



Analisa Performa Bilah *Taperless* Dengan *Airfoil* S2091 Pada Turbin Angin Sumbu Horizontal

Irvan Indra Cahyadi¹, Ratna Dewi Anjani²

¹Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

¹1710631150091@student.unsika.ac.id

Abstract

Utilization of wind energy is one option to produce electrical energy in the form of wind turbines. Wind energy is also renewable energy that can be utilized because of the potential for wind energy in Indonesia with an average wind speed of 2-6 m/s. The purpose of this performance analysis is to obtain high efficiency so that the S2091 taperless blade can rotate at relatively low Indonesian wind speeds. Airfoil S2091 has an optimal C_l/C_d value to produce 500 W of power. This performance analysis uses the Blade Element Momentum (BEM) method in which the blade is divided into several elements, starting from determining the radius, chord, and twist on the blade. The assumed parameters will be simulated using Qblade v0.96 software and designing 3D blade designs using SolidWorks software. The dimensions of the taperless blade with the S2091 airfoil have a radius of 0.8 m, a chord of 0.12 m, a twist angle of $6.96^\circ - 9.96^\circ$, and a maximum C_p value of 47% at a TSR of 4.5. At a speed of 12 m/s the maximum power generated is 998 W when the angular speed of the blade is 645 rpm and the minimum power generated is 95 W. Then the average power generated is 640.94 W. The results of field tests have a maximum charging power of 138.46 W and an average charging of 14.13 W. Then the power obtained is 257.80 Wh. From these data, the efficiency of the blade system is 30%–40% and the efficiency of field testing is 34.16%.

Keywords: Blade, *Taperless*, S2091, Blade Elemen Momentum, Coefficient performance.

Abstrak

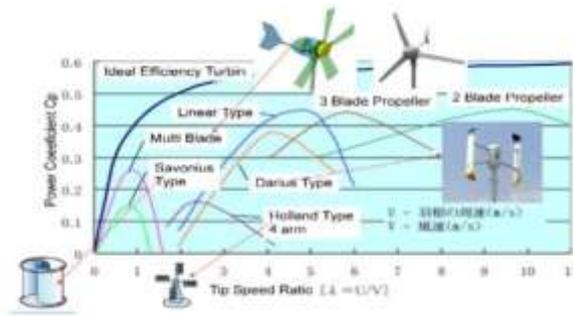
Pemanfaatan energi angin menjadi salah satu opsi untuk menghasilkan energi listrik berupa turbin angin. Energi angin juga energi terbarukan yang bisa dimanfaatkan karena potensi energi angin di Indonesia dengan rata-rata kecepatan angin 2-6 m/s. Tujuan dari analisa performa ini adalah untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi sehingga bilah *taperless* S2091 dapat berputar pada kecepatan angin Indonesia yang relatif rendah. *Airfoil* S2091 memiliki nilai C_l/C_d yang optimal untuk menghasilkan daya 500 W. Analisa performa ini menggunakan metode *Blade Elemen Momentum* (BEM) yang mana bilah dibagi menjadi beberapa elemen, dimulai dari menentukan jari-jari, *chord*, serta *twist* pada bilah. Parameter-parameter yang diasumsikan akan disimulasikan menggunakan *software* Qblade v0.96 serta mendesain 3D hasil rancangan bilah menggunakan *software* SolidWorks. Dimensi bilah *taperless* dengan *airfoil* S2091 memiliki jari-jari 0,8 m, *chord* 0,12 m, *twist angle* $6,96^\circ - 9,96^\circ$, dan nilai C_p maksimum sebesar 47% pada TSR 4,5. Pada kecepatan 12 m/s daya maksimum yang dihasilkan sebesar 998 W ketika kecepatan sudut bilah 645 rpm dan daya minimum yang dihasilkan sebesar 95 W. Maka rata-rata daya yang dihasilkan sebesar 640,94 W. Hasil pengujian lapangan memiliki daya maksimum pengisian sebesar 138,46 W dan pengisian daya rata-rata sebesar 14,13 W. Maka daya yang diperoleh sebesar 257,80 Wh. Dari data tersebut efisiensi sistem bilah sebesar 30%–40% dan efisiensi pengujian lapangan sebesar 34,16%.

Kata kunci: Bilah, *Taperless*, S2091, Momentum Elemen Bilah, Koefisien Performa.

1. Pendahuluan

Energi angin diperoleh dari hasil setengah kali massa jenis udara dengan luas penampang dari bilah dan pangkat tiga dari kecepatan angin pada saat terjadinya perputaran bilah [9]. Sedangkan energi mekanik yang diperoleh sebuah turbin angin nilainya sebesar perkalian kecepatan putar bilah dengan torsi (gaya yang diberikan oleh lengan bilah turbin angin) [9].

Salah satu turbin angin dengan efisiensi tinggi yaitu sumbu horizontal dan menggunakan jenis bilah yang memiliki efisiensi (C_p) tinggi yang mendekati 45% bahkan dalam teori betz mencapai 59% yaitu jumlah 3 bilah dapat dilihat pada Gambar 1.

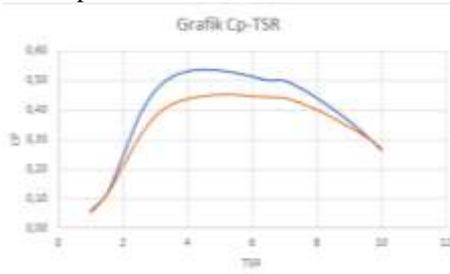


Gambar 1. Efisiensi bilah turbin angin [4]

Berdasarkan Gambar 1 semakin tinggi efisiensi suatu bilah turbin maka semakin maksimal juga dalam mengonversi energi angin tersebut menjadi energi listrik. Pemanfaatan energi angin yang merupakan salah satu energi terbarukan, di daerah-daerah kepulauan mempunyai potensi energi angin yang tersedia terus-menerus [2]. Potensi energi angin dengan rata-rata kecepatan angin 3 - 12 m/s, yaitu daerah pesisir Selatan Jawa, Sulawesi, dan pulau-pulau bagian timur Indonesia [3]. Sedangkan daerah dengan kecepatan rata-rata angin diatas 12 m/s, yaitu NTB, NTT, dan Sulsel. Data ini didukung dan dilengkapi oleh survei dari LAPAN yaitu distribusi kecepatan angin di Indonesia berkisar 2 - 6 m/s dan terdapat fluktuasi kecepatan angina [3]. Turbin angin memiliki beberapa komponen seperti bilah, generator, *controller*, *fin*, *data logger*, baterai dan inverter.

Bilah memiliki dua gaya yang bekerja untuk menangkap angin, yaitu gaya angkat dan gaya hambat. Bilah juga mempunyai berbagai jenis berdasarkan kecepatan angin, yaitu pertama *taper*; dengan panjang *chord* mengecil dari pangkal sampai ujung bilah untuk kecepatan angin tinggi, kedua *inverse taper*; dengan panjang *chord* membesar dari pangkal sampai ujung bilah untuk kecepatan angin rendah, dan ketiga *taperless*; dengan panjang *chord* sama besarnya dari pangkal sampai ujung bilah. Keunikan dari *taperless* ini memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan bentuk bilah *taper* pada kecepatan angin yang relatif sedang ke tinggi [6].

Penelitian terdahulu melakukan analisis perbandingan bilah turbin angin jenis *taper* dan *taperless* pada turbin angin skala mikro di PT Lentera Bumi Nusantara [7]. Analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa desain bilah *taperless* lebih baik daripada jenis bilah *taper*. Hal tersebut dari grafik Cp terhadap TSR, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Cp terhadap TSR

Bilah jenis *taperless* yang memiliki Cp sebesar 53% sementara bilah jenis *taper* bernilai 48% dan daya yang dihasilkan pada bilah jenis *taperless* juga lebih besar sekitar 2161 Watt. Sedangkan pada bilah jenis *taper* daya yang dihasilkan sekitar 791 Watt [7]. Selain itu, jenis bilah yang populer digunakan saat ini adalah bilah *taperless* dan *taper* karena memiliki kemampuan kecepatan putar yang tinggi dan stabil sehingga *shaft* generator akan berputar dengan lebih cepat dan tidak diperlukan *gearbox* besar [8]. Oleh karena itu, penulis membuat penelitian tentang analisis komponen dari turbin angin yaitu bilah *taperless* dengan *airfoil* S2091.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis suatu performa dari bilah *taperless* S2091 dengan mendapatkan nilai efisiensi yang tinggi sehingga turbin angin dapat berputar pada kecepatan angin yang relatif rendah.

2. Metode Penelitian

2.1. Studi Literasi

Studi literasi ini mulai dari mengamati konsep pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), Cara pemanfaatan energi angin, komponen turbin angin, dan parameter-parameter dalam merancang suatu bilah turbin angin.

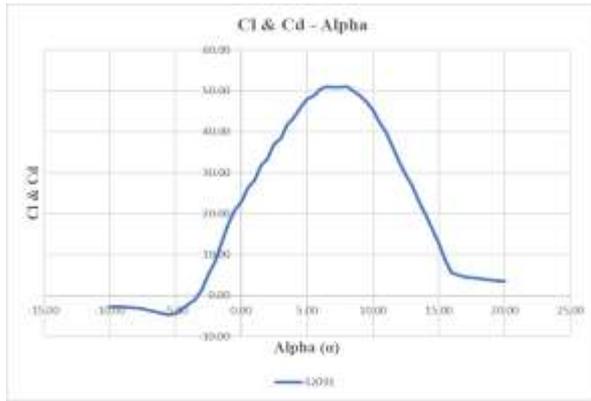
2.2. Analisa Karakteristik

Setelah studi literasi, dilakukan analisa karakteristik menggunakan *software Q-Blade*. Qblade adalah *software* yang digunakan untuk mendesain dan simulasi aerodinamis bilah turbin angin. *Software* ini bekerja dengan menggunakan metode blade element momentum dan mampu melakukan perancangan *airfoil*, pembuatan dan optimasi bilah, pengomputasian performa turbin angin, dan ekstrapolasi data polar angle of attack hingga 360° [5]. Karakteristik *airfoil* yang diperlukan adalah nilai *coefficient lift* (Cl) per *Coefficient drag* (Cd) terhadap alpha (α). Hal ini bertujuan untuk melihat performa daya angkat dari *airfoil*. Geometri *airfoil* S2091 dapat dilihat pada Gambar 3.

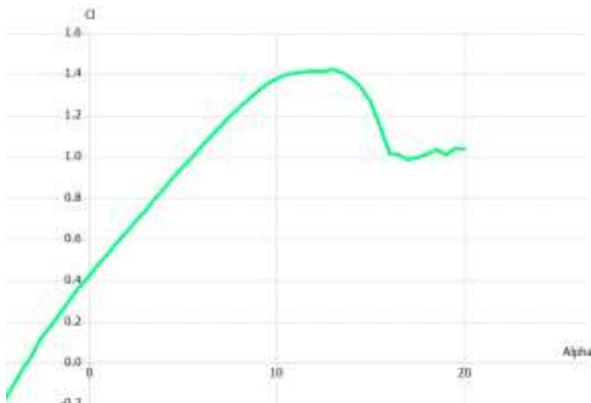


Gambar 3. Geometri Airfoil S2091

Menentukan geometri bilah perlu diketahui grafik Cl/Cd - Alpha karena untuk memutar bilah harus memaksimalkan gaya angkat dan meminimalisir gaya hambat. Nilai tersebut hasil dari simulasi *toolbar XFOIL Direct Analysis Q-Blade*. Hasil simulasi *airfoil* S2091 dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Grafik *coefficient lift/coefficient drag* terhadap sudut serang angin



Gambar 5. Grafik *coefficient lift* terhadap sudut serang angin

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5 terlihat bahwa nilai Cl/Cd terhadap alpha optimal dan nilai Cl naik ketika alpha naik lalu kemudian turun setelah mencapai titik tertentu. Hal ini disebabkan adanya stall ketika Cl sudah mencapai maksimum dan tidak bertambah sedangkan Cd masih terus bertambah.

2.2. Perhitungan

Sebelum memulai perhitungan, terlebih dahulu menentukan parameter-parameter yang akan digunakan sebagai dasar perancangan geometri bilah. Parameter tersebut yaitu: [11]

Daya Angin (Pa)

$$Pa = \frac{1}{2} \rho A v^3 = \frac{P_i}{K} \quad (1)$$

Keterangan:

- P_a = Daya Angin yang dibutuhkan (Watt)
- A = Luas Penampang (m^2)
- P = Massa Jenis Udara (kg/m^3)
- V = Kecepatan Angin (m/s)

Efisiensi Sistem Turbin Angin (K)

$$K = \eta_b \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_c \quad (2)$$

Keterangan:

- K = Efisiensi Sistem
- η_b = Efisiensi Bilah
- η_t = Efisiensi Transmisi
- η_g = Efisiensi Generator
- η_c = Efisiensi *Controller*

Tip Speed Ratio / TSR (λR)

$$\lambda R = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (3)$$

Keterangan:

- TSR = Tip Speed Ratio (λR)
- ω = Kecepatan Rotasi Bilah (rad/s)
- R = Radius (m)
- V = Kecepatan Angin (m/s)

Jari-jari Bilah (R)

$$R = \sqrt{\frac{A}{3.14}} \quad (4)$$

Keterangan:

- R = Jari-jari Yang Digunakan (m)
- A = Luas Sapuan Bilah (m^2)

TSR Parsial

$$\lambda r = \frac{r}{R} \cdot \lambda R \quad (5)$$

Keterangan:

- λr = TSR Parsial
- r = Jari-jari Setiap Elemen (m)
- R = Jari-jari Bilah (m)
- λR = TSR Yang Digunakan

Coefficient Lift (Cl)

$$Cl = \frac{16\pi \cdot R \cdot \frac{R}{r}}{9\lambda R^2 \cdot B \cdot Cr} \quad (6)$$

Keterangan:

- Cr : Lebar *Chord* (m)
- B : Jumlah Bilah
- λR : TSR Yang Digunakan
- π : 3,14

Flow Angle (ϕ)

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r} \quad (7)$$

Keterangan:

- ϕ : Flow Angle (deg)
- λr : TSR Parsial

Twist (β)

$$\beta = \phi - \alpha \quad (8)$$

Keterangan:

- β : Twist (deg)
- ϕ : Flow Angle (deg)
- α : Alpha (deg)

Parameter awal dari merancang bilah dimulai dari efisiensi sistem turbin angin karena efisiensi sistem merupakan gabungan dari efisiensi bilah, transmisi, generator, dan *controller*. Efisiensi maksimum dari angin yang diserap oleh bilah sebesar 59% atau disebut juga koefisien Betz (C_p). [1] Lalu perancangan ini diasumsikan efisiensi bilah yang rendah sebesar 30% dan yang tinggi sebesar 40%. Efisiensi transmisi 100% dikarenakan putaran bilah langsung terhubung dengan generator dan tidak menggunakan transmisi tetapi efisiensi pasti ada yang namanya loss jadi diasumsikan sebesar 90%. Sedangkan efisiensi generator dan *controller* sama sebesar 90% karena berbeda untuk setiap alat yang digunakan. Diperoleh efisiensi sistem menggunakan persamaan (2) sebesar 21,9% jika efisiensi bilah 30% dan sebesar 29,2% jika efisiensi bilah 40%.

Setelah itu, pada perancangan kali ini diasumsikan juga bahwa kapasitas daya listrik (P_t) yang diinginkan sebesar 500 W dan kecepatan angin maksimum (V_{max}) sesuai kondisi real lapangan sebesar 12 m/s. Daya angin yang dibutuhkan (P_a) menggunakan persamaan (1) didapatkan hasil sebesar 2286,24 W jika efisiensi bilah 30% dan didapatkan hasil sebesar 1714,68 W jika efisien bilah 40%. Jari-jari bilah juga ditentukan menggunakan persamaan (1) dan (4) yang dimana hasil luas penampang bilah sebesar 2,160 m² dibagi dengan 3,14 sehingga menghasilkan 0,829 m jika efisiensi 30% sedangkan luas penampang bilah sebesar 1,620 m² menghasilkan jari-jari 0,718 m. Kemudian kedua hasil jari-jari tersebut dibagi dua sebesar 0,8 m. parameter awal bilah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter awal bilah

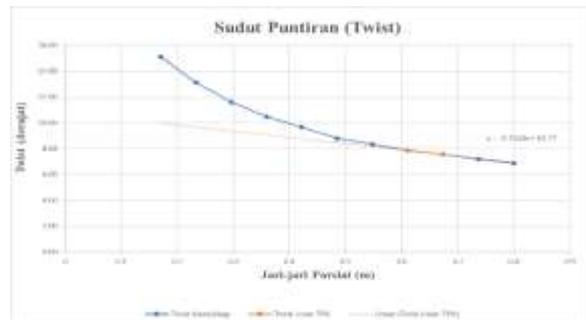
Kapasitas daya angin	Efisiensi					Daya angin	Kecepatan angin	Luas sapuan	Jari-jari		Massa jenis udara
	Bilah	Transmisi	Generator	Controller	Sistem				A	R	
We	η	η	η	η	η	W	V max	A	R	R	ρ
Watt	%	%	%	%	%	Watt	m/s	m ²	m	m	kg/m ³
500	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	2286,24	12	2,160	0,829	0,8	1,225
	0.4					1714,68		1,620	0,718		

2.3. Perancangan Geometri Bilah

Perancangan bentuk bilah menggunakan *software* Q-blade v0.96 dengan memasukkan dimensi di setiap elemennya. Diasumsikan TSR sebesar 7 karena pada turbin angin dengan jumlah 3 bilah mempunyai kisaran TSR 6-8 [10]. Setelah didapatkan jari-jari parsial di setiap elemennya, lalu melinearisasi garis menggunakan persamaan (5), (6), (7) dan (8) pada setiap elemen yang keluarannya berupa sudut puntiran atau *twist* agar mempermudah proses manufaktur. Linearisasi sudut puntiran dapat dilihat pada Tabel 2 dan grafik sudut puntiran pada Gambar 6.

Tabel 2. Data Geometri bilah

Geometri Blade								
Elemen	R Parsial	TSR parsial	Coefficient Lift	Alpha	Flow Angle (deg)	Twist (beta)(deg)	Twist Linier 75%	Twist Optimum 75%
n	r	λr	Cl	α	ϕ	β	β	β
	meter	meter		derajat	derajat	derajat	derajat	derajat
0	0.17	1.49	1.19	7.5	22.61	15.11		9.96
1	0.23	2.04	0.87	4.3	17.42	13.12		9.66
2	0.30	2.59	0.68	2.5	14.07	11.60		9.36
3	0.36	3.14	0.56	1.3	11.77	10.47		9.06
4	0.42	3.69	0.48	0.5	10.10	9.65		8.76
5	0.49	4.24	0.42	0.1	8.84	8.79		8.46
6	0.55	4.80	0.37	-0.5	7.85	8.33		8.16
7	0.61	5.35	0.33	-0.8	7.06	7.86	7.86	7.86
8	0.67	5.90	0.30	-1.1	6.42	7.56	7.56	7.56
9	0.74	6.45	0.27	-1.3	5.88	7.18		7.26
10	0.8	7.00	0.25	-1.4	5.42	6.86		6.96

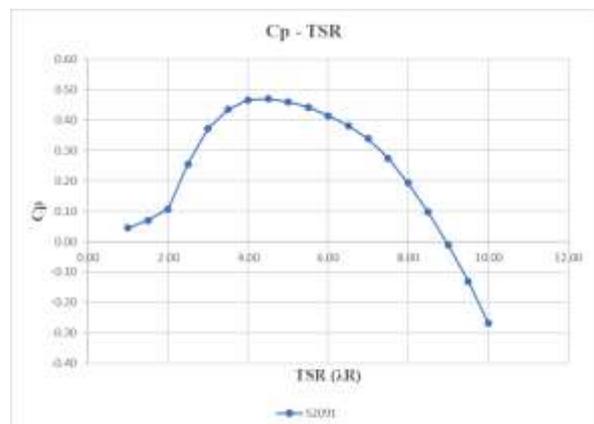


Gambar 6. Grafik sudut puntiran terhadap jari-jari parsial

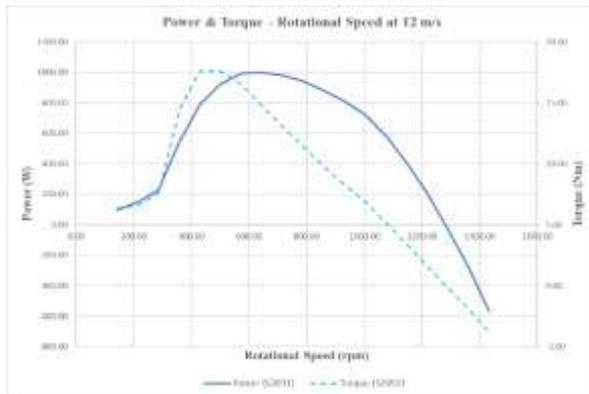
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Simulasi dan Analisis

Tahap simulasi rotor menggunakan teori Blade Elemen Momentum (BEM) menggunakan *software* Q-blade v0.96. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mendapatkan nilai koefisien daya (C_p) terhadap TSR dan nilai daya (P_t) yang dihasilkan terhadap kecepatan angin (v). Simulasi ini juga dengan memasukkan parameter-parameter yang ada misalnya TSR 7, kecepatan angin sebesar 12 m/s, massa jenis udara sebesar 1,225 kg/m³, dan viskositas kinematik sebesar 1,647x10⁻⁵ Ns/m². Hasil simulasi *toolbar* Blade Elemen Momentum (BEM) dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Grafik coefficient performance terhadap tip speed ratio



Gambar 8. Grafik daya & torsi terhadap rpm

Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8 bahwa bilah *taperless* dengan *airfoil* S2091 menghasilkan C_p 47% pada TSR 4,5 sedangkan pada TSR 7 didapatkan C_p minimum sebesar 34%, daya maksimum yang dihasilkan pada kecepatan 12 m/s sebesar 998 W ketika kecepatan sudut bilah 645 rpm. Daya minimum yang dihasilkan pada kecepatan 12 m/s sebesar 95 W ketika kecepatan sudut bilah 143 rpm. Maka rata-rata daya yang dihasilkan sebesar 640,94 W.

3.2. Validasi

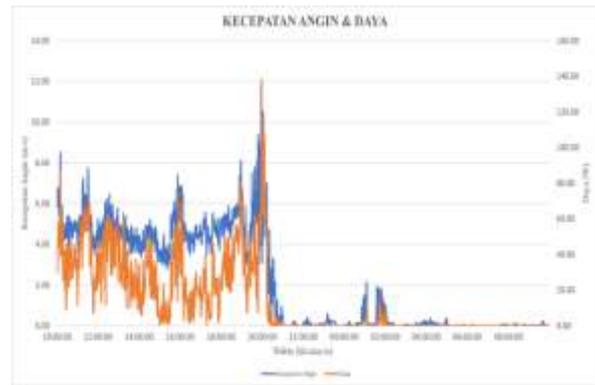
Tahap ini bertujuan untuk membandingkan data hasil simulasi melalui *software* Qblade v0.96 dengan data yang diambil dari pengujian lapangan secara langsung. Data yang diambil secara langsung bergantung pada kecepatan angin selama proses pengujian.

Peralatan yang digunakan pada pengujian lapangan adalah turbin angin sumbu horizontal skala kecil tipe *the sky dancer* (TSD) 500 W, *controller*, data logger, dan baterai 2V/1000 Ah.

Hasil data pengujian lapangan bilah *taperless airfoil* S2091 diambil pada tanggal 15 Juni 2021 selama 24 jam di PT Lentera Bumi Nusantara.

Tabel 3. Data daya dan kecepatan angin hasil pengujian lapangan

Charging Measurement	Maximum Battery Voltage	26.59	Volt
	Minimum Battery Voltage	25.18	Volt
	Maximum Charging Current	5.20	Ampere
Charging Power	Average Charging Wattage	14.13	Watt
	Maximum Charging Wattage	138.46	Watt
	Obtained Power	257.80	Wh
Wind Speed	Average Daily Wind Speed	2.17	m/s
	Maximum Wind Speed	11.92	m/s
	Theoretical Energy	754.65	Wh
Efisiensi	Obtained Power		
	$\frac{\text{Obtained Power}}{\text{Theoretical Energy}} \times 100\%$	34.16	%



Gambar 9. Statistik kecepatan angin dan daya per dua jam

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 9 didapatkan data bahwa bilah dapat beroperasi pada kecepatan angin rata-rata 2,17 m/s dan kecepatan angin maksimum yang didapatkan yaitu 11,92 m/s, secara teori daya energi angin sebesar 754,65 Wh dengan daya rata-rata pengisian 14,13 W dan daya maksimum sebesar 138,46 W, sehingga bilah hasil perancangan ini menghasilkan daya sebesar 257,80 Wh dengan kemampuan bilah dapat mengonversi energi angin menjadi energi listrik sebesar 34,16%. Jadi, nilai efisiensi sistem turbin angin sebesar 30%-40% dan pengujian lapangan secara langsung memiliki efisiensi serupa yaitu sebesar 34,16%.

Perbedaan efisiensi hasil perancangan dengan realita lapangan karena adanya *losses* daya yang terjadi pada saat bilah berputar, human error saat proses manufaktur dan saat perhitungan atau pembacaan alat ukur, gesekan shaft di dalam generator karena pergeseran massa, transmisi, dan kabel [6].

4. Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian kali ini adalah efisiensi sistem bilah turbin angin sebesar 30-40% dan efisiensi data pengujian lapangan sebesar 34,16% yang artinya pada analisa performa bilah *taperless* S2091 memiliki keluaran yang baik.

Daftar Rujukan

- [1] Al-Shemmeri, T. 2010. *Wind Turbines*. T Al-shemmeri and Ventus Publishing Aps ISBN 978-87-7681-692-6.
- [2] Bachtiar, A. 2018. *Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin di PT Lentera Angin Nusantara Ciheras. Teknik Elektro ITP Vol. 7, 35-45.*
- [3] Dewita, A., Bakar, A. S., & Dwicahyo, K. 2015. *Pemanfaatan WRF-ARW untuk Simulasi Potensi Angin sebagai Sumber Energi di Teluk Bone. Jurnal Material Energi Indonesia, 05(02), 17-23.*
- [4] Hau, E. 2013. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologys, Application, Economics, 3rd ed.* Munich; Springer.
- [5] IEC 61400-2. 2013. *Wind Turbines-part 2: Small Wind Turbine.* Geneva.
- [6] LAN, T. 2019. *Workshop Wind Turbine.* Ciheras.
- [7] Nuraini, A. 2019. *Analisis Perbandingan Bilah Turbin Angin Jenis Taper dan Taperless pada Turbin Angin Skala Mikro di PT Lentera Bumi Nusantara. Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta , 136-148.*

- [8] Saoke, C. O., Kamau, J. N., Kinyua, R., Nishizawa, Y., & Ushiyama, U. 2015. *Power Performance of an Inversely Tapered Wind Rotor and its Air Flow Visualization Analysis Using Particle Image Velocimetry (PIV)*. *American Journal of Physics and Applications*, 3(1), 6-14.
- [9] Tim Lentera Angin Nusantara. 2014. *Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*. Tasikmalaya, Jawa Barat.
- [10] Tim Lentera Angin Nusantara. 2017. *Profil Lentera Bumi Nusantara*. Tasikmalaya, Jawa Barat.
- [11] Zahra, I.N. 2016. *Modul Dasar-Dasar Perancangan Bilah Lentera Bumi Nusantara*. Tasikmalaya, Jawa Barat
-