

Analisis performa bilah *taper* dengan *airfoil* GOE 796 pada turbin angin sumbu horizontal TSD-500 di PT Lentera Bumi Nusantara

Raditya Elfa Pratama¹, Bobie Suhendra¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. HS. Ronggowaluyo, Karawang, 41361
Email korespondensi: 1810631150114@student.unsika.ac.id

Abstrak

Kebutuhan listrik Indonesia dari tahun ke tahun semakin meningkat, namun ketersediaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batubara semakin berkurang, sehingga diperlukan sumber energi baru terbarukan (EBT) sebagai solusi untuk mengatasi permasalahan. Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan dan memiliki potensi besar adalah energi angin. Tujuan dari kajian ini adalah untuk menentukan bilah tipe *taper* dengan *airfoil* yang optimal untuk turbin angin sumbu horizontal skala mikro. Dalam kajian ini, bilah turbin angin sumbu horizontal dengan *airfoil* GOE 796 diuji menggunakan generator PMSG *cooing-less* agar tercapainya efisiensi tinggi pada kecepatan angin minimum. Desain hasil perancangan bilah *Taper* GOE 796 *Airfoil* memiliki panjang jari-jari sebesar 1 m, lebar *chord* yakni 34-74 mm, dengan *twist angle* sebesar 5,66-11,66°. Hasil analisis performa bilah *Taper* GOE 796 *Airfoil* dengan kecepatan angin maksimal 10 m/s memiliki kinerja optimal pada TSR 6,5 dengan *Coefficient Power* (C_p) sebesar 35%, menghasilkan daya maksimum sebesar 670 W pada kecepatan sudut sebesar 620 rpm dan torsi yakni 10,3 Nm.

Kata kunci: bilah, *taper*, GOE 796, turbin angin, energi angin.

Abstract

Indonesia's electricity needs are increasing from year to year, but the availability of fossil fuels such as oil and coal is decreasing, so that new and renewable energy sources are needed as a solution to overcome the problem. One of the renewable energy sources that can be utilized and has great potential is wind energy. The purpose of this study was to determine the optimal *taper* blade with *airfoil* for a micro-scale horizontal axis wind turbine. In this study, horizontal axis wind turbine blades with GOE 796 *airfoil* were tested using a *cooing-less* PMSG generator in order to achieve high efficiency at minimum wind speeds. The design of the GOE 796 *Airfoil* *Taper* blade has a radius of 1 m, a *chord* width of 34-74 mm, with a *twist angle* of 5.66-11.66°. The results of the analysis of the performance of the *Taper* GOE 796 *Airfoil* blade with a maximum wind speed of 10 m/s has optimal performance at TSR 6.5 with a *Coefficient Power* (C_p) of 35%, producing a maximum power of 670 W at a rotation speed of 620 rpm and a torque of 10.3 Nm.

Keywords: blade, *taper*, GOE 796, wind turbine, wind energy.

1. Pendahuluan

Kebutuhan listrik Indonesia dari tahun ke tahun semakin meningkat, namun ketersediaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batubara semakin berkurang, sehingga diperlukan sumber energi baru terbarukan (EBT) sebagai solusi untuk mengatasi permasalahan [1, 2, 3]. Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan dan memiliki potensi besar adalah energi angin [4, 5].

Energi angin didapatkan dari hasil perhitungan setengah kali massa jenis udara dengan luas penampang bilah dan pangkat tiga dari kecepatan angin [6]. Di sisi lain, besar energi mekanik yang diperoleh sebuah turbin angin didapatkan dari hasil perhitungan perkalian kecepatan putar bilah dengan torsi [7]. Salah satu turbin angin dengan efisiensi tinggi yaitu bersumbu horizontal dengan jenis bilah tipe *three blade propeller* yang memiliki efisiensi

maksimum (C_p) sebesar 59% menurut teori hukum Betz [8, 9].

Kecepatan angin rata-rata di Indonesia pada daerah *onshore* sebesar 6-8 m/s dan *offshore* > 8 m/s [10]. Masalah distribusi kecepatan angin di Indonesia perlu mendapatkan perhatian. Untuk menentukan desain bilah yang tepat, sehingga dapat mengonversikan energi angin menjadi energi mekanik dengan optimal yang selanjutnya dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Berdasarkan luas penampangnya bilah memiliki 3 jenis yaitu, *taper*, *taperless*, dan *inverse taper* [11]. Selain itu, pemilihan *airfoil* dapat mempengaruhi dalam melakukan perancangan desain bilah. *Airfoil* mempengaruhi efisiensi bilah (C_p) yaitu gaya angkat bilah terhadap energi angin yang menerpanya. Adapun aspek yang perlu dipahami dalam merancang bilah yaitu mekanika fluida, aerodinamika, dan materialnya serta untuk menganalisis suatu turbin ada beberapa variabel yang perlu diperhatikan seperti *Tip Speed Ratio* (TSR),

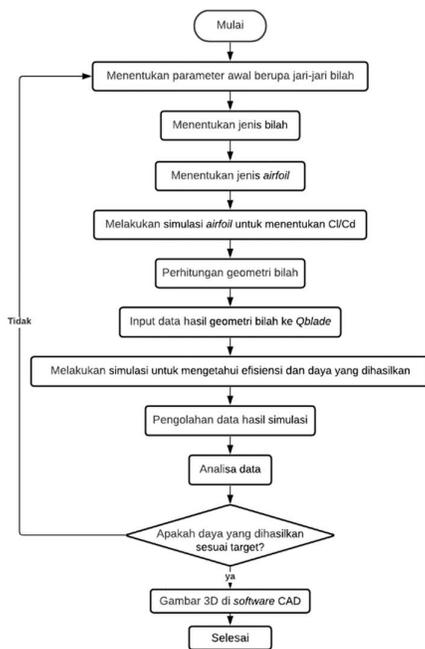
Twist, Angle of Attack, Coefficient Power (C_p), Chord, Airfoil, dan lainnya.

PT Lentera Bumi Nusantara terletak di Desa Ciheras, Cipatujah, Tasikmalaya, Jawa Barat, mengembangkan EBT khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala mikro. Turbin angin skala mikro adalah turbin angin yang memiliki luas sapuan kurang 200 m² dan menghasilkan tegangan 1000/1500 volt DC. Kecepatan angin maksimal di Ciheras sebesar 10 m/s dengan turbin angin yang didesain untuk TSR 6-8. Turbin angin skala mikro dipilih karena investasinya yang relatif rendah dan memiliki struktur pembangunan yang relatif mudah bila dibandingkan turbin angin skala besar.

PT Lentera Bumi Nusantara memiliki turbin angin sumbu horizontal dengan bilah tipe *taper* dengan *airfoil Clark-Y* memiliki efisiensi maksimal 40% pada kecepatan angin 12 m/s. Dalam kajian ini akan menganalisis performa bilah jenis *taper* dengan *airfoil* GOE 796 pada *The Sky Dancer* (TSD) 500 Watt menggunakan *software Q-Blade* di PT Lentera Bumi Nusantara. Tujuan kajian ini yaitu untuk menentukan bilah tipe *taper* dengan *airfoil* yang optimal untuk turbin angin sumbu horizontal skala mikro. Dalam kajian ini, bilah turbin angin sumbu horizontal dengan *airfoil* GOE 796 dikombinasikan dan diuji menggunakan generator PMSG *cooging-less* agar tercapainya efisiensi tinggi pada kecepatan angin minimum.

2. Metode

Adapun tahapan kajian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



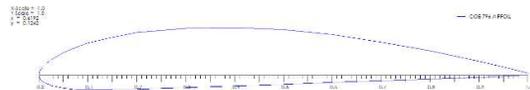
Gambar 1. Diagram alir.

Tahapan Persiapan

Pada tahap ini dilakukan studi literasi mengenai konsep turbin angin, mekanisme pemanfaatan energi angin, komponen-komponen turbin angin, dan parameter-parameter dalam perancangan bilah, serta dilakukannya pengambilan data kondisi lapangan.

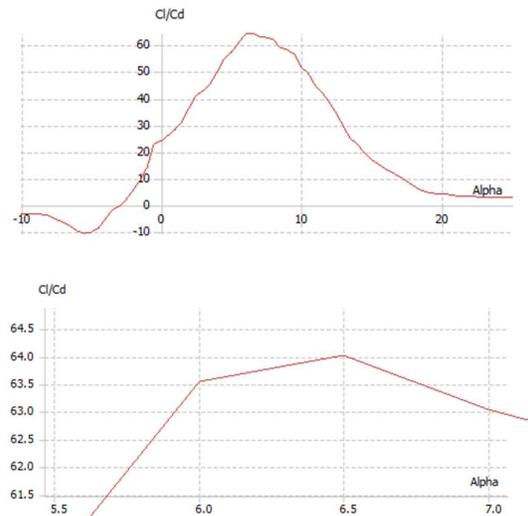
Analisa Karakteristik Airfoil

Pada tahap ini melakukan analisis karakteristik *airfoil* menggunakan *software Q-Blade*. Analisis karakteristik *airfoil* yaitu dengan mengamati grafik perbandingan *Coefficient Lift* dan *Coefficient Drag* terhadap sudut serang ($C_l/C_d - \alpha$), serta grafik *Coefficient Lift* terhadap sudut serang ($C_l - \alpha$). Tujuan pada tahap ini yaitu untuk menganalisis kecenderungan yang terjadi pada *airfoil* terhadap gaya angkat dan gaya hambat.

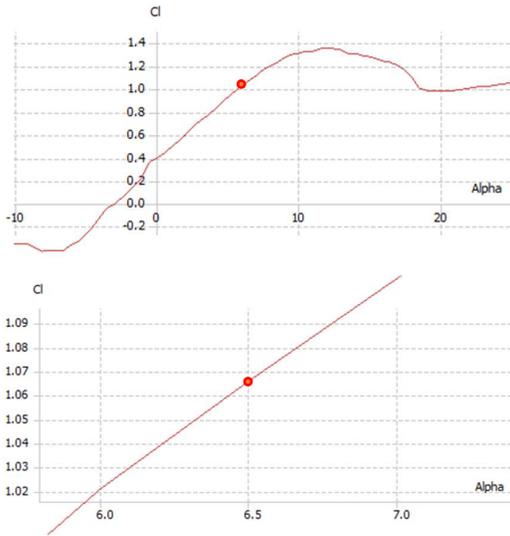


Gambar 2. Geometri airfoil GOE 796.

Langkah awal untuk menentukan geometri bilah yaitu dengan mengetahui nilai sudut serang (α) dan *Coefficient Lift* (C_l). Nilai tersebut diperoleh dari hasil simulasi menggunakan *software Q-Blade* v0.963. Sudut serang merupakan sudut datangnya tumbukan aliran angin terhadap *airfoil*, sedangkan *coefficient lift* merupakan nilai koefisien gaya angkat pada bilah. Bilah dapat berotasi apabila nilai gaya angkat harus lebih besar dibanding gaya hambat [2]. Hasil simulasi *airfoil* GOE 796, tersaji pada Gambar 3 dan 4 berikut.



Gambar 3. Grafik $C_l/C_d - \alpha$.



Gambar 4. Grafik $C_l - \alpha$.

Hasil simulasi pada *Airfoil* GOE 796 bahwa nilai *Coefficient Lift* akan naik ketika sudut serang semakin besar, kemudian turun ketika mencapai titik tertentu, hal itu disebabkan adanya *stall*, yaitu ketika C_l telah mencapai titik optimum dan tidak bertambah sedangkan C_d terus bertambah. *Airfoil* GOE 796 memiliki *Coefficient Lift/Coefficient Drag* sebesar 64 dengan *Coefficient Lift* bernilai 1,065 pada sudut serang optimum sebesar 6,5.

Perhitungan

Pada tahap ini, dilakukan perhitungan untuk menentukan parameter-parameter yang akan digunakan sebagai dasar perancangan geometri bilah. Adapun parameter tersebut antara lain, yaitu:

Daya Angin yang dibutuhkan (P_{wind})

Daya angin yang dibutuhkan dapat dihitung dengan Persamaan 1 berikut. Di mana P_{wind} merupakan daya angin yang dibutuhkan (Watt), ρ merupakan densitas udara ($1,225 \text{ kg/m}^3$), A merupakan luas sapuan bilah (m^2), dan V merupakan kecepatan angin (m/s).

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \tag{1}$$

Efisiensi Turbin Angin (K)

Efisiensi turbin angin dapat dihitung dengan Persamaan 2. Di mana K merupakan efisiensi sistem, η_{bilah} merupakan efisiensi bilah, $\eta_{transmisi}$ merupakan efisiensi transmisi, $\eta_{generator}$ merupakan efisiensi generator, dan $\eta_{controller}$ merupakan efisiensi pengontrol.

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

Luas Sapuan Bilah (A)

Untuk mencari besarnya luas sapuan bilah, maka digunakan Persamaan 3 berikut. Di mana A

merupakan luas sapuan bilah (m^2), ρ merupakan densitas udara ($1,225 \text{ kg/m}^3$), dan v merupakan kecepatan angin (m/s).

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

Jari-jari Bilah yang akan digunakan (R)

Jari-jari bilah yang akan digunakan dapat dihitung dengan Persamaan 4 berikut. Di mana R adalah jari-jari bilah (m), A merupakan luas sapuan bilah (m^2), dan π dalam 3,14.

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{4}$$

Jari-jari Parsial

Jari-jari parsial dapat dihitung dengan Persamaan 5 berikut. Di mana 0,25 merupakan nilai dari *innermost station* (dapat disesuaikan), R merupakan jari-jari bilah yang digunakan (m), n merupakan jumlah elemen, berjumlah sebanyak 11 elemen. Dalam hal ini, pada elemen ke-10, nilai jari-jari parsial (r) harus dipastikan sama dengan jari-jari bilah (R).

$$r = 0,25 + \left[\left(\frac{R-0,25}{n} \right) \times (\text{elemen}) \right] \tag{5}$$

Tip Speed Ratio (TSR) Parsial

TSR Parsial dapat dihitung dengan Persamaan 6 berikut. Di mana r merupakan jari-jari parsial, R adalah jari-jari bilah yang digunakan ($0,8 \text{ m}$), dan λ_r merupakan TSR awal yang digunakan (yaitu 7).

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \times \lambda_R \tag{6}$$

Flow Angle

Flow angle dapat dihitung dengan Persamaan 7 berikut. Di mana λ_r adalah TSR parsial tiap elemen bilah, dan ϕ merupakan *flow angle*.

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \tag{7}$$

Twist (Sudut Puntir)

Sudut puntir dapat dihitung dengan Persamaan 8 berikut. Di mana β merupakan *twist*, α merupakan sudut serang, dan ϕ merupakan *flow angle*.

$$\beta = \phi - \alpha \tag{8}$$

Chord

Chord dapat dihitung dengan Persamaan 9 berikut. Di mana C_l merupakan *coefficient lift*, R adalah jari-jari bilah (m), λ merupakan *tip speed ratio* (TSR), B merupakan jumlah bilah, C_r merupakan lebar bilah/*chord*.

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

Efisiensi sistem secara keseluruhan memiliki 4 hal penting berupa efisiensi dari bilah, transmisi, generator dan pengontrol. Menurut teori hukum Betz bahwa energi yang dapat diekstrak dari angin oleh

bilah sebesar 59% [9]. Perancangan ini menggunakan dua nilai efisiensi bilah yaitu, saat efisiensi rendah (30%) dan efisiensi tinggi (40%). Efisiensi transmisi sebesar 100% dikarenakan putaran dari bilah terhubung langsung dengan generator tanpa menggunakan transmisi, sedangkan efisiensi generator dan pengontrol memiliki nilai efisiensi yang berbeda untuk setiap alat yang digunakan. Pada perancangan ini, nilai efisiensi generator dan pengontrol diasumsikan 90%. Perhitungan efisiensi sistem dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2, diperoleh efisiensi sistem sebesar 24,3 - 32,4%.

Setelah mendapatkan efisiensi sistem, tahap selanjutnya yaitu menentukan kapasitas daya listrik yang diinginkan (P_{wind}) yaitu sebesar 500 W dengan kecepatan angin maksimal sesuai kondisi lapangan sebesar 10 m/s. Daya angin yang dibutuhkan didapatkan dengan menggunakan Persamaan 1, diperoleh bahwa daya angin yang dibutuhkan 1543-2057 W.

Tahapan selanjutnya kita menentukan jari-jari bilah dengan Persamaan 4, maka dibutuhkan bilah dengan jari-jari berkisar 0,9 - 1,03 m, sehingga diputuskan untuk perancangan ini, digunakan jari-jari bilah dengan panjang 1 m. Panjang bilah tersebut akan digunakan untuk mendesain bilah jenis *airfoil* GOE 796 dengan jenis bilah *taper*. Data penentuan parameter awal bilah dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

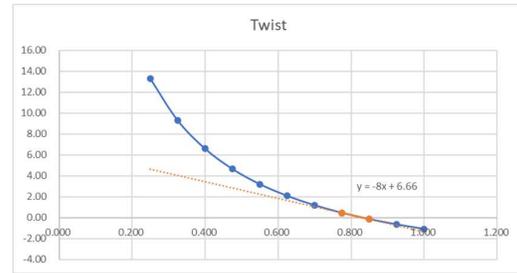
Tabel 1. Penentuan parameter awal bilah.

P _w (W)	Efisiensi					P _{wind} (W)	V _{max} (m/s)	A (m ²)	R (m)	R (m)
	Bilah	Transmisi	Generator	Controller	Sistem					
500	0.3	1	0.9	0.9	0.343	2057.6	10.0	3.36	1.03	1.0
	0.4				0.324	1543.2		2.52	0.90	

Perancangan Model

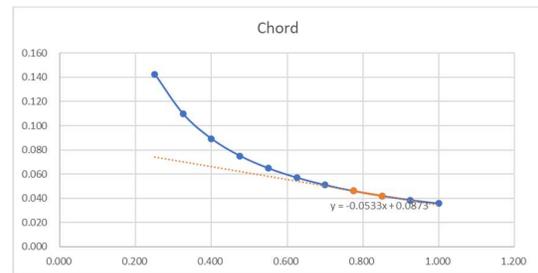
Pada tahap ini dilakukan perancangan model bilah menggunakan *software* Q-Blade v0.963 dengan memasukkan dimensi tiap elemen. Pada perancangan ini menggunakan nilai TSR sebesar 7, karena untuk turbin angin dengan 3 *blade propeller* berkisar pada rentang 6-8.

Tahapan selanjutnya kita menghitung *flow angle* dengan menggunakan Persamaan 7 diperoleh hasil *flow angle* bernilai 5,42 - 19,83°. Selanjutnya kita menghitung *twist* dengan menggunakan Persamaan 8, didapatkan nilai *twist* sebesar -1,08 - 13,33°, dikarenakan nilai *twist* bernilai negatif, maka dilakukan optimasi *twist* dengan linierisasi dan menambahkan sudut *pitch* sebesar 7°, hasil menunjukkan bahwa nilai *twist angle* dari bilah yaitu 5,66 - 11,66°, dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Grafik *twist* dan optimasi linierisasi.

Kemudian kita menghitung lebar bilah (*chord*) dengan menggunakan Persamaan 8, diperoleh nilai *chord* sebesar 0,036 - 0,143 m, selanjutnya dilakukan linierisasi untuk optimasi lebar bilah serta memudahkan dalam proses manufaktur. Hasil dari linierisasi *chord* bahwa nilainya 0,034 - 0,074 m dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Grafik *chord* dan optimasi linierisasi.

Penentuan geometri bilah secara detail ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Penentuan geometri perancangan bilah.

Elemen	r	TSR parsial	Flow angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Chord (m)	Twist linier 75%	Twist linier 75%	Twist + Pitch 7deg	Chord linier 75%	Chord linier 75%
0	0.250	1.75	19.83	13.33	0.143		4.660	11.66		0.074
1	0.325	2.28	13.82	9.32	0.110		4.060	11.06		0.070
2	0.400	2.80	13.10	6.60	0.089		3.460	10.46		0.066
3	0.475	3.33	11.16	4.66	0.075		2.860	9.86		0.062
4	0.550	3.85	9.71	3.21	0.065		2.260	9.26		0.058
5	0.625	4.38	8.38	2.08	0.057		1.660	8.66		0.054
6	0.700	4.90	7.69	1.19	0.051		1.060	8.06		0.050
7	0.775	5.43	6.96	0.46	0.046	0.46	0.460	7.46	0.046	0.046
8	0.850	5.95	6.36	-0.14	0.042	-0.14	-0.140	6.86	0.042	0.042
9	0.925	6.48	5.85	-0.65	0.039	-0.740	-0.740	6.26		0.038
10	1.000	7.00	5.42	-1.08	0.036	-1.340	-1.340	5.66		0.034

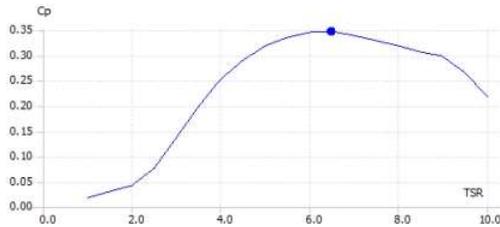
3. Hasil dan Pembahasan

Simulasi dan Analisa

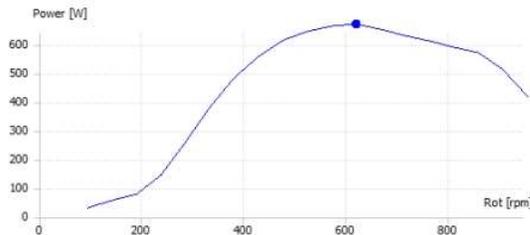
Pada tahap ini dilakukan simulasi rotor dengan metode BEM (*Blade Element Momentum*) menggunakan *software* Q-Blade v0.963 untuk memperoleh grafik pengaruh *Power Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* (C_p -TSR), serta daya yang dihasilkan terhadap kecepatan angin (P -v). Diharapkan pada TSR 6-8 dan kecepatan angin 10 m/s dapat menghasilkan daya $P \geq 500$ W. Parameter yang dimasukkan pada saat simulasi yaitu jumlah iterasi

sebanyak 1000 iterasi, densitas udara sebesar $1,225 \text{ kg/m}^3$, serta viskositas dinamik sebesar $1,837 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$.

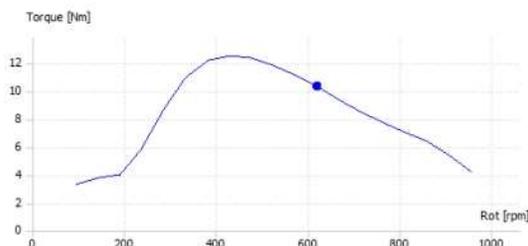
Hasil simulasi *power coefficient* dibanding TSR (C_p -TSR) nilai C_p sebesar 35% pada TSR 6,5 dapat dilihat pada Gambar 7. Selanjutnya dilakukan simulasi untuk melihat pengaruh kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan pada berbagai kecepatan sudut dan hasil simulasi terlihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Grafik Cp-TSR.



Gambar 8. Grafik P- ω .



Gambar 9. Grafik T- ω .

Pada Gambar 8 dan Gambar 9 bahwa daya maksimum yang dihasilkan bilah pada kecepatan angin 10 m/s adalah sebesar 670 W pada kecepatan sudut 620 rpm dengan torsi 10,3 Nm.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari kajian ini yaitu desain hasil perancangan bilah *Taper GOE 796 Airfoil* memiliki panjang jari-jari 1 m, lebar *chord* 34-74 mm, dengan *twist angle* 5,66-11,66°. Performa bilah *Taper GOE 796 Airfoil* dengan kecepatan angin 10 m/s memiliki kinerja optimal pada TSR 6,5 dengan *Coefficient Power* (C_p) sebesar 35%, menghasilkan daya maksimum sebesar 670 W pada kecepatan sudut 620 rpm dan torsi 10,3 Nm. Untuk kajian selanjutnya dapat diuji menggunakan metode CFD (*Computational Fluid Dynamic*) dan menentukan

material yang baik, sehingga dapat diterapkan pada lapangan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada PT Lentera Bumi Nusantara yang telah memberikan kami tempat untuk melakukan kajian pada turbin angin skala mikro.

Daftar Pustaka

- [1] Alfaridzi MA. Analisis Performa Bilah Taperless Dengan *Airfoil* NACA 4412 pada Horizontal Axis Wind Turbine TSD 500 di PT Lentera Bumi Nusantara. *Jurnal Teknik Mesin dan Pembelajaran*. 2020;3(2):64.
- [2] Dahlan B. RANCANG BANGUN BALING-BALING KINCIR ANGIN KAYU MAHONI (*Swietenia Macrophylla*) DAN PINUS DESIGN OF WIND TURBINE BASED ON THE NACA 4412 AND 4415 USING MAHOGANY (*Swietenia macrophylla*) DAN PINES WOOD (*Pinus merkusii*). 2016;1-4.
- [3] Ejiri H, Suzuki M, Taniguchi H, Nishizawa Y, Ushiyama I. An Experimental Study of the Shapes of Rotor for a Horizontal-Axis Small Wind Turbines and a Wing Let. *Trans JAPAN Soc Mech Eng Ser B*. 2011;77:924-8.
- [4] Gitano-Briggs H. Low Speed Wind Turbine Design. Carriveau R, editor. *Adv Wind Power*. 2012; <https://doi.org/10.5772/53141>
- [5] Ledoux J, Riffo S, Salomon J. Analysis of the Blade Element Momentum Theory. *SIAM J Appl Math*. 2021;81(6):2596-621.
- [6] Lentera Angin Nusantara. Pengenalan Pemanfaatan Energi Angin. Tasikmalaya; 2014.
- [7] Lentera Angin Nusantara. Profil Lentera Bumi Nusantara. Tasikmalaya; 2017.
- [8] Nongdhar D, Goswami B. Design of Micro Wind Turbine for Low Wind Speed Areas: A Review. *ADBU J Electr Electron Eng*. 2018;2(2):39-47.
- [9] Piggott H. *Windpower workshop: building your own wind turbine*. Wind Work Build your own Wind turbine. 1997;
- [10] Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, Potensi Energi Angin Indonesia 2020. P3tkebt.esdm.go.id. 2021. https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi_angin/potensi-energi-angin-indonesia-2020/, diakses 31 Oktober 2021.
- [11] Training A. *Airfoil*. t.thn, Flight-mechanic.com. <https://www.flight-mechanic.com/airfoil/>, diakses 03 November 2021.