

PERANCANGAN BILAH *TAPER* PADA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL

DESIGN OF TAPER IN HORIZONTAL AXIS WIND TURBIN

Fadilah Novyanti Rangkuti¹, Mamat Rokhmat², Inayah N Zahra³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

¹fadilahnovyanti@students.telkomuniversity.ac.id, ²mamatrokhmat@telkomuniversity.ac.id

³inayahnzahra@gmail.com

Abstrak

Bilah adalah salah satu komponen turbin angin yang berfungsi untuk mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik. Pada penelitian ini telah dibuat rancangan bilah jenis *taper* turbin angin *The Sky Dancer* yaitu daya listrik sebesar 500 watt pada kecepatan angin sebesar 12 m/s, sumbu horizontal dengan skala mikro, menggunakan *airfoil* NACA 6513 dan material yang digunakan yaitu kayu pinus. Proses perancangan dilakukan dengan simulasi yaitu menggunakan *software* Qblade untuk mengetahui performa bilah *taper* yang dirancang dan *software* desain tiga dimensi (3D) untuk membuat gambar 3D bilah *taper* dan menganalisis kekuatan struktur material dalam perancangan bilah *taper*. Hasil penelitian ini didapatkan rancangan bilah jenis *taper* pada *tip speed ratio* 7 memiliki *power coefficient* 49 % dengan daya *output* maksimal sebesar 1146 watt. Hasil analisis struktur material kayu pinus diperoleh nilai *stress* maksimal sebesar $5,295 \times 10^6$ N/m², *defleksi* maksimum sebesar 9,102 mm dan *factor of safety* sebesar $8,51 \times 10^5$.

Kata Kunci: *Taper, The Sky Dancer, Tip Speed Ratio*

Abstract

The blade is one of the wind turbine components that functions to convert wind energy into mechanical energy. In this research, a taper blade design for The Sky Dancer wind turbine has been designed, with an electric power 500 watt at a wind speed 12 m/s, a horizontal axis with a micro scale, using a NACA 6513 airfoil and the material used is pine wood. The design process is carried out by simulation using Qblade software to determine the performance of the designed taper blade and three-dimensional (3D) design software to create a 3D image of the taper blade and analyze the strength of the material in the design of the taper blade. The results of this research found that the taper blade design type at the tip speed ratio 7 has a power coefficient 49% with a total electrical energy 1146 watt. The analysis results of the pine wood material structure obtained a maximum stress value $5,295 \times 10^6$ N/m², a maximum deflection 9.102 mm and a factor of safety $8,51 \times 10^5$.

Keywords: *Taper, The Sky Dancer, Tip Speed Ratio*

1. Pendahuluan

Sumber energi listrik di Indonesia sebagian besar berasal dari energi fosil berupa bahan bakar minyak, gas dan batu bara yang ketersediannya mulai terbatas. Pemanfaatan energi terbarukan sebagai sumber pembangkit listrik diharapkan dapat menjadi salah satu solusi dari keterbatasan persediaan energi fosil dan masalah pencemaran lingkungan. Energi angin yang tidak terbatas dan ramah terhadap lingkungan merupakan salah satu alasan untuk memanfaatkan energi angin sebagai sumber listrik di Indonesia. Energi listrik dihasilkan dari angin dengan bantuan turbin angin menggunakan prinsip konversi energi.

Kecepatan angin di PT Lentera Bumi Nusantara memiliki rentang 3-12 m/s, jadi potensi energi angin di PT Lentera Bumi Nusantara cukup memadai untuk pengembangan energi terbarukan berbasis kincir angin [1]. Distribusi kecenderungan kecepatan angin suatu tempat akan mempengaruhi penentuan desain turbin angin, tetapi jumlah pengembangan turbin angin untuk kecepatan angin yang rendah masih sangat dikit. Oleh karena itu, perlu perancangan turbin angin yang sesuai dengan kecepatan rata-rata angin di PT Lentera Bumi Nusantara.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Arfie Ikhsan Firmansyah dan Zulkarnain yaitu perancangan bilah turbin pembangkit listrik tenaga angin (PLT-Angin) kapasitas 100 kW menggunakan studi aerodinamika. Penelitian pada perancangan bilah turbin dilakukan dengan pendekatan studi aerodinamika. Uji aerodinamika bilah turbin menggunakan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil penelitian dari perancangan bilah turbin ini didapatkan rancangan bilah turbin dengan efisiensi rotor 30,6 % [2]. Dari hasil penelitian yang telah dipaparkan, hasil penelitian bahwa nilai efisiensi sistem turbin angin pada waktu perancangan belum mengestrak energi angin dengan lebih baik artinya nilai efisiensi yang dihasilkan masih rendah.

Pada penelitian ini dilakukan perancangan bilah turbin angin sumbu horizontal dengan jenis bilah yaitu *taper* dengan kapasitas daya listrik dan jenis *airfoil* yang berbeda dengan penelitian sebelumnya yaitu memiliki kapasitas daya listrik sebesar 500 watt pada kecepatan angin 12 m/s, dengan menggunakan jenis *airfoil* empat digit yang memiliki nilai *lift coefficient* (Cl) / *drag coefficient* (Cd) tinggi untuk meningkatkan performa bilah, kemudian dianalisis kekuatannya untuk memastikan bilah dapat beroperasi dengan aman. Proses perancangan dilakukan dengan simulasi yaitu menggunakan *software* Qblade untuk mengetahui performa dari bilah dan *software* desain 3D yang digunakan untuk menganalisis kekuatan struktur material yang digunakan yaitu kayu pinus.

2. Dasar Teori dan Metodologi

2.1 Energi Angin

Energi angin adalah energi terbarukan yang berasal dari angin, yang berkembang pemanfaatannya saat ini. Energi angin juga merupakan energi kinetik, yaitu energi yang dihasilkan dari gerakan angin. Daya (P) atau energi angin per satuan waktu diperoleh persamaan sebagai berikut:

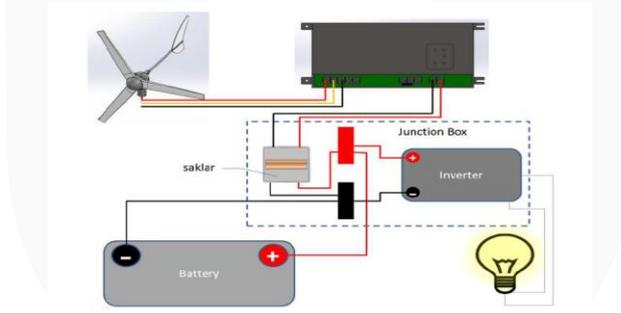
$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

Dimana:

- P : daya angin (watt)
 ρ : massa jenis udara (kg/m³)
 A : luas area (m²)
 v : kecepatan angin (m/s)

2.2 Turbin Angin Skala Mikro

Turbin angin skala mikro adalah turbin angin yang memiliki kapasitas daya kurang dari 40 kW dengan diameter bilah kurang dari 12 meter [3]. Turbin angin dibagi menjadi 2 jenis yaitu *horizontal axis* dan *vertical axis*. Turbin angin yang paling banyak digunakan saat ini adalah turbin angin *horizontal axis* (HAWT) yang merupakan turbin angin yang mempunyai ciri sumbu putar horizontal dengan bilah yang berputar dalam bidang vertikal. Pada penelitian juga menggunakan turbin angin jenis ini. Berikut adalah gambar yang menunjukkan kerja PLTB skala kecil yang digunakan di PT Lentera Bumi Nusantara.



Gambar 1. Skema Kerja PLTB Skala Kecil

Putaran bilah membuat generator berputar dan menghasilkan tegangan AC 3 fasa yang mewakili vektor arah angin, yaitu u, v, dan w. Kemudian dialirkan menuju controller dan hasil keluaran dari *controller* berupa tegangan dc (telah dikonversi dari AC menjadi DC karena media penyimpanan energi dalam bentuk DC). Setelah itu, dialirkan kembali menuju data *logger* untuk dilakukan perekaman data dan selanjutnya disimpan ke dalam baterai/aki. Sebelum digunakan ke beban (peralatan listrik AC), energi yang telah disimpan harus di konversi terlebih dahulu melalui inverter (tegangan DC menjadi AC) [4].

2.2.1 The Sky Dancer (Turbin Angin TSD-500)

The Sky Dancer merupakan turbin angin tipe HAWT dengan 3 baling-baling menggunakan generator permanen magnet 18 slot 16 pole dan sistem transmisi 3 fasa. Turbin ini mulai berputar pada kecepatan angin 2,5 m/s dan mulai memproduksi listrik pada kecepatan angin 3 m/s. Daya maksimal yang mampu dihasilkan oleh turbin adalah 500 Wattpeak (Wp) dengan panjang baling-baling 0,8 meter pada kecepatan angin 12 m/s dan di atasnya. Turbin ini dapat bertahan sampai pada kecepatan angin 33 m/s [4].

2.3 Bilah

Bilah merupakan bagian penting dalam suatu sistem pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), yaitu komponen yang berinteraksi langsung dengan angin berfungsi untuk mengubah gerak angin menjadi gerak mekanik.

Berdasarkan perancangannya, bilah turbin angin dibedakan menjadi 3 jenis yaitu: Bilah jenis *taper*, yaitu jenis bilah yang memiliki bentuk yang lebar ujungnya lebih kecil dibandingkan dengan lebar pangkal. Bilah jenis *taperless*, yaitu jenis bilah yang memiliki bentuk lebar pangkal dan ujung yang sama. Bilah jenis *inverse taper*, yaitu jenis bilah yang memiliki bentuk lebar ujungnya lebih besar dari pada lebar pangkal.

Adapun gaya yang bekerja pada bilah diantaranya yaitu gaya angkat (*lift*), gaya hambat (*drag*), gaya dorong (*thrust*) dan momen gaya (torsi). Untuk banyak bilah yang digunakan pada perancangan bilah *taper* ini sebanyak tiga bilah karena memiliki putaran yang lebih stabil.

Dalam merancang bilah turbin angin beberapa parameter yang digunakan yaitu sebagai berikut:

1. Panjang bilah untuk menentukan seberapa banyak energi angin yang dapat diperoleh berdasarkan luas area sapuan bilah.
2. *Twist* atau sudut puntir adalah sudut antara *chord line* dengan bidang rotasi rotor. *Twist* optimum bilah bergantung pada nilai *tip speed ratio* dan nilai *angle of attack airfoil* yang diinginkan. Pemberian *twist* berguna untuk meningkatkan efisiensi bilah [5], dan linearisasi sudut *twist* umum dilakukan untuk memudahkan proses manufaktur [6].
3. *Power Coefficient* (Cp), adalah kemampuan bilah untuk menyerap energi angin yang diterimanya. Semakin besar nilai Cp maka semakin besar juga kemampuan suatu turbin untuk mengonversikan energi angin yang diperolehnya menjadi energi mekanik. Berdasarkan teori Betz nilai maksimum *power coefficient* sebesar 59,3% [5].
4. *Tip Speed Ratio* (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan linier putaran ujung bilah dengan kecepatan angin. Semakin besar nilai TSR maka semakin cepat juga putaran ujung blade [4].
5. *Angle of attack* (*Alpha*) adalah sudut antara *chord line* dengan arah gerak aliran angin relatif. Dari semua energi angin yang diterima, hanya sekitar 50 % yang dapat diekstrak (Teorema Betz).
6. *Airfoil* bilah adalah bentuk desain ujung *blade* berdasarkan gaya angkat dan dorong (*lift dan drag forces*) *blade* terhadap aliran udara yang melewatinya.

2.4 Airfoil

Airfoil adalah bentuk desain aerodinamis penampang bilah. Perencanaan geometri bilah agar dapat berputar dengan baik didasari pada rasio Cl/Cd (*lift coefficient/drag coefficient*) yang tinggi [7]. *Airfoil* yang digunakan pada penelitian ini adalah NACA 4 digit, dimana angka pertama menunjukkan maksimum *camber* dalam seperseratus *chord*, angka kedua menunjukkan posisi maksimum *camber* pada *chord line* dalam seperseratus *chord* dari *leading edge*, dan dua angka terakhir menunjukkan lebar maksimum *airfoil* dalam seperseratus *chord* [8].

2.5 Material Bilah

Terdapat beberapa pilihan material yang dapat digunakan untuk bilah, seperti logam, komposit, *styrofoam*, dan kayu. Kayu merupakan pilihan yang paling umum digunakan dalam pembuatan bilah turbin angin dikarenakan sifatnya yang ringan, kuat, mudah dibentuk dan getas. Kayu yang digunakan pada penelitian ini adalah kayu pinus. Berikut adalah data material kayu pinus yang didapatkan dari aplikasi ANSYS:

Tabel 1. Data Material Kayu Pinus

Property	Value	Unit
Density	487	kgm ³
Coefficient of Thermal Expansion	$4,69 \times 10^{-6}$	C ⁻¹
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	$9,3 \times 10^9$	Pa
Poisson's Ratio	0,374	
Bulk Modulus	$1,2302 \times 10^{10}$	Pa
Shear Modulus	$3,3843 \times 10^9$	Pa
Tensile Yield Strength	$4,1 \times 10^7$	Pa
Tensile Ultimate Strength	$6,63 \times 10^7$	Pa

2.6 Analisis Struktur Material

Analisis struktur dilakukan untuk memastikan struktur yang dirancang telah memenuhi dan memiliki kekuatan atau pun kekakuan yang diinginkan agar struktur dapat terjamin keamanannya [9]. Hasil dari analisis struktur adalah respon struktur terhadap berbagai kemungkinan beban yang akan bekerja diantaranya :

1. Tegangan (*stress*)

Tegangan merupakan intensitas gaya dan arahnya yang bekerja dari titik ke titik untuk menentukan kemampuan suatu material dalam menerima beban.

2. *Displacement*

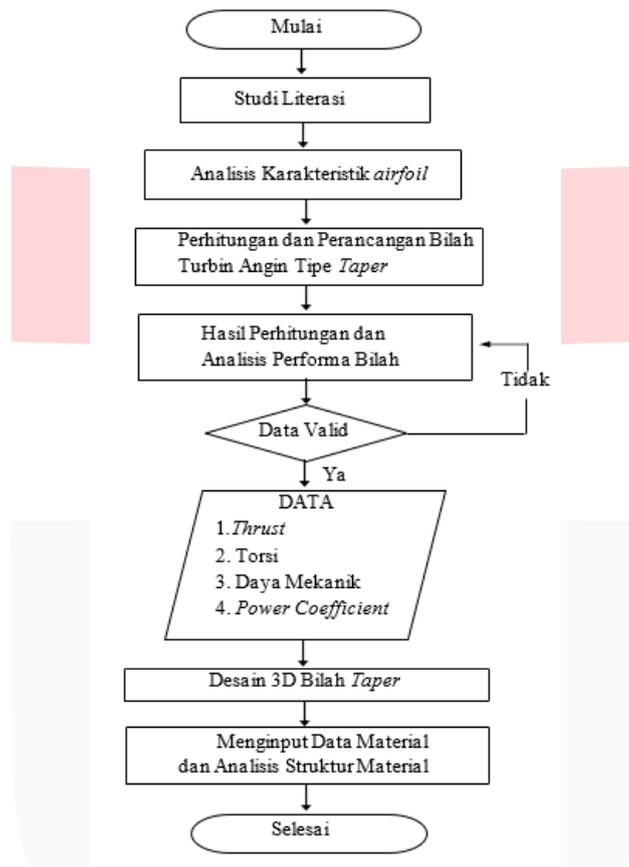
Deformasi (*displacement*) adalah keadaan dimana pembebanan pada suatu benda dapat menyebabkan benda mengalami perubahan baik bentuk maupun ukuran.

3. *Factor of safety*

Faktor keamanan diartikan sebagai nilai perbandingan antara kekuatan sebenarnya dari material dengan kekuatan yang dibutuhkan. Suatu desain dinyatakan aman apabila memiliki nilai faktor keamanan diatas 1,0.

2.7 Metodologi

Pada perancangan bilah *taper* turbin angin dengan kapasitas 500 watt, dilakukan dengan alur penelitian sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. Pembahasan

3.1 Penentuan Parameter Awal Bilah *Taper*

Dalam perancangan bilah, dibutuhkan parameter yang ditetapkan dan yang akan dihitung. Parameter-parameter ini yang digunakan dalam perhitungan geometri bilah untuk mengetahui desain pada bilah.

Tabel 2. Data Parameter Awal Bilah *Taper*

Daya listrik (We)	Efisiensi				Daya angin (Wa)	V max	Luas sapuan (A)	Jari-jari bilah (R)
	Bilah (η)	Generator (η)	Controller (η)	Sistem (η)				
watt	%	%	%	%	watt	m/s	m ²	m
500	0,3	0,9	0,9	0,24	2057,61	12	1,94	0,8
	0,4			0,32	1543,21		1,46	0,7

Adapun persamaan parameter yang dihitung adalah sebagai berikut:
Efisiensi sistem bilah (K) menggunakan persamaan:

$$K = \eta_{bilah} \times \eta_{transmisi} \times \eta_{generator} \times \eta_{controller} \tag{2}$$

Daya angin (W_a) yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya listrik (W_e) = 500 watt dengan K yang telah diketahui, menggunakan persamaan:

$$W_a = \frac{W_e}{K} \quad (3)$$

Dimana:

W_a : daya angin (watt)

W_e : daya listrik (watt)

K : efisiensi sistem (%)

Untuk luas sapuan bilah menggunakan persamaan:

$$A = \frac{2 \cdot W_a}{\rho \cdot v_{max}^3} \quad (4)$$

Dimana:

A : luas sapuan area (m^2)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

v : kecepatan angin (m/s)

Setelah itu menentukan jari-jari menggunakan persamaan:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (5)$$

Dimana:

R : jari-jari bilah (m)

A : luas sapuan area (m^2)

3.2 Penentuan Airfoil Bilah

Airfoil yang akan digunakan ditentukan berdasarkan rasio *lift coefficient* yang lebih besar dari pada *drag coefficient* terhadap perubahan sudut serang. *Airfoil* yang dianalisis yaitu *airfoil* NACA 4 digit. Analisis *airfoil* 4 digit yang dipertimbangkan adalah NACA 2410, NACA 3612, NACA 4412, NACA 4415, NACA 4421, NACA 4712, NACA 6513 dan NACA 6713. Analisis *airfoil* menggunakan udara pada suhu 20°C dengan massa jenis 1,225 kg/m^3 dan viskositas kinematik $1,51 \times 10^{-5} kg/m^2$ [10]. Nilai *ncrit* disesuaikan dengan keadaan lingkungan pada *wind tunnel* kondisi normal yaitu 9 [11]. Bilangan *mach* yang digunakan yaitu 0 [11], dan bilangan *reynold* yang digunakan yaitu 10^6 [12]. Analisis *airfoil* digunakan dengan menggunakan *software* Qblade.

Tabel 3. Data dari *Airfoil* dengan Nilai C_l dan C_l/C_d Tertinggi di α Tertentu

<i>Airfoil</i>	α	C_l/C_d	C_l
NACA 2410	4	103,63	0,69
NACA 3612	3,5	119,61	0,81
NACA 4412	6	133,64	1,13
NACA 4415	6,5	129,06	1,17
NACA 4421	7	105,13	1,15
NACA 4712	2	153	0,88
NACA 6513	4,5	163,30	1,25
NACA 6713	2,5	178,64	1,22

Berdasarkan hasil analisis dari kedelapan *airfoil* tersebut, dari nilai grafik $C_l/C_d - \alpha$ tertinggi didapatkan dua *airfoil* yang dipertimbangkan yaitu NACA 6513 dengan nilai C_l/C_d sebesar 163,3 di α 4,5 dan NACA 6713 dengan nilai C_l/C_d sebesar 178,64 di α 2,5. Sedangkan nilai C_l pada kedua *airfoil* tersebut yaitu untuk NACA 6513 sebesar 1,25 dan NACA 6713 sebesar 1,22. Berdasarkan studi literatur perancangan bilah, selain nilai grafik $C_l/C_d - \alpha$ tinggi, nilai grafik $C_l - \alpha$ juga berpengaruh pada perhitungan perancangan. Oleh karena itu, NACA 6513 yang lebih bagus untuk perancangan bilah. Mempertimbangkan kelebihan tersebut maka *airfoil* untuk perancangan bilah *taper* menggunakan *airfoil* NACA 6513.

3.3 Penentuan Geometri Bilah

Sebelum melakukan penentuan geometri bilah, pertama menentukan *Tip Speed Ratio* (TSR) dan menentukan sudut serang dan *lift coefficient* (C_l). Nilai TSR yang akan di gunakan adalah 7 dengan jumlah bilah 3 buah. Sedangkan nilai sudut serang dan *lift coefficient* didapatkan dari simulasi menggunakan *software* Qblade.

Tabel 4. Data Parameter Bilah *Taper*

Tip Speed Ratio (λR)	Airfoil	Cl/Cd	Angle of Attack (α)	Lif Coefficient (Cl)	Jumlah Bilah (B)
			°		
7	6513	163,30	4,5	1,25	3

Pada penentuan geometri bilah, dilakukan penentuan jumlah bilah untuk mempermudah pada saat perancangan geometri bilah. Kolom satu yaitu pembagian elemen pada perancangan bilah yang dibagi menjadi 11 elemen, dari elemen 0 sampai elemen 10. Pada kolom kedua di elemen 0 yaitu bagian nilai jarak dari pusat hub ke bagian bilah diasumsikan sebesar 0,170 meter. Untuk elemen selanjutnya menggunakan persamaan:

$$r = 0,17 + \left[\left(\frac{R - 0,17}{n} \right) \times (\text{elemen}) \right] \quad (6)$$

Kemudian nilai TSR menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda r = \frac{r}{R} \lambda R \quad (7)$$

Nilai *flow angle* (sudut alir) didapatkan dengan menggunakan rumus:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda r} \right) \quad (8)$$

Nilai *twist* (sudut puntir) menggunakan persamaan:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (9)$$

Nilai *twist* dilinearisasi pada posisi 75% atau linierisasi yang dilakukan pada elemen ke-7 dan ke-8 diperoleh dengan persamaan linear $y = -10.274x + 8.8402$. Dalam hal ini, y adalah *twist* terlinearisasi dan x adalah nilai jari-jari parsial tiap elemen yang diperoleh sebelumnya. Hal ini juga serupa untuk linearisasi *chord* pada bilah tipe *taper*, dengan cara yang sama maka akan didapatkan persamaan linear $y = -0.0472x + 0.0607$. Setelah melakukan linierisasi *twist* dan *chord* di 75%, nilai hasil linearisasi Y dikalikan dengan nilai jari-jari parsial kemudian ditambah dengan nilai linearisasi X . Sehingga persamaan linier untuk *twist* yaitu $\beta = -10.274r + 8.8402$. Sedangkan persamaan linier untuk *chord* yaitu $Cr = -0.0472r + 0.0607$. Hasil simulasi penambahan sudut puntir yang paling baik didapatkan pada penambahan dengan nilai 8 derajat, karena diperoleh *power coefficient* maksimum yang paling tinggi dengan *tip speed ratio* 7 dan bentuk grafik yang relatif lebih landai.

Tabel 5. Data Geometri Bilah *Taper*

Elemen Bilah (n)	Jari-Jari Parsial (r)	TSR Parsial (λr)	Flow Angle (ϕ)	Twist (β)	Chord (Cr)	Twist Linear 75 %	Twist Linear 75 % + Pitch 8	Chord Linear 75 %	Chord Linear 75 % + 0,067
	m	m	°	°	m	°	°	m	m
0	0,17	1,49	22,61	18,11	0,114	7,09	15,09	0,053	0,120
1	0,23	2,04	17,42	12,92	0,083	6,45	14,45	0,050	0,117
2	0,30	2,59	14,07	9,57	0,066	5,80	13,80	0,047	0,114
3	0,36	3,14	11,77	7,27	0,054	5,15	13,15	0,044	0,111
4	0,42	3,69	10,10	5,60	0,046	4,50	12,50	0,041	0,108
5	0,49	4,24	8,84	4,34	0,040	3,86	11,86	0,038	0,105
6	0,55	4,80	7,85	3,35	0,035	3,21	11,21	0,035	0,102
7	0,61	5,35	7,06	2,56	0,032	2,56	10,56	0,032	0,099
8	0,67	5,90	6,42	1,92	0,029	1,92	9,92	0,029	0,096
9	0,74	6,45	5,88	1,38	0,026	1,27	9,27	0,026	0,093
10	0,80	7,00	5,42	0,92	0,024	0,62	8,62	0,023	0,090

3.4 Analisis Performa Bilah

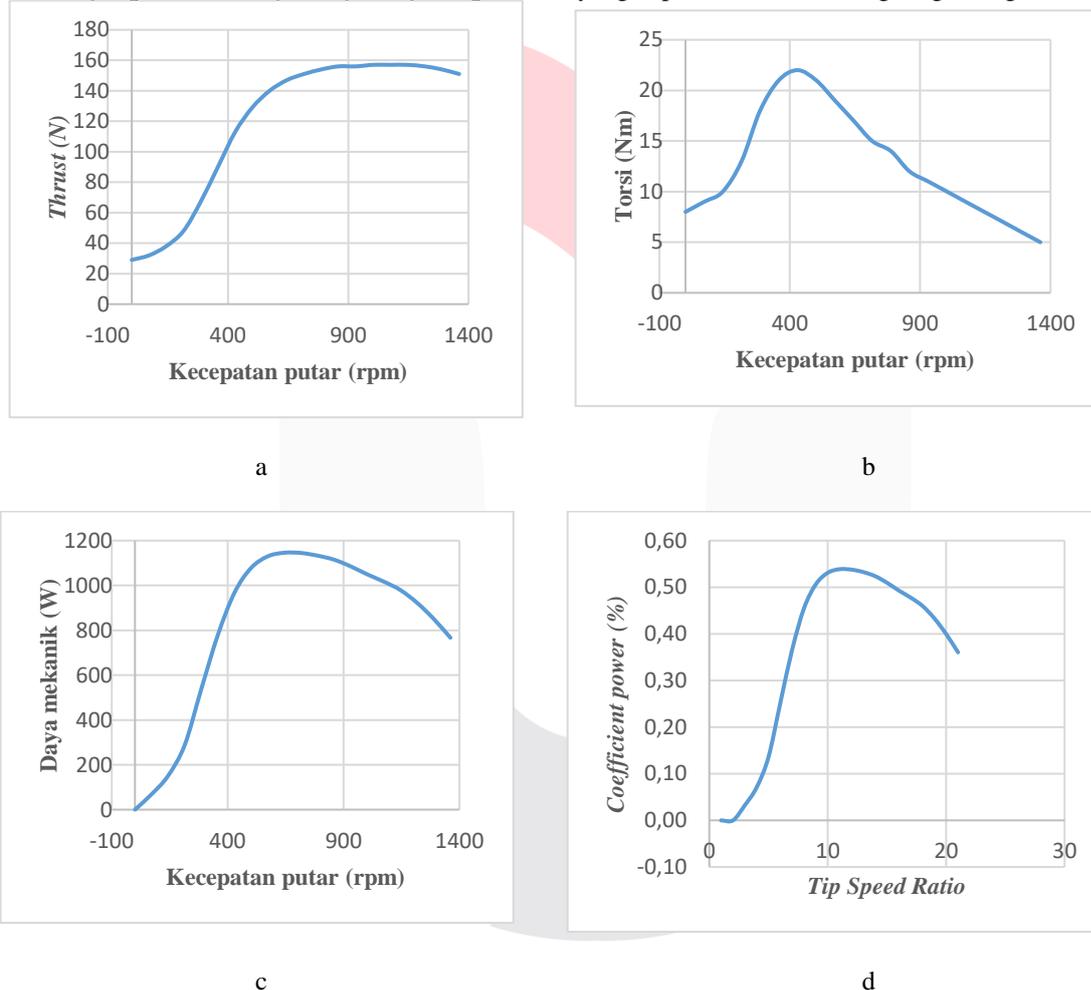
Simulasi performa bilah dilakukan dengan menggunakan *software* Qblade, dengan memasukan angka-angka hasil perhitungan geometri bilah yang telah di buat sebelumnya yang meliputi nilai jari-jari parsial, *twist* linear 75%+8° dan *chord* linear 75%+0.067 m Hasil simulasi pada kecepatan angin 12 m/s, memiliki *thrust* maksimum sebesar 157 N pada kecepatan putar 1146 rpm. Secara perlahan nilai *thrust* menurun seiring meningkatnya kecepatan putar. Lengkungan pada grafik performa bilah terjadi karena sudut terdefleksi. Ketika kecepatan putaran semakin meningkat, sudut turbin angin mengalami beban aerodinamika yang besar. Adanya sudut yang

menyebabkan defleksi di setiap penampang sudut dapat memicu pengurangan kecepatan angin dalam arah normal pada penampang sudut, terutama di daerah ujung sudut.

Sedangkan untuk nilai torsi maksimum sebesar 21,53 Nm pada kecepatan putar 429,72 rpm. Pada grafik torsi – kecepatan putar, torsi mulai turun pada kecepatan putar 573 rpm dan berhenti pada kecepatan putar 1361 rpm. Penurunan ini terjadi karena tingginya putaran membuat gaya gesek fluida besar sedangkan gaya yang dibutuhkan bilah turbin angin berputar tetap.

Daya mekanik maksimum sebesar 1146 watt pada kecepatan putar sebesar 645 rpm. Daya yang dihasilkan generator tidak bisa mengimbangi peningkatan daya secara teoritis karena adanya *loss* energi. Maka, daya listrik yang dihasilkan akan lebih kecil dibandingkan dengan daya teoritis angin. Oleh karena itu, setelah daya mencapai titik maksimum maka daya akan menurun secara perlahan-lahan seiring meningkatnya kecepatan putar. Daya mekanik mulai menurun pada kecepatan putar 716 rpm sampai pada kecepatan putar 1361 rpm.

Power coefficient sebesar 49 % pada *tip speed ratio* sebesar 7. Untuk nilai *power coefficient* maksimumnya sebesar 54 % pada *tip speed ratio* 4,5 dan 5. Setelah nilai C_p mencapai titik maksimum, maka terjadi penurunan efisiensi seiring meningkatnya TSR. *Power coefficient* mulai turun pada TSR 5,5. Penurunan tersebut karena TSR memiliki pengaruh terhadap kecepatan putar generator yang dapat menimbulkan rugi-rugi energi [13].

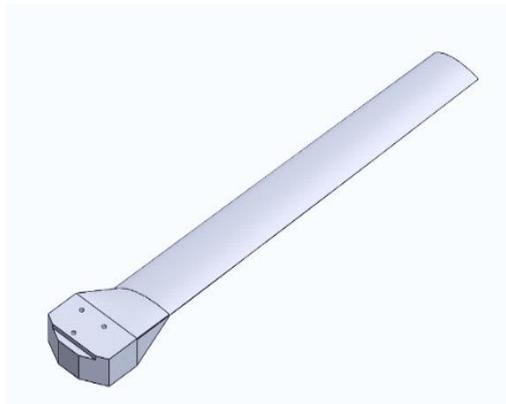


Gambar 3. Grafik (a) *Thrust* terhadap Kecepatan Putar, (b) Torsi terhadap Kecepatan Putar (c) Daya Mekanik terhadap Kecepatan Putar, dan (d) *Power Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* Putar Bilah *Taper*

3.5 Desain 3D Bilah *Taper*

Setelah bilah selesai dirancang, selanjutnya menggambar geometri bilah tipe *taper* dalam bentuk 3D menggunakan *software* desain 3D. Untuk proses gambar 3D perlu dicari koordinat bentuk *airfoil* NACA 6513 di tiap elemen. Data koordinat *airfoil* tiap elemen tersebut diolah pada *Microsoft Excel* kemudian di-input ke *software* desain gambar 3D.

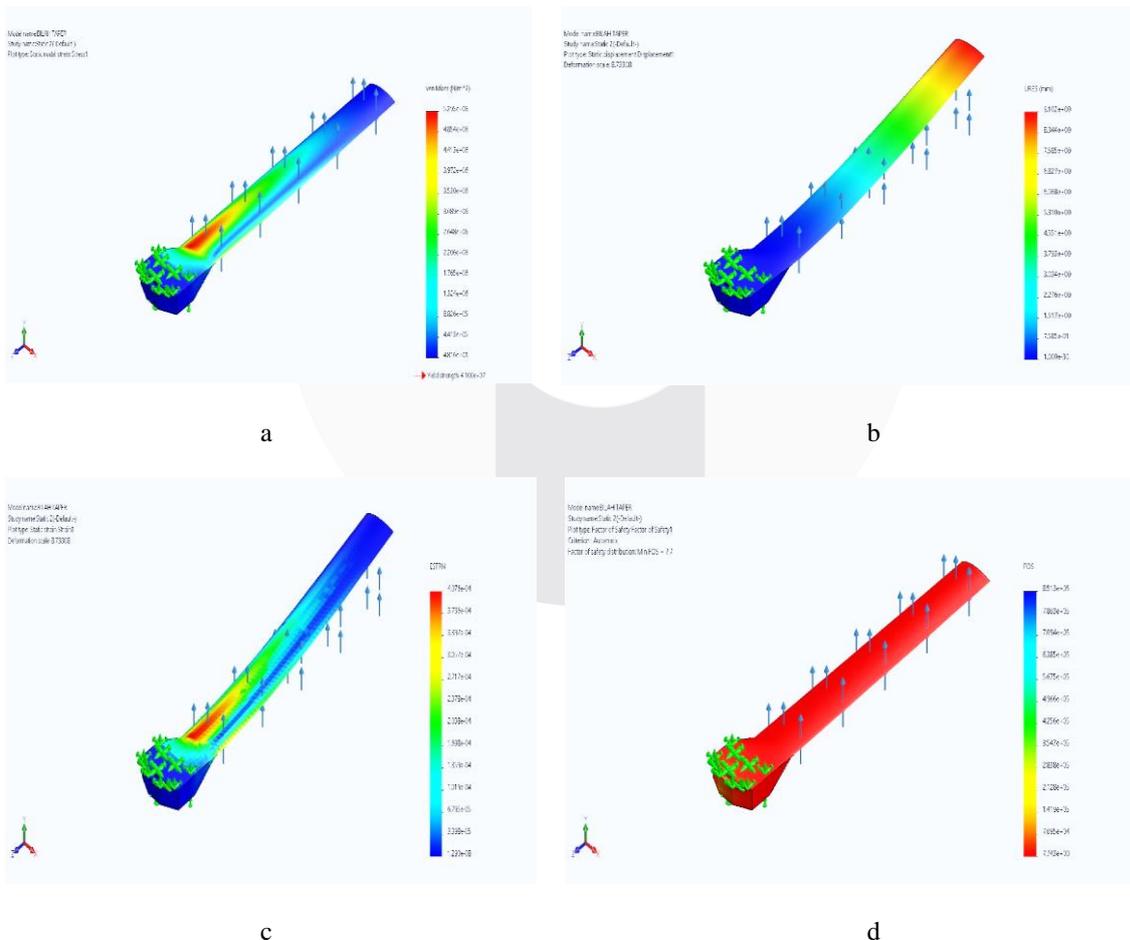
Dengan menggunakan fitur *lofted boss/base* pada *software* desain 3D, *airfoil* dan geometri pangkal bilah dapat dijadikan dalam bentuk gambar 3D.



Gambar 4. Bilah Taper 3D

3.6 Simulasi Struktur Material Bilah

Setelah gambar 3D bilah jenis *taper* dibuat dengan menggunakan *software* desain 3D, kemudian menganalisis struktur materialnya menggunakan *software* desain 3D. Hasil simulasi analisis struktur material kayu pinus yaitu: *Maximum stress* sebesar $5,29 \times 10^6$ N/m² MPa yaitu pada bagian bilah yang dekat dengan pangkal, *maximum deflection* sebesar 9,102 mm yaitu pada bagian ujung bilah., dan *factor of safety* sebesar 7,743 kali pada kecepatan angin 12 m/s. Oleh karena itu, bilah aman pada kondisi *input* gaya yang diberikan, dan *factor of safety* maksimalnya sebesar $8,51 \times 10^5$ artinya mampu menahan beban $8,51 \times 10^5$ kali lebih besar dari gaya input. Dengan demikian dengan pembebanan sebesar 52,34 N, Hasil simulasi analisis struktur yang telah dilakukan menunjukkan bahwa bilah yang dirancang aman digunakan, baik pada kondisi kecepatan tinggi ataupun pada kondisi kecepatan angin rendah.



Gambar 5. Hasil Analisis Struktur Material (a) *Stress*, (b) *Displacement*, (c) *Strain*, dan (d) *factor of safety* yang dialami bilah *taper*

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini berhasil melakukan perancangan bilah *taper* turbin angin *The Sky Dancer* 500 watt (TSD-500), menggunakan NACA 6513 dengan kecepatan angin yang digunakan sebesar 12 m/s dan jari-jari sebesar 0,8 meter. Memiliki performa bilah jenis *taper* memiliki *thrust* maksimum sebesar 157 N pada kecepatan putar 1146 rpm. Torsi maksimum sebesar 22 Nm pada kecepatan putar 430 rpm. Daya mekanik maksimum sebesar 1146 watt pada kecepatan putar 645 rpm. Sedangkan *power coefficient* maksimum sebesar 54 % pada *tip speed ratio* 5 sedangkan *power coefficient* pada *tip speed ratio* 7 sebesar 49 %. Hasil analisis struktur yang diperoleh memiliki kekuatan struktur yang baik. Ditinjau dari nilai *stress* maksimum sebesar 5,295 MPa bilah dinyatakan aman karena tidak melebihi tegangan luluh material kayu pinus. Sedangkan nilai *defleksi* maksimum sebesar 9,102 mm pada bagian ujung bilah, dan memiliki tingkat keamanan (*factor of safety*) yang tinggi sebesar 7,743 kali dengan nilai *factor of safety* maksimal $8,51 \times 10^5$ kali.

REFERENSI

- [1] A. Bachtiar and W. Hayyatul.2018.“Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras”. J. Tek. Elektro ITP, vol. 7, no. 1, pp. 34–45.
- [2] Z. Arfie Ikhsan Firmansyah. 2012. "Perancangan Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga," *Ketenaga listrik Dan Energi Terbarukan*, vol. 11, pp. 151-158.
- [3] Ginting, Dines. 2010. “Analisis Desain, Teknologi dan Prestasi Turbin Angin 10 KW”. Jurnal. Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan. LAPAN.
- [4] Nusantara, Lentera Bumi. 2014. “Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin”.
- [5] Piggott, H. 1997. “*Windpower Workshop*”. Buckley: Powys: The Centre of Alternative Energy.
- [6] Schubel, P. J., & Crossley, R. J. 2012. “*Wind Turbine Blade Design*”. *Energies*, 5, 3425-3449.
- [7] Hasanin, M. K. 2017. “*The Effect of Blade Geometry and Configuration on Horizontal Axis Wind Turbine Performance*”. Mechanical Power Engineering Department: Zagazig University.
- [8] Abbott, I. H., von Doenhoff, A. E., & Stivers, L. S. 1945. “*Summary of Airfoil Data*”. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.
- [9] Hibbeler, R. C. 2012. “*Structural Analysis*”. New Jersey: Perason Prentice Hall
- [10] White, Frank M. 2001. *Mekanika Fluida*. Erlangga: Jakarta.
- [11] Pintoko, Aji. 2019. “Rancang Bangun Bilah *Inverse Taper* Dengan *Airfoil S1210* Pada Turbin Angin Sumbu *Horizontal* Skala Kecil”. *Skripsi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta*.
- [12] Permana, Vito Andika. Ismoyo Haryanto. 2015. “Perancangan Awal Sudu Turbin Angin Dengan Kapasitas 3200 Watt. Jurnal. Fakultas Teknik. Universitas Diponegoro. Vol. 3, No. 1, Tahun 2015.
- [13] M. Shuwa, G. M. Ngala, and A. M. El-Jumamah.2017. “*Investigating the Suitability of Selected Structural Material for the Blade of a Horizontal Axis Wind Turbine,*” *Arid Zo. J. Eng. Technol. Environ.*, vol. 13, no. 3, pp. 315–324.