

OPTIMASI DESAIN BILAH DENGAN METODE LINEARISASI *CHORD* DAN *TWIST* TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL

Bramandhika Augustiantyo

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin
Universitas Singaperbangsa Karawang
Email: 1710631150057@student.unsika.ac.id

Reza Setiawan

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin
Universitas Singaperbangsa Karawang
Email: Reza.setiawan@staff.unsika.ac.id

Oleh

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin
Universitas Singaperbangsa Karawang
Email: Oleh@staff.unsika.ac.id

ABSTRAK

Turbin angin merupakan salah satu alat konversi ramah lingkungan dengan salah satu komponen utamanya adalah bilah. Dalam optimasi bilah perlu diperhatikan beberapa parameter yaitu chord dan twist. Rancangan desain yang tepat akan menghasilkan bilah yang memiliki performa yang baik. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi dengan bantuan perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan adalah *Microsoft Excel* dan *Qblade*. Adapun target yang ingin dicapai pada penelitian ini yaitu mencari desain bilah yang terbaik dengan cara optimasi menggunakan metode linearisasi *chord* dan *twist*, hasil akhirnya akan didapat grafik performansi *Coefficient power* (C_p) dan *Tip speed ratio* (TSR). Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mendapatkan hasil bahwa bilah airfoil SG6043 *Taper* dengan distribusi *twist* dari *hub* adalah sebesar 10.77 hingga ujung sebesar 0.91 dan distribusi *chord* adalah sebesar 0.120 m pada bagian *hub* dan 0.042 m pada bagian pangkal. Hasil pengujian variasi linearisasi *chord* dan *twist* didapat bahwa titik linearisasi *twist* pada 55% dan *chord* pada 25% menghasilkan *coefficient power* (C_p) sebesar 52.6% dengan *Tip speed ratio* optimal sebesar 4.5.

Kata Kunci : turbin angin skala mikro, koefisien daya (C_p), tip speed ratio (TSR), bilah turbin, perangkat lunak *Qblade*

ABSTRACT

Turbine is one of the eco-friendly conversion machines with one of the main components is the blade. In optimizing the blade, it is necessary to pay attention to several parameters, namely chords and twists. The right design design will produce blades that have good performance. The method used in this research is the simulation method with software. The software used is Microsoft Excel and Qblade. The target to be achieved in this study is to find the best blade design in an optimal way using the chord and twist linearization method, the result will be a performance graph of the Coefficient power (C_p) and Tip speed ratio (TSR). Based on the results of the research that has been done, the results show that the SG6043 Taper airfoil blade with a twist distribution from the hub is 10.77 to the tip of 0.91 and the chord distribution is 0.120 m at the hub and 0.042 m at the base. The results of the test for the variation of chord and twist linearization showed that the point of

lineization of twist at 55% and chord at 25% resulted in a Power coefficient (Cp) of 52.6% with an optimal tip speed ratio of 4.5.

Keywords: *micro-scale wind turbines, Power coefficient (Cp), tip speed ratio (TSR), turbine blades, Qblade software*

1. PENDAHULUAN

Listrik adalah salah satu kebutuhan utama dikehidupan ini. Dengan adanya listrik kita bisa mengoperasikan perangkat elektronik yang ada dikehidupan sehari-hari. Seiring berjalannya waktu, permintaan listrik selalu meningkat dibandingkan dengan jenis energi lainnya. Sektor kelistrikan dapat meningkatkan aktivitas ekonomi diatas rata-rata, meningkatkan pendapatan nasional negara dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat [1].

Pertumbuhan listrik pada tahun 2050 dipastikan naik hampir 9 kali lipat. Sesuai PP No.79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, indonesia memiliki target bauran EBT paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Saat ini indonesia telah memanfaatkan EBT sebesar 14% pada tahun 2018. Minimnya pengembangan serta pemanfaatan EBT masih relatif tinggi dikarenakan sulit bersaing dengan pembangkit fosil seperti batubara dan kurang didukungnya industri dalam pendanaan hingga pengembangan EBT ini [2].

Secara geografis indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki iklim tropis dan kecepatan angin itu sendiri ada direntang 2 m/s – 6 m/s yang termasuk kecepatan angin minimum [3]. Dalam hal ini indonesia memiliki keuntungan untuk mengembangkan pembangkit listrik dengan memanfaatkan angin. Angin dapat mempengaruhi performa dari turbin salah satunya pada bagian bilah turbin itu sendiri. Bilah atau Propeller merupakan salah satu komponen terpenting dalam mendesain turbin angin, bilah secara langsung menjadi bagian transisi untuk merubah angin menjadi energi gerak berupa putaran poros lalu disalurkan kepada generator untuk mengubahnya menjadi energi dalam bentuk listrik.

Di indonesia sudah ada yang mengembangkan dan meriset angin dengan cara pemanfaatan energi angin menggunakan media turbin angin skala mikro. PT. Lentera Bumi Nusantara terletak di bagian selatan jawa barat tepatnya pesisir tasikmalaya. Namun turbin angin akan memiliki kemampuan berbeda-beda dalam menangkap energi angin. Salah satunya adalah komponen bilah yang merupakan komponen utama dalam mengekstrak energi angin tersebut. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian/riset mendalam mengenai bilah turbin angin sehingga mendapatkan performa yang tinggi dan dapat menyerap angin secara maksimal.

Berdasarkan hal tersebut penulis ingin melakukan penelitian untuk mengoptimasi perancangan bilah dengan menggunakan metode variasi linearisasi *chord* dan *twist* angle pada turbin angin sumbu horizontal menggunakan software Microsoft Excel untuk pengolahan data. Lalu dianalisa menggunakan Qblade untuk melihat performa bilah yang terjadi pada turbin angin tersebut. Dengan harapan penelitian ini dapat menjadi acuan dalam perancangan bilah turbin angin.

Angin merupakan salah satu energi dan dibuktikan dalam Hukum kekekalan energi yang menyatakan bahwa energi itu tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, tetapi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Untuk mengubah energi angin maka dibutuhkan suatu alat konversi seperti turbin angin. Turbin angin mengubah energi angin menjadi putaran lalu disalurkan ke dalam roda gigi (jika memakai gearbox) atau ke dalam generator untuk diubah selanjutnya menjadi listrik berupa fasa AC. Karena angin adalah suatu energi, maka energi angin dapat dinyatakan sebagai energi kinetik yaitu sebagai berikut :

$$E_K = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

Dimana :

E_K = Energi kinetik (J)
 m = Massa benda (kg)

v = Kecepatan (m/s)

Berdasarkan formula diatas, maka daya sama dengan jumlah energi per satuan waktu sehingga daya angin dapat dinyatakan dalam bentuk berikut :

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

Dimana :

P_{angin} = Daya angin (W)

ρ = Densitas udara = 1,225 (kg/m³)

v = kecepatan udara (m/s)

A = luas sapuan bilah (m²)

Proses pemanfaatan angin dapat dilakukan dua tahap. Pertama hembusan angin akan menggerakkan rotor hingga berputar. putaran rotor tersebut terhubung dengan generator, output yang dihasilkan dari generator inilah yang akan digunakan berupa arus listrik. Untuk melihat potensi dari kondisi angin tersebut bisa dilihat pada tabel 1 [4].

Tabel 1. Klasifikasi Kecepatan Angin [4]

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter diatas permukaan atas		
No	Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
1	0.00 – 0.02
2	0.3 – 1.5	Angin tenang
3	1.6 – 3.3	Asap bergerak
4	3.4 – 5.4	Daun bergoyang
5	5.5 – 7.9	Ranting bergoyang
6	8.0 – 10.7	Bendera berkibar
7	10.8 – 13.8	Air bergerak
8	13.9 – 17.1	Ujung pohon melengkung
9	17.2 – 20.7	Jalan berat melawan arah angin
10	20.8 – 24.4	Rumah rubuh
11	24.5 – 28.4	Pohon rubuh
12	28.5 – 32.6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32.7 – 36.9	Tornado

Klasifikasi angin pada skala 1.6 m/s hingga 3.3 m/s adalah batas minimum dan angin pada skala 13.9 m/s hingga 17.1 m/s adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Energi angin dapat diekstrak ke dalam bentuk lain seperti energi listrik dan energi mekanik dengan menggunakan suatu sistem konversi energi seperti turbin angin [5]. Daya adalah energi per satuan waktu dan berbanding lurus dengan kerapatan udara dan kecepatan angin, dan dapat dibentuk menjadi persamaan sebagai berikut

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3)$$

Dimana :

P = Daya angin (W)

ρ = Densitas udara = 1,225 (kg/m³)

V = Kecepatan angin (m/s)

Karena kerapatan udara memiliki perbedaan di dataran rendah dan dataran tinggi, maka energi angin di daerah pantai akan jauh lebih besar daripada di pegunungan. Ini bisa dilihat dari persamaan diatas bahwa apabila di suatu tempat memiliki kecepatan angin 2 kali lebih cepat dari tempat itu maka tempat itu memiliki energi angin sebesar 8 kali lipat lebih besar. Oleh karena itu penentuan tempat sangat mempengaruhi angin yang dapat diserap oleh turbin angin. Daya angin maksimum dapat di ekstrak oleh sistem turbin angin dengan luas sapuan rotor (A) adalah :

$$P = 0.59 \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4)$$

Dimana :

- P = Daya angin (W)
- ρ = Densitas udara = 1,225 (kg/m³)
- A = Luas sapuan pada bilah (m²)
- V = Kecepatan angin (m/s)

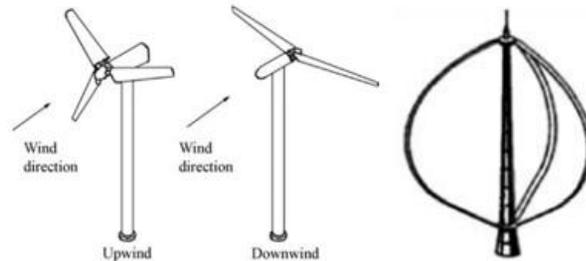
Angka 0.59 ini disebut Betz Limit, angka tersebut menunjukkan bahwa efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh suatu sistem rotor turbin angin. Pada kenyataannya karena terjadi losses gesekan dan losses pada bagian ujung tip bilah, maka efisiensi yang dapat dicapai rotor akan mendapatkan angka yang lebih kecil yaitu berkisar 0.45 pada keadaan maksimum. Maka daya yang dapat diserap oleh turbin angin sebagai berikut :

$$P = \eta \cdot \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (5)$$

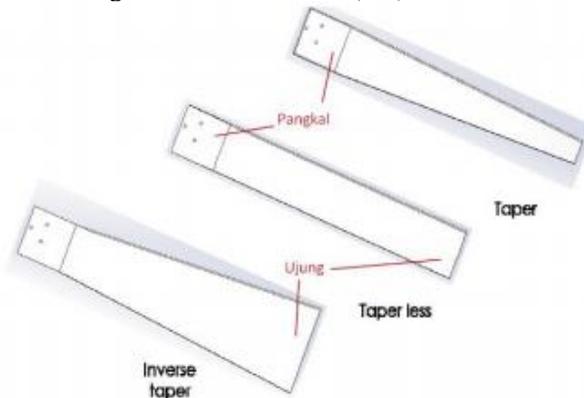
Dimana :

- P = Daya angin (W)
- ρ = Densitas udara = 1,225 (kg/m³)
- A = Luas sapuan pada bilah (m²)
- V = Kecepatan angin (m/s)
- η = Efisiensi Maksimum

Seiring berkembangnya zaman, perkembangan teknologi seperti turbin angin modern hingga saat ini memiliki kualitas 100 kali lebih kuat dibandingkan beberapa tahun yang lalu [6]. Sehingga hasilnya dapat disalurkan dengan menggunakan kabel transmisi dan dapat didistribusikan ke rumah, gedung, lampu jalan, dan lain-lain. Pada gambar 1 berikut ini adalah jenis turbin angin :



Gambar 1. Turbin Angin Sumbu Horizontal (kiri) dan Sumbu Vertikal (kanan)[7]



Gambar 2. Tiga jenis Bilah Turbin Angin Sumbu Horizontal [7]

Berdasarkan jenisnya, bilah dibedakan menjadi 3 jenis yaitu sebagai berikut :

- Taper yaitu bilah yang memiliki geometri lebar *chord* mengecil dari pangkal ke ujung serta cocok untuk angin berkecepatan tinggi
- Taperless yaitu bilah yang memiliki geometri lebar *chord* sama dari pangkal ke ujung serta cocok untuk angin berkecepatan sedang.
- Inverse Taper yaitu bilah yang memiliki geometri lebar *chord* membesar dari pangkal ke ujung serta cocok untuk angin berkecepatan rendah.

Pemilihan geometri bilah sangat penting dalam desain perancangan, karena dapat berpengaruh terhadap putaran yang diterima oleh angin pada saat menabrak luas sapuan bilah dan disesuaikan dengan kondisi angin yang ada.

1.1 TIP SPEED RATIO

Tip speed ratio atau biasa disebut TSR adalah angka perbandingan dari kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin yang dilewati bilah untuk berputar. Nilai TSR tip speed ratio yang tinggi dan rendah akan berpengaruh terhadap turbin angin, pada saat nilai TSR > 1 menunjukkan bahwa lebih banyak bagian bilah yang mengalami gaya angkat (*lift*). Sedangkan jika pada saat nilai TSR < 1 maka lebih banyak bagian dari bilah yang akan mengalami gaya hambat. Untuk mendapatkan nilai tip speed ratio dapat menggunakan persamaan :

$$\lambda = \frac{r}{R} \times \lambda R \quad (6)$$

Dimana :

- λ = *Tip speed ratio*
- r = *Tip speed ratio* Parsial
- R = Jari-Jari Parsial (m)
- λR = TSR yang digunakan

Untuk Angka TSR yang tinggi memiliki kelebihan dalam hal koefisien daya (C_p) dan kecepatan rotor untuk berputar. Sedangkan kelemahan adalah jika digunakan pada kecepatan angin yang sangat rendah maka dibutuhkan biaya produksi yang tinggi dan memerlukan putaran awalan yang bagus. Disisi lain untuk TSR yang rendah memiliki kelebihan dalam hal torsi yang dihasilkan tinggi, dan biaya produksi yang dapat ditekan, sedangkan kelemahan dari TSR rendah yaitu koefisien yang dihasilkan akan kecil. TSR rendah juga dapat digunakan untuk kecepatan angin rendah.

1.2 COEFFICIENT POWER (C_p)

Koefisien daya atau lebih sering disebut *Power coefficient* adalah kemampuan bilah dalam menyerap energi yang diterimanya. Diasumsikan jika nilai C_p adalah 50% maka kemampuan menyerap energi angin adalah 50% yang akan diteruskan menuju rotor generator, sisanya akan dibuang begitu saja. Menurut teori betz jika koefisien daya yang dihasilkan adalah 50%, maka tidak sepenuhnya dapat diserap 50%. Terjadi fenomena seperti itu karena C_p akan mengalami rugi-rugi yang berasal dari sistem. Performa dari turbin angin itu sendiri dapat dinyatakan dengan koefisien daya (C_p), dimana :

$$C_p = \frac{P}{P_{\text{angin}}} = \frac{\frac{1}{2} \rho AU^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho AU^3} \quad (7)$$

Dari persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (8)$$

Dimana :

- C_p = *Coefficient Power*
- a = Induksi Aksial

Perancangan bilah dibutuhkan beberapa parameter-parameter, salah satunya adalah menentukan kapasitas energi listrik yang akan dihasilkan dan efisiensi dari sistem tersebut. Dalam

buku “Windpower Workshop” yang ditulis oleh Piggot H. pada tahun 1997 energi angin dapat dikonversikan turbin angin dengan nilai *Power coefficient* (C_p) sebesar 59.3% akan tetapi pada kenyataannya akan mengalami rugi-rugi yang berasal dari sistem seperti loss dari generator, loss Controller serta komponen lainnya dan ini berdasarkan teori betz [9].

Perancangan bilah dimulai dengan menentukan efisiensi berdasarkan asumsi yang berasal dari Qblade. Jika kita memasukan suatu airfoil maka akan muncul grafik efisiensi bilah. Seluruh nilai efisiensi tersebut dikalkulasikan berdasarkan kenyataannya, dengan asumsi bilah dan komponennya maka dapat dicari dengan mengalikan efisiensi sistem seperti η bilah, η transmisi, η generator, η controller.

Selanjutnya daya angin yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya listrik. Diasumsikan daya listrik sebesar 500 W, nilai daya listrik ini disesuaikan dengan generator yang dipakai yaitu TSD-500 yang artinya The Sky Dancer dengan kapasitas 500 W, maka dengan efisiensi yang telah diketahui sebelumnya maka dapat ditemukan daya angin tersebut dengan menggunakan persamaan :

$$Wa = \frac{We}{K} \quad (9)$$

Dimana :

- Wa = Daya Angin (W)
- We = Kapasitas daya listrik (W)
- K = Efisiensi Sistem Keseluruhan

Setelah daya angin tersebut telah diketahui dari rumus tadi, selanjutnya mencari luas sapuan bilah. luas sapuan tersebut merupakan area yang akan dilewati oleh angin dan mendorong bagian bilah tersebut. Berdasarkan teori jika luas sapuan semakin besar maka energi angin yang diterima akan besar, sebaliknya jika luas sapuan semakin kecil maka energi angin yang akan kecil. Luas sapuan tersebut dapat dicari menggunakan rumus sebagai berikut :

$$A = \frac{2 Wa}{\rho v_{max}^3} \quad (10)$$

Dimana :

- A = Luas sapuan bilah (m^3)
- Wa = Daya angin (W)
- ρ = Densitas udara = 1,225 (kg/m^3)
- Vmax = Kecepatan angin maksimum (m/s)

Luas sapuan telah didapat, selanjutnya mencari jari-jari bilah. Dan dapat ditentukan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (11)$$

- R = jari-jari bilah (m)
- A = luas sapuan bilah (m^2)

Setelah didapat jari-jari bilah, selanjutnya menentukan parameter yang akan dirancang meliputi airfoil yang dipakai, TSR, nilai Cl/Cd , nilai *chord* atau lebar dari bilah tersebut, dan jumlah bilah yang dipakai. Setelah ditentukan parameter tersebut maka dapat perkiraan perancangan bilah dengan mencari pembagian elemen pada bilah. Pada PT. Lentera Bumi Nusantara pembagian elemen berkisar 10 elemen, tetapi jika ingin mendapatkan nilai yang lebih spesifik bisa memakai pembagian elemen lebih dari 10. Rumus pembagian elemen tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$r = 0,25 + \left[\left(\frac{R-0,25}{n} \right) \times (elemen) \right] \quad (12)$$

Dimana :

- r = Jari-jari parsial (m)
- R = Jari-jari yang digunakan (m)
- n = Jumlah elemen keseluruhan

Setelah didapat elemen, selanjutnya menentukan nilai *Tip speed ratio* untuk turbin angin. Pada buku “Windpower Workshop” yang ditulis oleh Piggot H. pada tahun 1997, dalam referensi tersebut

dipaparkan tabel meliputi *tip speed ratio*, jumlah bilah, dan penggerak dari turbin itu sendiri. Dapat dilihat pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Nilai *Tip speed ratio* [11]

TSR	Jumlah Bilah	Penggerak
1	6 – 20	<i>Slow pumps</i>
2	4 – 12	<i>Faster pumps</i>
3	3 – 6	<i>Dutch 4-bladed</i>
4	2 – 4	<i>Slow generator</i>
2 – 8	2 – 3	<i>Generator</i>
8 - 15	1 – 2	<i>Fastest possible</i>

Untuk mencari nilai *tip speed ratio* parsial dapat menggunakan rumus

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \times \lambda R \quad (13)$$

Dimana :

- λ_r = *Tip speed ratio* Parsial
- r = Jari-jari parsial (m)
- R = Jari-jari yang digunakan yaitu 0.8 meter
- λR = *Tip speed ratio* yang digunakan yaitu 7

Selanjutnya menentukan *chord* karena dalam penelitian ini adalah berjenis taper dimana di tiap elemennya memiliki lebar berbeda-beda, jenis bilah *taper* ini dipilih dengan keadaan di lapangan yaitu 12 m/s berdasarkan penelitian terkait potensi angin di pesisir Jawa [8]. Karena angin yang digunakan adalah 12 m/s maka berdasarkan jenis bilah yang ada, taper adalah yang paling tepat karena cocok untuk angin berkecepatan tinggi. Setelah didapat nilai *tip speed ratio* selanjutnya menghitung jumlah *chord* dengan persamaan :

$$Cl = \frac{16\pi \times R \times (\frac{R}{r})}{9\lambda^2 \times B \times Cr} \quad (14)$$

Dimana :

- B = Jumlah bilah yang digunakan
- Cr = jumlah *chord* (m)

Setelah didapatkan lebar *chord* di setiap elemennya maka kita selanjutnya menentukan sudut aliran udara α dan dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (15)$$

Dimana :

- ϕ = Flow angle / sudut alir (Degree)
- λ_r = *Tip speed ratio* parsial

Sedangkan untuk sudut aliran udara β dapat dicari menggunakan sudut aliran udara α dengan melihat grafik pada software Qblade. Setelah didapat sudut aliran β selanjutnya menghitung sudut puntir dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\beta = \phi - \alpha \quad (16)$$

- β = Puntiran / *Twist* (deg)
- ϕ = Sudut Aliran (deg)
- α = Angle of Attack (deg)

Nilai puntiran tersebut sangat mempengaruhi dalam perancangan bilah, karena hingga tahap ini akan mendapatkan puntiran yang sangat ekstrim maka digunakanlah linearisasi di tiap elemennya. Linearisasi dianalisa tiap elemen untuk mendapatkan karakteristik yang optimal dengan menghitung persen dari jumlah bilah tersebut. Untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal maka elemen harus dibagi sekecil mungkin. Hasilnya adalah linearisasi dapat mempengaruhi nilai C_p dan TSR dari bilah tersebut. Dalam penelitian ini akan dilakukan linearisasi untuk *twist* dan *chord* nya. Sebagai contoh jika ingin dilinearisasi 50% dari bilah tersebut maka titik elemen diambil dari bagian

tengah geometri bilah. Lalu nilai tersebut didapat dari persamaan yang dikeluarkan oleh excel dan dapat dihitung untuk melihat karakteristik C_p dan TSR nya.

Bilah perlu dilakukan linearisasi karena dapat memudahkan proses manufaktur bilah. Linearisasi juga ditentukan dengan menggunakan persen per satuan panjang bilah. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Saoke (2015), Metode linearisasi dilakukan dengan menggunakan panjang bilah dan titik yang akan dilakukan linearisasi. Dari titik yang telah dipilih dapat diolah menggunakan beberapa aplikasi salah satunya adalah excel, karena yang akan digunakan adalah persamaan yang dikeluarkan oleh trendline grafik tersebut. Pemilihan titik untuk dilinearisasi harus dilakukan dengan sangat hati-hati karena keputusan yang buruk dapat mempengaruhi efisiensi rotor [10].

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi dengan bantuan perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan adalah Microsoft Excel dan *Qblade*. Adapun target yang ingin dicapai pada penelitian ini yaitu mencari desain bilah yang terbaik dengan cara optimasi menggunakan metode linearisasi *chord* dan *twist*, hasil akhirnya akan didapat grafik performansi *Coefficient power* (C_p) dan *Tip speed*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Geometri bilah memiliki parameter-parameter yang akan digunakan dalam perancangan. Ada dua parameter yang digunakan yaitu variabel tetap yang akan dihitung dan variabel bebas. variabel yang ditetapkan yaitu kapasitas daya listrik yang digunakan, efisiensi sistem (bilah, transmisi, generator, controller), jumlah bilah yang digunakan, *Tip speed ratio* dan karakteristik angin berdasarkan letak geografis tersebut. Sedangkan airfoil digunakan sebagai variabel bebas. Pada parameter awal ini dilakukan penentuan besar kapasitas listrik yang dibutuhkan, kapasitas listrik ini ditentukan oleh pendesain generator dan kapasitas tersebut berpengaruh terhadap ukuran dan dimensi bilah. Dalam penelitian ini digunakan daya listrik maksimal yang akan dihasilkan adalah sebesar 500 W pada kecepatan angin 12 m/s. Nilai daya listrik ini disesuaikan dengan generator yang dipakai yaitu TSD-500 yang artinya The Sky Dancer dengan kapasitas 500 W, serta nilai kecepatan angin disesuaikan dengan keadaan di lapangan yaitu 12 m/s berdasarkan penelitian terkait potensi angin di pesisir Jawa [8]. Maka parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter dan Karakteristik Airfoil SG6043

Kapasitas daya listrik	Efisiensi					Daya angin	V max
	Bilah	Generator	Transmisi	Controller	Sistem		
500	0.3	0.9	0.9	0.9	0.219	2286.24	12
	0.4				0.292	1714.68	
Massa jenis udara (ρ)		Luas sapuan (A)		Jari-jari (R)	Jari-jari yang digunakan (R)		
1,225		2.160		0.83	0.8		
		1.620		0.72			

Setelah didapat jari-jari yang akan digunakan yaitu 0.8 meter dan kecepatan angin maksimum yang dipakai adalah 12 m/s maka digunakan jenis bilah Taper dalam penelitian ini, selanjutnya dilakukan pembagian elemen. Dalam penelitian ini menggunakan 10 elemen, karena panjang bilah tergolong pendek hanya sebesar 0.8 meter maka tidak diperlukan pembagian elemen terlalu banyak. elemen ini berguna untuk proses manufaktur bilah itu sendiri dalam memudahkan pembuatan, jika memakai material kayu itu sangat diperlukan karena bilah yang akan dibuat dari kayu memerlukan referensi ukuran pembuatan dari setiap elemen yang ada.

Tabel 4. Data geometri bilah airfoil SG6043

Elemen	R (m)	TSR Parsial	Flow Angle (Degree)	Twist (Degree)	Chord (m)
0	0.17	1.49	22.608	19.61	0.077
1	0.23	2.04	12.419	14.42	0.056
2	0.3	2.59	14.074	11.07	0.044
3	0.36	3.14	11.772	8.77	0.037
4	0.42	3.69	10.102	7.1	0.031
5	0.49	4.24	8.84	5.84	0.027
6	0.55	4.8	7.853	4.85	0.024
7	0.61	5.35	7.063	4.06	0.022
8	0.67	5.9	6.416	3.42	0.020
9	0.74	6.45	5.876	2.88	0.018
10	0.8	7	5.42	2.42	0.016

Didapat nilai sudut puntir pada elemen 0 yaitu 19.61° hingga elemen 10 yaitu 2.42°. Nilai sudut puntiran ini cukup ekstrim khususnya pada manufaktur bilah penggunaan material kayu karena dapat mempersulit dalam pembentukan geometri bilah itu sendiri. Jika terlalu terpuntir maka diperlukan linearisasi garis untuk memudahkan proses manufaktur bilah. pada tabel 4 merupakan data geometri sebelum dilakukan linearisasi.

Setelah didapat data tersebut, maka selanjutnya dilakukan linearisasi sudut puntir dengan asumsi titik linearisasi *chord* yaitu pada 75%, asumsi ini diambil berdasarkan panjang keseluruhan bilah agar sudut puntir bilah tidak terlalu runcing. Didapat persamaan dari garis linear tersebut serta nilai *x* dari persamaan dikalkulasikan dengan nilai jari-jari parsial (*r*). Untuk hasil uji yang bernilai negatif maka hasil tersebut tidak bisa diterapkan pada bilah turbin angin.

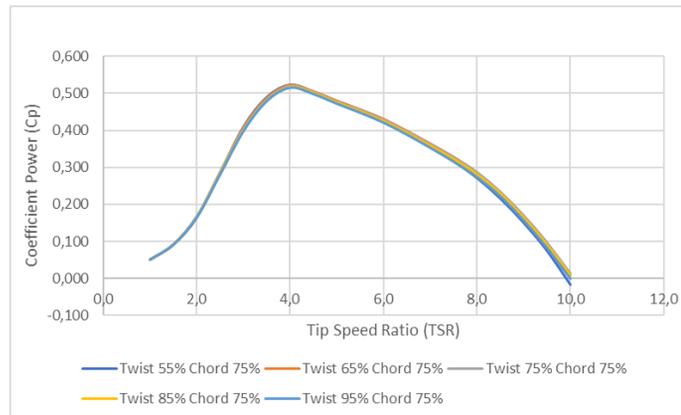
Tabel 5. Hasil pengujian variasi *twist* terhadap *chord* pada 75%

Titik Linearisasi	<i>Twist</i> Linear		Hasil Uji <i>Twist</i>	Hasil Uji <i>Chord</i>
	Sebelum	<i>Chord</i> Linear		
	Degree (°)	(m)		
<i>Twist</i> 5%, <i>Chord</i> 75%	19.61 – -32.29	0.077 – 0.016	Tidak	Lolos
<i>Twist</i> 15%, <i>Chord</i> 75%	17.76 - -15.68	0.077 – 0.016	Tidak	Lolos
<i>Twist</i> 25%, <i>Chord</i> 75%	15.68 - -7.34	0.077 – 0.016	Tidak	Lolos
<i>Twist</i> 35%, <i>Chord</i> 75%	13.78 - -2.92	0.077 – 0.016	Tidak	Lolos
<i>Twist</i> 45%, <i>Chord</i> 75%	12.15 - -0.47	0.077 – 0.016	Tidak	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 75%	10.77 – 0.91	0.077 – 0.016	Lolos	Lolos
<i>Twist</i> 65%, <i>Chord</i> 75%	9.60 – 1.69	0.077 – 0.016	Lolos	Lolos
<i>Twist</i> 75%, <i>Chord</i> 75%	8.59 – 2.12	0.077 – 0.016	Lolos	Lolos
<i>Twist</i> 85%, <i>Chord</i> 75%	7.73 – 2.34	0.077 – 0.016	Lolos	Lolos
<i>Twist</i> 95%, <i>Chord</i> 75%	6.98 – 2.42	0.077 – 0.016	Lolos	Lolos

Dari hasil pengujian pada Tabel 5 didapat bahwa ada lima titik linearisasi yang tidak lolos uji karena bernilai negatif pada hasil uji sudut puntir (*twist*). Maka kelima hasil tersebut tidak bisa dilanjutkan untuk dianalisa menggunakan perangkat lunak *Qblade*. Untuk melihat hasil simulasi *Cp* terhadap TSR tersebut bisa dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 3 berikut :

Tabel 6. Hasil simulasi CP – TSR pada variasi sudut puntir (*twist*) dan *chord* pada 75%

Titik Linearisasi	Cp	TSR
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 75%	52.2 %	4
<i>Twist</i> 65%, <i>Chord</i> 75%	52.1 %	4
<i>Twist</i> 75%, <i>Chord</i> 75%	51.9 %	4
<i>Twist</i> 85%, <i>Chord</i> 75%	51.8 %	4
<i>Twist</i> 95%, <i>Chord</i> 75%	51.6 %	4



Gambar 3. Grafik simulasi CP – TSR pada variasi sudut puntir (*twist*) dan *chord* pada 75% menggunakan software Qblade

Berdasarkan hasil pengujian variasi sudut puntir (*twist*) dan *chord* pada 75% didapat bahwa titik linearisasi sudut puntir (*twist*) pada 55% menghasilkan *coefficient power* (Cp) sebesar 52,2% dengan *Tip speed ratio* sebesar 3. Maka hasil pengujian linearisasi sudut puntir (*twist*) pada 55% dipilih untuk proses perancangan selanjutnya yaitu variasi linearisasi lebar airfoil (*chord*).

Tabel 7. Hasil pengujian linearisasi sudut puntir pada 55% dan variasi *chord*

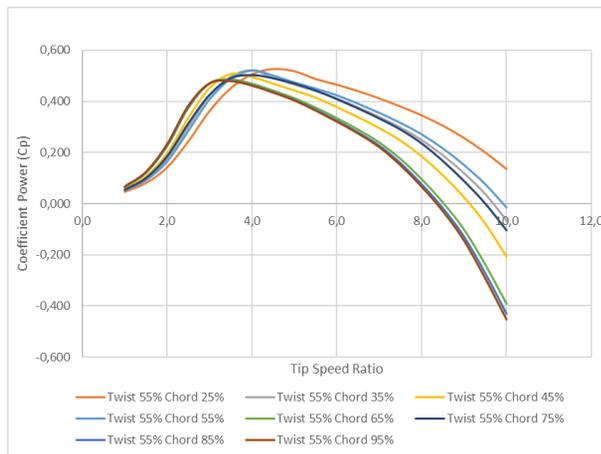
Titik Linearisasi	Sebelum	Sesudah	Penambahan	Hasil Uji
	Linearisasi (m)	Linearisasi (m)	agar 0,12 m	
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 5%	0.077 – 0.016	0.120 - -0.089	-	Tidak
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 15%	0.077 – 0.016	0.068 - -0.052	0.120 – 0.000	Tidak
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 25%	0.077 – 0.016	0.060 - -0.018	0.120 – 0.042	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 35%	0.077 – 0.016	0.053 - -0.002	0.120 – 0.065	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 45%	0.077 – 0.016	0.047 – 0.007	0.120 – 0.080	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 55%	0.077 – 0.016	0.043 – 0.012	0.120 – 0.089	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 65%	0.077 – 0.016	0.039 – 0.014	0.120 – 0.095	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 75%	0.077 – 0.016	0.036 – 0.015	0.120 – 0.099	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 85%	0.077 – 0.016	0.033 – 0.016	0.120 – 0.103	Lolos
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 95%	0.077 – 0.016	0.031 – 0.016	0.120 – 0.105	Lolos

Dari hasil pengujian pada Tabel 7 didapat bahwa ada dua titik linearisasi yang tidak lolos uji karena bernilai negatif dan bernilai 0 (tidak memiliki bentuk airfoil diujung bilah) pada hasil penambahan angka agar *chord* tersebut berjumlah 12 cm untuk disesuaikan untuk ukuran pangkal bilah. Maka kedua hasil tersebut tidak bisa dilanjutkan untuk dianalisa menggunakan perangkat

lunak *Qblade*. Untuk melihat hasil simulasi C_p – TSR pada linearisasi sudut puntir (*twist*) 55% dan variasi *chord* dapat dilihat pada Gambar 4 dan tabel 8:

Tabel 8. Hasil simulasi C_p – TSR pada linearisasi sudut puntir (*twist*) pada 55% dan variasi *chord*

Titik Linearisasi	C_p	TSR
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 25%	52.6 %	4.5
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 35%	52.2 %	4
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 45%	50.6 %	3.5
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 55%	52.2 %	4
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 65%	48.5 %	3.5
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 75%	50.2 %	4
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 85%	48.1 %	3.5
<i>Twist</i> 55%, <i>Chord</i> 95%	47.9 %	3.5



Gambar 4. Grafik simulasi C_p – TSR pada sudut puntir (*twist*) 55% dan variasi *chord* menggunakan perangkat lunak *Qblade*

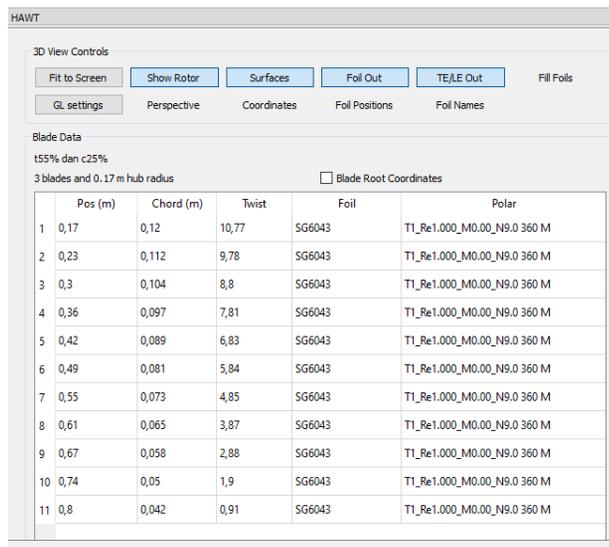
Dari Gambar 4 dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *Qblade* yaitu Rotor BEM Simulation untuk melihat *coefficient power* (C_p) dan *Tip speed ratio* (TSR). Berdasarkan hasil simulasi pada tabel 8 variasi linearisasi *chord* didapat bahwa titik linearisasi *chord* pada 25% menghasilkan *coefficient power* (C_p) sebesar 52.6% dengan *Tip speed ratio* sebesar 4.5.

Pada generator yang dipakai yaitu memiliki spesifikasi TSD-500 memiliki pergerakan generator jika angin yang diterima pada bilah terlalu besar dan bilah tersebut berputar terlalu cepat maka sistem akan memutar generator beserta bilahnya melawan arah angin agar turbin aman dari kerusakan, tetapi jika turbin tetap diimplementasikan dengan bilah yang sebelum dilinearisasi sangat tidak efisien dikarenakan sistem perputaran generator tersebut dan pertimbangan lainnya adalah bentuk geometri bilah yang sangat tipis dapat menyebabkan keretakan dan patah dengan sangat cepat, maka grafik sesudah dilinearisasi sangat mungkin diimplementasikan karena dapat menjaga *Tip speed ratio* dari kecepatan putar, pada TSR 4-5 dapat menghasilkan *Coefficient power* (C_p) hingga 52.6 %.

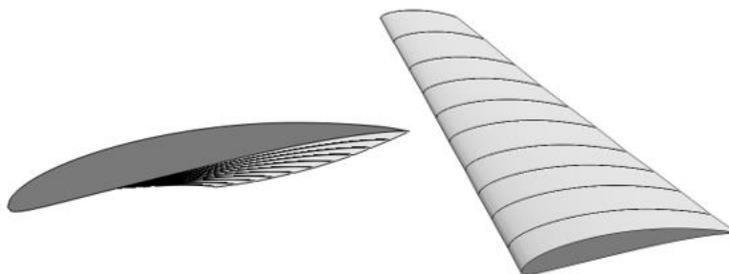
Tabel 9. Data airfoil yang akan dipakai pada desain bilah

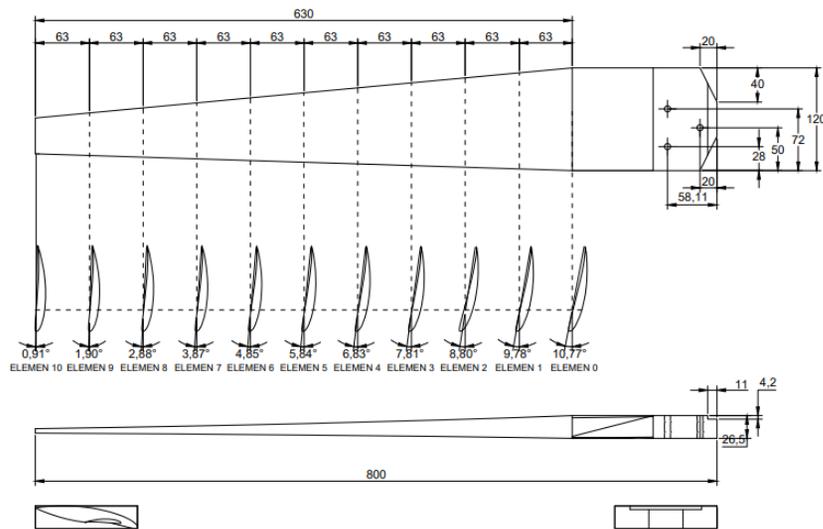
No	r (m)	Chord (m) (m)	Twist (degree)	Airfoil
0	0.17	0.12	10.77	SG6043
1	0.23	0.112	9.78	SG6043
2	0.3	0.104	8.8	SG6043
3	0.36	0.097	7.81	SG6043
4	0.42	0.089	6.83	SG6043
5	0.49	0.081	5.84	SG6043
6	0.55	0.073	4.85	SG6043
7	0.61	0.065	3.87	SG6043
8	0.67	0.058	2.88	SG6043
9	0.74	0.05	1.9	SG6043
10	0.8	0.042	0.91	SG6043

Data pada Tabel 9 dimasukkan ke dalam perangkat lunak *Qblade* diantaranya jari-jari parsial (r), *chord* (m), *twist*, dan airfoil yang digunakan, Pada Gambar 5 adalah input data pada perangkat lunak *Qblade* desain bilah taper SG6043 dan Gambar 6 adalah hasil perbesaran dari desain bilah taper SG6043 serta dimensi dari geometri.



Gambar 5. Penginputan data airfoil pada perangkat lunak *Qblade*





Gambar 6. Hasil desain bilah taper SG6043

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mendapatkan hasil bahwa bilah airfoil SG6043 *Taper* dengan titik *chord* pada 75% dan variasi sudut puntir pada 55%, 65%, 75%, 85%, 95% didapat nilai tertinggi pada titik *twist* 55% dengan hasil *coefficient power* (C_p) sebesar 52.2% dan TSR sebesar 4. Lalu untuk hasil sudut puntir pada 55% dengan variasi *chord* pada titik 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85%, 95% didapat hasil tertinggi pada titik *twist* 55% dan *chord* 25% dengan nilai *coefficient power* (C_p) sebesar 52.6% dengan nilai TSR sebesar 4.5.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis kepada berbagai pihak yang turut mendukung dalam penelitian ini, terutama kepada Bapak Ing. Reza Setiawan, M.T. dan Oleh, S.T, M.T, sebagai pembimbing dalam penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Adam and M. T. Sambodo, "Indonesia's Dynamic Electricity Power Sector: Investigating Need and Supply Performance," *Econ. Financ. Indones.*, vol. 61, no. 1, p. 53, 2015.
- [2] Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, "Indonesia Energy Outlook 2019," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [3] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, "Kecepatan Angin dan Kelembaban di Stasiun Pengamatan BMKG 2011-2015." Badan Pusat Statistik, 2015.
- [4] M. N. Habibie, A. Sasmito, and R. Kurniawan, "Kajian Potensi Energi Angin Di Wilayah Sulawesi Dan Maluku," *J. Meteorol. dan Geofis.*, vol. 12, no. 2, pp. 181–187, 2011. doi: 10.31172/jmg.v12i2.99.
- [5] Y. Daryanto, "Kajian Potensi angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu," in BALAI PPTAGG – UPT" 2020.-LAGG, 2007.
- [6] A. Bachtiar, "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras," *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 34–45, 2018. doi: 10.21063/jte.2018.3133706.

- [7] Lentera Bumi Nusantara, “Dasar - dasar Perancangan Bilah.” 2020.
- [8] N. H. Sari and W. G. Laksamana, “Perancangan bilah tipe taperless pada kincir angin: Studi kasus di PT. Lentera Bumi Nusantara Tasikmalaya,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, p. 104, 2019. doi: 10.29303/dtm.v9i2.286.
- [9] H. Piggott, *Windpower Workshop*. 1997.
- [10] C. Otieno Saoke, “Power Performance of an Inversely Tapered Wind Rotor and its Air Flow Visualization Analysis Using Particle Image Velocimetry (PIV),” *Am. J. Phys. Appl.*, vol. 3, no. 1, p. 6, 2015. doi: 10.11648/j.ajpa.20150301.12