,400	3,73	0,45	1,818	9,997	8,179		7,78
0,450	4,20	0,40	1,559	8,928	7,369		7,38
0,500	4,67	0,36	1,174	8,063	6,889		6,97
0,550	5,13	0,32	0,785	7,349	6,564	6,564	6,56
0,600	5,60	0,30	0,592	6,750	6,158	6,158	6,16
0,650	6,07	0,27	0,303	6,240	5,937		5,75
0,700	6,53	0,25	0,115	5,801	5,686		5,35
0,750	7,00	0,24	0,022	5,420	5,398		4,94

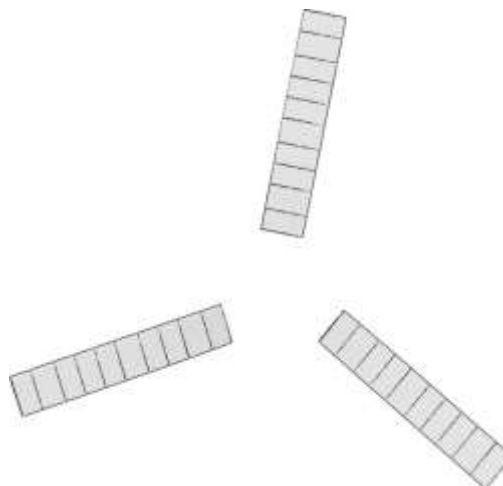
Setelah didapatkan nilai jari-jari parsial dan twist di tiap elemennya, twist yang di dapat yaitu dari 4°-9° sudut puntir ini disebut sudut punter ideal. Hal itu akan menyulitkan dalam proses produksi bilah, sehingga perludilakukan optimasi sudut twist dengan linearisasi garis. Pada gambar 4.2 memperlihatkan grafik twist terhadap jari-jari parsial untuk melihat kecenderungan sudut puntir.



**Gambar 4. 2** Grafik twist terhadap jari-jari parsial

**Desain 3D Bilah**

Setelah mendapatkan data parameter geometri bilah, selanjutnya dari hasil parameter geometri bilah di input ke software Qblade untuk memperoleh titik koordinat airfoil yang akan di gambar ke solidwork. Gambar 4.3 memperlihatkan geometri airfoil bilah.



**Gambar 4. 3** Geometri Airfoil pada Qblade

Dari hasil perancangan geomteri Airfoil di Qblade maka di dapatkan koordinat bilah yang akan di desain pada solidwork. Gambar 4.4 memperlihatkan geometri bilah yang sudah di desain pada solidwork.

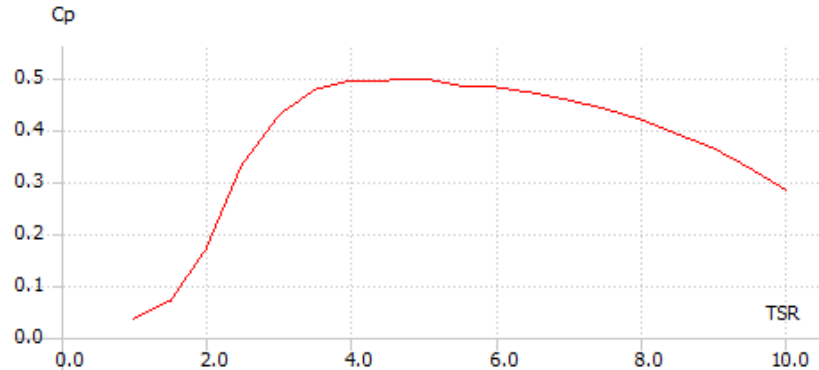


**Gambar 4. 4** Geometri 3D bilah pada Solidwork

### **Simulasi dan Analisis**

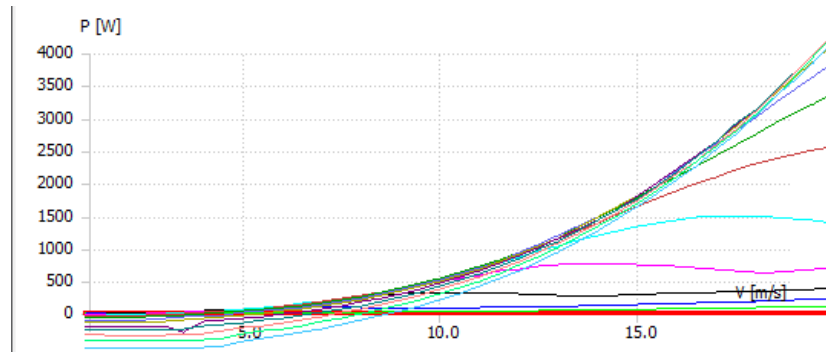
Setelah didapat parameter geometri bilah, dilakukan simulasi rotor, dengan metode BEM (Blade Element Momentum) menggunakan software Q-Blade v0.963. Parameter yang dimasukkan saat simulasi yaitu jumlah iterasi sebanyak 1000 iterasi, densitas udara sebesar  $1,225 \text{ Kg/m}^3$ , serta viskositas dinamik sebesar  $1,647 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ .

Hasil simulasi koefisien performa dibanding TSR ( $C_p$ -TSR) tersaji pada Gambar 4.5. Berdasarkan simulasi memberikan hasil bahwa bilah memiliki  $C_p$  48% pada TSR 7.



**Gambar 4. 5** Grafik  $C_p$ -TSR

Kemudian dilakukan simulasi untuk melihat pengaruh kecepatan angin terhadap daya yang dapat dihasilkan pada berbagai kecepatan angin, seperti pada Gambar 4.6 memperlihatkan hasil daya dari beberapa variasi kecepatan angin.



**Gambar 4. 6** Grafik P-v

Daya maksimum yang dihasilkan bilah pada kecepatan 12 m/s adalah sebesar 923 Watt ketika kecepatan sudut bilah 1000 rpm. Daya minimum yang dihasilkan pada kecepatan 12 m/s adalah sebesar 90 Watt ketika kecepatan sudut bilah 200 rpm. Rata-rata daya yang dihasilkan yaitu sebesar 567 Watt.

Secara keseluruhan hasil Simulasi NACA 2412 membutuhkan kecepatan awal yang kecil untuk memutar bilah yaitu 3 m/s Ketika kecepatan sudut bilah 200 rpm. Jenis bilah tipe taperless memiliki karakteristik lebih efektif digunakan ketika kecepatan angin rendah dan sedang. Daya yang dihasilkan bilah tipe taperless dipengaruhi oleh luasan sapuan udara atau dengan kata lain penyerapan energi angin menjadi energi kinetik, taperless memiliki luas sapuan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis taper hal ini disebabkan oleh karakteristik taperless memiliki panjang chord bernilai sama dari pangkal hingga ujung, kekurangan dari jenis bilah ini memerlukan kecepatan angin untuk perputaran awal lebih besar dari jenis taper, namun memiliki keuntungan dengan luas sapuan yang besar sanggup menangkap energi angin yang lebih banyak dari pada jenis taper ketika sedang berputar.

## KESIMPULAN

Berikut dapat diambil kesimpulan pada penelitian Tugas Akhir berdasarkan uraian yang telah dijelaskan sebelumnya.

1. Hasil perhitungan geometri bilah diperoleh panjang jari-jari bilah yang sebenarnya yaitu 1 m dengan lebar bilah (*chord*) sebesar 12 cm menggunakan tipe *airfoil* NACA 4412 dan sudut puntir (*twist optimum*) yang telah dilinearisasikan dengan tujuan mempermudah proses manufaktur bilah secara manual.
2. Hasil analisa perancangan geometri bilah tipe *taperless* yang disimulasikan dengan metode BEM (*Blade Element Momentum*) akan menghasilkan daya sebesar 500 watt yaitu pada kecepatan angin maksimum 10 m/s dengan kecepatan putar bilah 1076 Rpm dan torsi yang dihasilkan sebesar 4,4 Nm serta dengan nilai *coefficient performance* ( $C_p$ ) maksimum sebesar 0,50 atau 50%. Karena menurut (Sandra Eriksson,

2008) turbin angin jenis HAWT memiliki *coefficient performance* ( $C_p$ ) sebesar 40%-50%. Semakin tinggi efisiensi suatu turbin, Semakin maksimal pula turbin tersebut mengkonversi energi yang didapatnya. Sehingga untuk perancangan turbin angin ini dapat dikatakan sangat baik karena nilai dari *coefficient performance* ( $C_p$ ) diperoleh sebesar 50%.

## SARAN

Perancangan yang telah dilakukan perlu dikembangkan lebih lanjut agar diperoleh hasil yang lebih baik. Adapun saran untuk mengembangkan dari perancangan ini adalah:

1. Perlu adanya SOP yang lebih terperinci terutama pada hal-hal yang bersifat teknis.
2. Analisis karakteristik *aerodinamika* pada bilah perlu dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada *software* QBlade v0.963
3. Diperlukan adanya analisis struktur kekuatan material menggunakan *software* Solidworks 2016 supaya bilah tersebut dapat terhindar dari terjadinya patah ketika digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- “Energy - United Nations Sustainable Development.” [Daring]. Tersedia pada: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>. [Diakses: 20-Jun-2019]
- KESDM. (2015). *Rencana Strategis Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2015-2019*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Jurnal Energi,” *J. Energi*, vol. 02, hal. 100, 2016.
- A. Sanchez-Miralles, C. Calvillo, F. Martín, dan J. Villar, *Use, Operation and Maintenance of Renewable Energy Systems*, vol. 2014, no. July. 2014.
- “IEC 61400-2:2013, Wind Turbines-Part 2: Small Wind Turbine,” Geneva, 2013.
- Lentera Angin Nusantara (LAN). 2012. *Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*.
- Bachtiar, A., & Hayattul, W. (2018). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras. *Jurnal Teknik Elektro ITP*, 35-45.
- Hau, E. (2005). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition*. Munich: Springer.
- Eriksson, S., & Bernhoff, H. 2008. “*Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power Renewable and Sustainable Energy Reviews*”.
- Musyarofah, E. (2020). *Perancangan Sudu Inverse Taper pada Small Wind Turbine dengan Tipe Airfoil SG6042*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Sayogo, A., & Caroko, N. (2016). Perancangan Dan Pembuatan Kincir Angin Tipe Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT). *Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT) 4*, 438-445.
- Asy'ari, H., Budiman, A., & Setiyawan, W. (2012). Desain Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Turbin Horizontal dan Genertaor Magnet

- Permanen Tipe Axial Kecepatan Rendah. *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST)*, 42-47.
- Piggott, H. 1997. *“Windpower Workshop Building Your Own Wind Turbine”*.
- Piggot, H. 2000. *Windpower Workshop*. Peninsula: British Wind Energy Association.
- Badan Pusat Statistik (BPS). 2017. “Kecepatan Angin dan Kelembaban di Stasiun Pengamatan BMKG 2011-2015”.