



Uji Eksperimental Pengaruh Panjang *Chord* Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal

E.H. Herraprastanti¹, M.N. Mubarak², Sarip³, Hendri Suryanto⁴

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, STT Ronggolawe Cepu

¹ev.hertna@gmail.com ²ajibmubarak42@gmail.com

³hidayatullohsarip566@gmail.com ⁴hendrie_s@yahoo.com

Abstract

Wind turbines as electricity generator from renewable energy can be a solution to reduce fuel use. Wind turbines continue to be developed with the hope that areas with low wind power potential can apply wind turbines to generate electricity. One of consideration in the development of wind turbines is the design of turbine blades. The shape of the blade will affect the performance of the wind turbine. This study aims to determine the effect of blade chord length on wind turbine performance. The research was conducted using a 4-blade vertical axis wind turbine (VAWT) type L. The blade chord length was varied into 140 mm, 170 mm and 200 mm. From the experimental results it can be concluded that the blade chord length affects wind power, rotor power, generator power and the coefficient of power produced by the vertical axis wind turbine. The longer the turbine blade chord, the greater the wind power, rotor power, generator power and the resulting power coefficient.

Keywords: wind power, chord length, turbine blade, wind turbine performance

Abstrak

Turbin angin sebagai pembangkit listrik dari energi terbarukan bisa menjadi solusi untuk mengurangi penggunaan BBM. Turbin angin terus dikembangkan dengan harapan area dengan potensi tenaga angin yang kecil bisa mengaplikasikan turbin angin sebagai pembangkit listrik. Salah satu hal yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan turbin angin adalah perancangan sudu turbin. Bentuk sudu akan berpengaruh terhadap performa turbin angin. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh panjang *chord* sudu terhadap performa turbin angin. Penelitian dilakukan dengan menggunakan turbin angin sumbu vertikal (TSAV) 4 sudu tipe L dengan panjang *chord* sudu divariasikan menjadi 140 mm, 170 mm dan 200 mm. Dari hasil eksperimen dapat disimpulkan bahwa panjang *chord* sudu berpengaruh pada daya angin, daya rotor, daya generator, dan koefisien daya yang dihasilkan turbin angin sumbu vertikal. Semakin panjang *chord* sudu turbin maka daya angin, daya rotor, daya generator, dan koefisien daya yang dihasilkan semakin besar.

Kata kunci : daya angin, panjang *chord*, sudu turbin, unjuk kerja turbin angin

1. Pendahuluan

Konsumsi energi di Indonesia untuk periode 2000-2012 meningkat rata-rata sebesar 2,9% per tahun atau meningkat dari 764 juta SBM (setara barel minyak) pada tahun 2000 menjadi 1.079 juta SBM pada tahun 2012 [1]. Jenis energi yang paling dominan untuk memenuhi permintaan energi tersebut adalah bahan bakar yang berasal dari kilang minyak. Namun produksi minyak bumi Indonesia terus menurun sementara permintaan energi terus tumbuh sehingga menyebabkan peningkatan impor minyak mentah dan impor produk bahan bakar minyak. Pemerintah telah mengeluarkan sejumlah kebijakan untuk mengurangi penggunaan BBM sampai saat ini. Salah satu usaha

untuk menunjang kebijakan pemerintah dalam mengurangi penggunaan BBM adalah dengan mengelola pembangkit listrik energi terbarukan seperti radiasi matahari, energi angin, energi air, panas bumi, bioenergi, dan sebagainya [2].

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik [3]. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lain-lain. Prinsip dasar kerja dari turbin angin adalah mengubah energi angin menjadi energi mekanik pada kincir, lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator yang akan menghasilkan listrik [4].

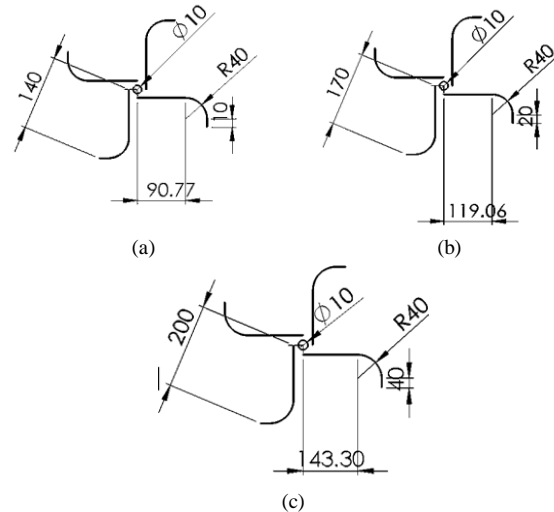
Ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam perancangan turbin angin supaya dapat bekerja dalam kecepatan angin yang rendah. Salah satu hal yang perlu dipertimbangkan adalah perancangan sudu untuk turbin angin yang meliputi ukuran (jari-jari rotor), penampang *airfoil*, panjang *chord*, dan sudut *pitch* sudu [5]. Panjang *chord* sudu adalah panjang dari garis lurus yang menghubungkan tepi depan dan belakang pada sudu. Korda (*chord*) adalah panjangnya garis korda. Garis korda (*chord line*) adalah garis lurus yang menghubungkan tepi depan dan tepi belakang [6].

Melihat permasalahan di atas, untuk mengoptimalkan kinerja turbin angin tersebut, peneliti ingin memvariasi panjang *chord* sudu pada kinerja turbin angin sumbu vertikal (TASV), untuk mengetahui pengaruh panjang *chord* sudu terhadap performa turbin angin, yang meliputi: Daya Angin (*Pa*), Daya Generator (*Pg*), Daya rotor (*Pr*), Torsi (*T*), *Tip speed ratio* (*TSR*), dan Koefisien daya (*CP*). Dengan mengaplikasi variasi panjang *chord* sudu pada turbin angin, diharapkan dapat diketahui variasi yang mana yang lebih bagus terhadap performa turbin angin sumbu vertikal.

Salah satu keuntungan dari turbin angin sumbu vertikal adalah konstruksi sederhana, *start up* mesin tinggi dan momen operasi penuh, dapat menerima angin dari segala arah, kebisingan dan kecepatan sudut dalam pengoperasian rendah, serta dapat mengurangi keausan pada bagian yang bergerak [7]. Penelitian sebelumnya [8] mengkaji tentang Studi eksperimental kinerja turbin angin Savonius dengan variasi jumlah sudu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah sudu mempengaruhi kinerja turbin angin. Penelitian lain [4] tentang pengaruh panjang lengkung sudu terhadap unjuk kerja turbin angin poros vertikal Savonius, didapatkan hasil jarak celah sudu berpengaruh terhadap performa turbin angin poros vertikal savonius. Pada penelitian [9] tentang Pengaruh Kelengkungan Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius, didapatkan hasil semakin besar kecepatan angin maka daya input, laju aliran massa udara, daya output, dan efisiensi akan semakin besar; semakin besar beban gaya pada poros turbin maka torsi pada poros turbin juga akan semakin besar; hubungan beban gaya dengan daya output dan efisiensi turbin adalah membentuk kurva parabolik. Sedangkan [10] dalam penelitian Turbin Angin Savonius Empat Sudu dengan Variasi Model Profil Sebagai Media Belajar Siswa, didapatkan hasil bahwa kecepatan angin memberikan pengaruh terhadap kinerja turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin tinggi putaran rotor dan daya yang dihasilkan. Profil terbaik diperoleh dari model L yang mencapai 177.63rpm dengan daya 6.35watt.

Dalam penelitian ini penulis membatasi pada sudu turbin berjumlah 4 dengan tipe L (gambar 1) dengan variasi panjang *chord* sudu 140 mm, 170 mm, 200 mm. Bahan sudu menggunakan pelat aluminium

dengan ketebalan $\pm 0,6$ mm. Tinggi sudu (*span*) ± 600 mm. Kecepatan angin 5 m/s. Menggunakan sistem transmisi *open belt drive* (penggerak sabuk terbuka). Sumber angin menggunakan kipas angin. Jarak kipas angin dengan turbin 700 mm. Desain sudu turbin ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Sudu Turbin (a) Panjang *Chord* 140 mm (b) Panjang *Chord* 170 mm (c) Panjang *Chord* 200 mm

1.1 Rumus Perhitungan

• Daya Angin (*Pa*)

Angin adalah udara bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara rendah. Energi potensial yang terdapat pada angin dapat memutar sudu yang terdapat pada kincir angin, dimana sudu ini terhubung dengan poros dan memutar poros yang telah terhubung dengan generator dan akan menimbulkan arus listrik. Pada dasarnya energi yang dihasilkan angin dapat dihitung menggunakan rumus (1), (2), (3), dan (4).

Udara yang memiliki massa (*m*) dan kecepatan (*v*) akan menghasilkan energi kinetik sebesar:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \text{ (Nm)} \dots\dots\dots(1)$$

Volume udara per satuan waktu (debit) yang bergerak dengan kecepatan (*v*) dan melewati daerah seluas (*A*) adalah:

$$V = v \cdot A \dots\dots\dots(2)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ yaitu:

$$m = \rho \cdot A \cdot v \text{ (kg/s)} \dots\dots\dots(3)$$

Substitusi persamaan (3) ke persamaan (1) menghasilkan daya angin yang menggerakkan turbin, seperti ditunjukkan persamaan (4) yaitu:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots(4)$$

Dimana,

Pa = Daya Angin (W)

ρ = Densitas Udara (1,22 Kg/m³)

A = Luas Penampang Turbin (m²)
 v = Kecepatan Angin (m/s)

• **Daya Generator**

Dengan mengukur besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan, dapat diketahui besarnya daya generator. Daya generator dapat dihitung dengan menggunakan rumus 5.

$$P_g = V * I \dots\dots\dots(5)$$

Dimana,

P_g = Daya Generator (W)
 V = Tegangan (Volt)
 I = Kuat Arus (Ampere)

• **Daya Rotor**

Pada umumnya perhitungan untuk menghitung daya pada gerak melingkar dapat dituliskan seperti pada rumus 6.

$$Pr = T \frac{\pi n}{30} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana,

Pr = Daya Rotor (W)
 T = Torsi (Nm)
 n = Putaran Poros (rpm)

• **Torsi**

Torsi adalah sebuah gaya yang bekerja pada poros yang dihasilkan oleh gaya dorong pada sumbu turbin angin, dimana gaya dorong ini memiliki jarak terhadap sumbu poros yang berputar. Torsi sebuah turbin angin dapat dihitung menggunakan rumus 7.

$$T = \frac{P_{generator}}{2\pi n} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana,

T = Torsi (Nm)
 P_g = Daya Generator (W)
 n = Putaran Poros (rpm)

• **Tip Speed Ratio (TSR)**

Tip Speed Ratio merupakan perbandingan antara kecepatan ujung rotor turbin terhadap kecepatan angin yang melalui rotor. Rasio kecepatan ujung rotor memiliki nilai nominal yang berubah-ubah terhadap perubahan kecepatan angin. Tip speed ratio dapat diketahui dengan persamaan 8.

$$\lambda = \frac{2\pi n r}{60 v} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana,

r = Jari-jari Turbin (m)
 n = Putaran Poros (rpm)
 v = Kecepatan Angin (m/s)

• **Koefisien Daya**

Koefisien daya adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh rotor dengan daya angin. Persamaan koefisien daya dapat diartikan seperti ditulis pada Persamaan 9.

$$Cp = \frac{P_{rotor}}{P_{angin}} \times 100 \% \dots\dots\dots(9)$$

Dimana,

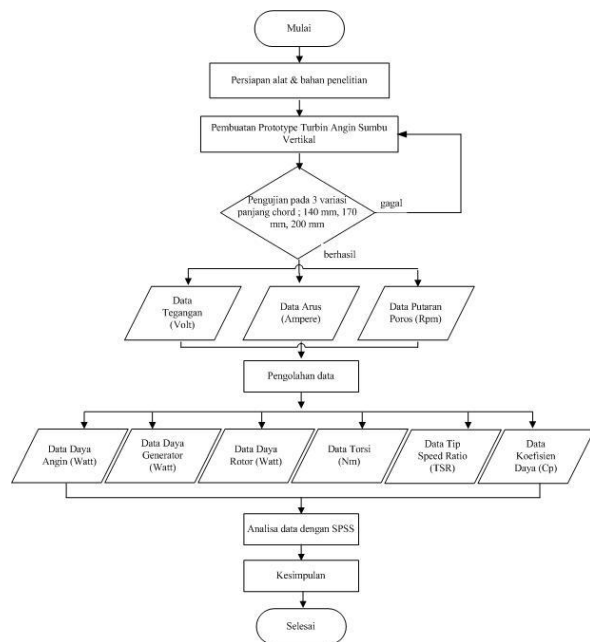
Cp = Koefisien Daya (Cp)
 Pr = Daya Rotor (W)

Pa = Daya Angin (W)

2. Metode Penelitian

2.1 Diagram Alir Penelitian

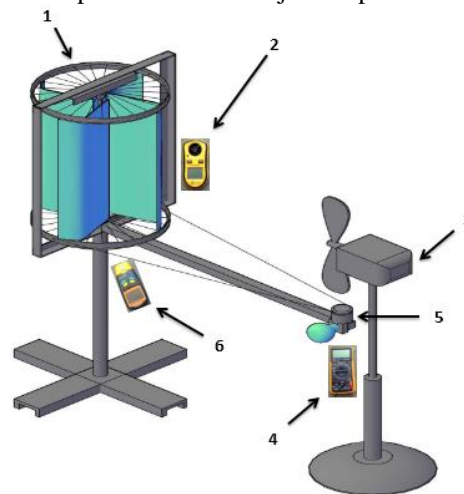
Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.2 Skema Alat Penelitian

Skema alat penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Alat Penelitian

Keterangan :

- 1. Turbin
- 2. Anemometer
- 3. Kipas Angin
- 4. Multimeter
- 5. Generator
- 6. Tachometer

2.3 Alat Penelitian

Sedangkan alat dalam penelitian ini meliputi:

1. Kipas angin sebagai sumber tenaga angin.
2. Anemometer untuk mengukur kecepatan angin.
3. Tachometer untuk mengukur kecepatan putaran poros.
4. Multimeter untuk mengukur tegangan dan arus turbin angin.

2.4 Hipotesa Penelitian

Hipotesa dalam penelitian ini adalah:

1. Hipotesa 1
 - H_0 : Tidak ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap daya angin turbin angin sumbu vertikal.
 - H_1 : Ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap daya angin turbin angin sumbu vertikal.
2. Hipotesa 2
 - H_0 : Tidak ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap daya angin turbin angin sumbu vertikal.
 - H_1 : Ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap daya angin turbin angin sumbu vertikal.
3. Hipotesa 3
 - H_0 : Tidak ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap daya rotor turbin angin sumbu vertikal.
 - H_1 : Ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap daya rotor turbin angin sumbu vertikal.
4. Hipotesa 4
 - H_0 : Tidak ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap torsi turbin angin sumbu vertikal.
 - H_1 : Ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap torsi turbin angin sumbu vertikal.
5. Hipotesa 5
 - H_0 : Tidak ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) turbin angin sumbu vertikal.
 - H_1 : Ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) turbin angin sumbu vertikal.
6. Hipotesa 6
 - H_0 : Tidak ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap koefisien daya turbin angin sumbu vertikal.
 - H_1 : Ada pengaruh panjang *chord* sudu terhadap koefisien daya turbin angin sumbu vertikal.

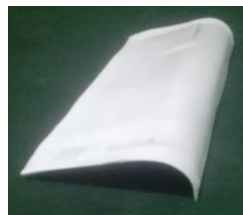
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil *Prototype* Sudu Turbin Angin Sumbu Vertikal.

Pada Gambar 4 merupakan *prototype* sudu turbin angin sumbu vertikal tipe L, dengan variasi panjang *chord* 140 mm, 170 mm dan 200 mm.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. *Prototype* Sudu Turbin (a) Panjang *Chord* 140 mm (b) Panjang *Chord* 170 mm (c) Panjang *Chord* 200 mm

3.2 *Prototype* Turbin Angin Sumbu Vertikal

Pada Gambar 5 merupakan *prototype* sudu turbin angin sumbu vertikal tipe L



Gambar 5. *Prototype* Turbin Angin Sumbu Vertikal

3.3 Pembahasan

Dari hasil penelitian dan pengukuran diperoleh nilai tegangan, arus dan putaran poros seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Uji Eksperimental

Panjang <i>chord</i> (cm)	Uji	Tegangan (V)	Arus (A)	Putaran Poros (rpm)
14 cm	1	2,7	1,8	29,0
	2	2,7	1,7	29,0
	3	2,8	1,7	31,7
Rata-rata		2,73	1,73	29,9
17 cm	1	3,0	1,9	41,0
	2	2,9	2,0	42,4
	3	2,9	2,0	41,0
Rata-rata		2,93	1,97	41,47
20 cm	1	3,2	2,5	59,2
	2	3,0	2,2	45,4
	3	3,2	2,4	57,3
Rata-rata		3,13	2,37	53,97

Dari hasil pengukuran pada Tabel 1 selanjutnya dilakukan pengolahan data dengan menggunakan rumus-rumus (1) sampai dengan (9), maka diperoleh hasil kinerja turbin angin seperti pada Tabel 2.

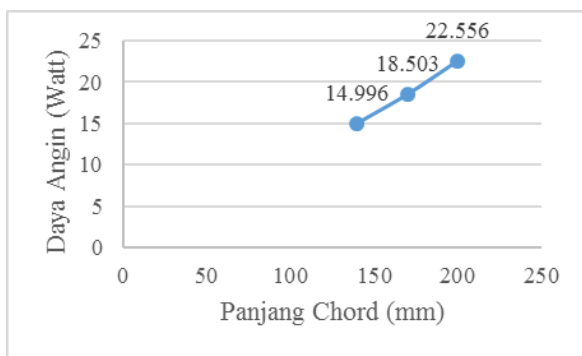
Tabel 2. Hasil Kinerja Turbin Angin

Panjang chord (mm)	Kecepatan angin (m/s)	Putaran poros (Rpm)	Daya Angin (Watt)	Daya Generator (Watt)	Daya Rotor (Watt)	Torsi (N.m)	TSR	Cp (%)
140	5	29,9	12,81	4,72	0,078	0,025	0,11	0,6
170	5	41,47	15,55	5,77	0,095	0,022	0,15	0,61
200	5	53,97	18,3	7,42	0,118	0,021	0,20	0,64

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa kinerja turbin angin dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan daya angin, daya generator, daya rotor (dalam Watt), Torsi (N.m), dan *Tips Speed Ratio* (TSR).

• Panjang Chord Terhadap Daya Angin

Hubungan panjang chord terhadap daya angin turbin ditunjukkan pada grafik di Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Panjang Chord Terhadap Daya Angin

Pada grafik Gambar 6 menunjukkan bahwa daya angin terbesar yang dihasilkan pada panjang chord 200 mm sebesar 22.556 Watt, sedangkan daya angin minimum terjadi pada panjang chord terkecil yaitu 140 mm dengan hasil daya 14.996 Watt. Pengaruh panjang chord terhadap daya angin disajikan dalam tabel Anova Program SPSS seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Anova Pengaruh Panjang Chord Terhadap Daya Angin

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	17.969	1	17.969	577.164	.026 ^b
	Residual	.031	1	.031		
	Total	18.000	2			

a. Dependent Variable: Panjang Chord (mm)

b. Predictors: (Constant), Daya Angin (Watt)

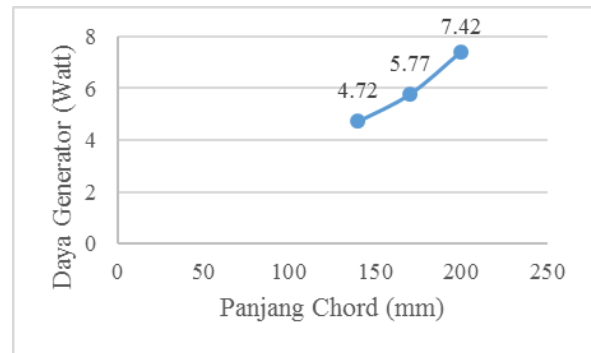
Jika melihat dari hasil pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa nilai $F_{hitung} = 577,164 > F_{tabel} = 161,45$, dan nilai signifikansi sebesar $0,026 < 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa H_0 ditolak dan menerima H_1 . Artinya bahwa panjang chord berpengaruh terhadap daya angin yang dihasilkan turbin angin, sehingga semakin besar panjang chord sudu turbin maka daya angin yang dihasilkan juga semakin besar.

Daya angin turbin berbanding lurus dengan densitas udara, luas penampang dan kecepatan angin yang dibuat tetap yaitu 5 m/s. Pada panjang chord 200 mm membuat penampang sudu menjadi lebih luas dibanding panjang chord 140 mm dan 170 mm.

Dengan penampang sudu yang lebih luas memungkinkan udara yang menghantam ke sudu lebih besar sehingga lebih besar pula daya angin yang dihasilkan [3].

• Panjang Chord Terhadap Daya Generator

Hubungan panjang chord terhadap daya generator pada turbin angin ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Panjang Chord Terhadap Daya Generator.

Pada grafik Gambar 7 menunjukkan bahwa daya generator terbesar yang dihasilkan turbin angin yaitu pada panjang chord 200 mm sebesar 7.42 Watt, sedangkan daya generator minimum terjadi pada panjang chord terkecil yaitu 140 mm dengan hasil daya generator 4.72 Watt.

Daya generator berbanding lurus dengan tegangan dan kuat arus listrik. Daya generator juga berbanding lurus dengan daya angin. Daya angin digunakan untuk memutar turbin, sehingga apabila daya angin besar, maka daya generator yang dihasilkan pun meningkat. Hal ini tidak terlepas dari putaran, peningkatan putaran pada turbin sejalan dengan peningkatan putaran pada generator.

Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus tertentu [11]. Dengan peningkatan panjang chord menyebabkan luas permukaan sudu yang menangkap angin lebih besar, sehingga daya angin yang memutar turbin lebih besar. Dengan peningkatan daya angin akan meningkatkan daya generator.

Pengaruh panjang chord terhadap daya generator disajikan dalam tabel Anova Program SPSS seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Anova Pengaruh Panjang Chord Terhadap Daya Generator

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	17.709	1	17.709	162.750	.041 ^b
	Residual	.291	1	.291		
	Total	18.000	2			

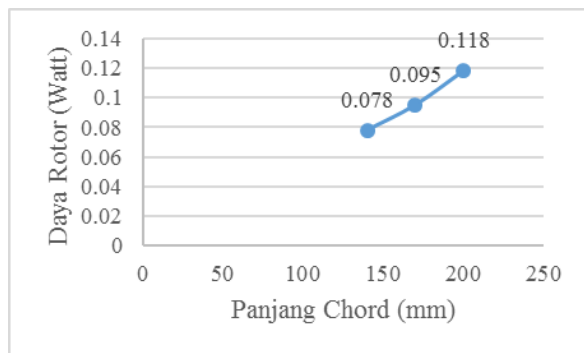
a. Dependent Variable: Panjang Chord (mm)

b. Predictors: (Constant), Daya Generator (Watt)

Jika melihat dari hasil Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai $F_{hitung} = 162,750 > F_{tabel} = 161,45$, dan nilai signifikansi sebesar $0,041 < 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa H_0 ditolak dan menerima H_1 . Artinya bahwa panjang *chord* berpengaruh terhadap daya generator yang dihasilkan turbin angin, sehingga semakin besar panjang *chord* sudu turbin maka daya generator yang dihasilkan juga semakin besar.

• **Panjang Chord Terhadap Daya Rotor**

Hubungan panjang *chord* terhadap daya rotor pada turbin angin ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Pengaruh Panjang Chord Terhadap Daya Rotor.

Pada grafik Gambar 8 menunjukkan bahwa daya rotor terbesar yang dihasilkan turbin angin yaitu pada panjang *chord* 200 mm sebesar 0.118 Watt, sedangkan daya rotor minimum terjadi pada panjang *chord* terkecil yaitu 140 mm dengan hasil daya rotor 0.078 Watt.

Daya rotor berbanding lurus dengan torsi dan putaran poros [3], sehingga daya rotor terbesar yaitu 0,188 Watt dihasilkan pada putaran poros terbesar yaitu 53,97 rpm. Dengan kata lain semakin panjang *chord* akan semakin besar daya rotor yang dihasilkan.

Pengaruh panjang *chord* terhadap daya rotor disajikan dalam tabel Anova Program SPSS seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Anova Pengaruh Panjang Chord Terhadap Daya Rotor

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	17,966	1	17,966	533,333	,028 ^b
	Residual	,034	1	,034		
	Total	18,000	2			

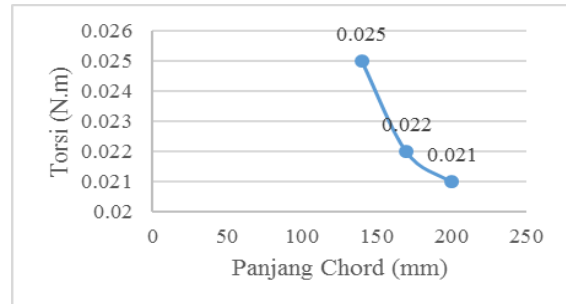
a. Dependent Variable: Panjang Chord (mm)
 b. Predictors: (Constant), Daya Rotor (Watt)

Dari hasil Tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai $F_{hitung} = 533,333 > F_{tabel} = 161,45$, dan nilai signifikansi sebesar $0,028 < 0,05$. ini menunjukkan bahwa H_0 ditolak dan menerima H_1 . Artinya bahwa panjang *chord* berpengaruh terhadap daya rotor yang dihasilkan turbin angin, sehingga semakin besar

panjang *chord* sudu turbin maka daya rotor yang dihasilkan juga semakin besar.

• **Panjang Chord Terhadap Torsi**

Hubungan panjang *chord* terhadap torsi pada turbin angin ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Pengaruh Panjang Chord Terhadap Torsi

Pada grafik Gambar 9 menunjukkan bahwa torsi terbesar yang dihasilkan turbin angin yaitu pada panjang *chord* 140 mm sebesar 0.025 N.m, sedangkan torsi minimum terjadi pada panjang *chord* terbesar yaitu 200 mm dengan hasil torsi 0.021 N.m.

Torsi berbanding lurus dengan daya generator namun berbanding terbalik dengan putaran poros [3]. Pada penelitian ini torsi terbesar dihasilkan pada chord 140 mm, dan putaran poros terkecil yaitu 29,9 rpm juga dihasilkan pada chord 140 mm.

Adapun pengaruh panjang *chord* terhadap torsi disajikan dalam tabel Anova Program SPSS seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Anova Pengaruh Panjang Chord Terhadap Torsi

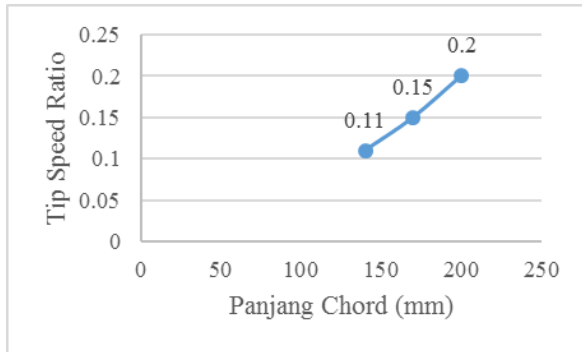
ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	16,615	1	16,615	12,000	,179 ^b
	Residual	1,385	1	1,385		
	Total	18,000	2			

a. Dependent Variable: Panjang Chord (mm)
 b. Predictors: (Constant), Torsi (N.m)

Dari hasil Tabel 6 dapat dilihat bahwa nilai $F_{hitung} = 12 < F_{tabel} = 161,45$, dan nilai signifikansi sebesar $0,179 > 0,05$. ini menunjukkan bahwa H_1 diterima dan menolak H_0 . Artinya bahwa panjang *chord* tidak berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan turbin angin.

• **Panjang Chord Terhadap Tip Speed Ratio (TSR)**

Hubungan panjang *chord* terhadap Tip Speed Ratio (TSR) pada turbin angin ditunjukkan dalam grafik Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Pengaruh Panjang *Chord* Terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR)

Pada grafik Gambar 10 menunjukkan bahwa *Tip Speed Ratio* (TSR) terbesar yang dihasilkan turbin angin yaitu pada panjang *chord* 200 mm sebesar 0,2, sedangkan TSR minimum terjadi pada panjang *chord* terkecil yaitu 140 mm dengan hasil TSR 0.11.

Tip Speed Ratio (TSR) berbanding lurus dengan putaran poros dan jari-jari turbin, namun berbanding terbalik dengan kecepatan angin [3]. Rasio kecepatan ujung rotor memiliki nilai nominal yang berubah-ubah terhadap perubahan kecepatan angin. Pada *chord* 200 mm dan kecepatan angin 5 mm/s, dihasilkan putaran poros terbesar yaitu 53,97 rpm, sehingga TSR yang dihasilkanpun maksimum yaitu 0,2. Hal ini menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya putaran turbin maka TSR yang dihasilkan akan meningkat [11].

Pengaruh panjang *chord* terhadap TSR disajikan dalam tabel Anova Program SPSS seperti pada Tabel 7.

Tabel 7. Anova Pengaruh Panjang *Chord* Terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR)

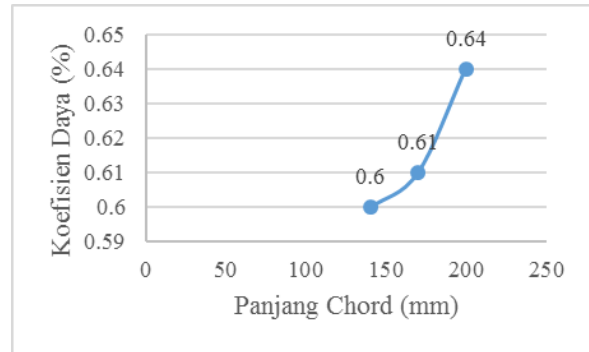
ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	17.926	1	17.926	243.000	.041 ^b
	Residual	.074	1	.074		
	Total	18.000	2			

a. Dependent Variable: Panjang Chord (mm)
 b. Predictors: (Constant), Tip Speed Ratio

Dari hasil Tabel 7 dapat dilihat bahwa nilai $F_{hitung} = 243 > F_{tabel} = 161,45$, dan nilai signifikansi sebesar $0,041 > 0,05$. ini menunjukkan bahwa H_0 ditolak dan menerima H_1 . Artinya bahwa panjang *chord* berpengaruh terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) yang dihasilkan turbin angin, sehingga semakin besar panjang *chord* sudu turbin maka *Tip Speed Ratio* (TSR) yang dihasilkan juga semakin besar.

• Panjang *Chord* Terhadap Koefisien Daya (Cp)

Hubungan panjang *chord* terhadap koefisien daya (Cp) pada turbin angin ditunjukkan dalam grafik Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Pengaruh Panjang *Chord* Terhadap Koefisien Daya (Cp)

Pada grafik Gambar 11 menunjukkan bahwa koefisien daya terbesar yang dihasilkan turbin angin yaitu pada panjang *chord* 200 mm sebesar 0.64%, sedangkan koefisien daya minimum terjadi pada panjang *chord* terkecil yaitu 140 mm dengan hasil Cp 0.6%.

Koefisien daya berbanding lurus dengan daya rotor namun berbanding terbalik dengan daya angin. Daya rotor berbanding lurus dengan putaran poros [3]. Dalam penelitian ini pada *chord* 200 mm, daya putaran poros yang dihasilkan adalah 53,97 rpm, dan koefisien daya sebesar 0,64 %. Hal ini menunjukkan bahwa dengan semakin bertambah panjangnya *chord* menyebabkan bertambahnya putaran poros turbin, sehingga koefisien daya semakin meningkat.

Pengaruh panjang *chord* terhadap koefisien daya disajikan dalam tabel Anova Program SPSS seperti pada Tabel 8.

Tabel 8. Anova Pengaruh Panjang *Chord* Terhadap Koefisien Daya (Cp)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	16.615	1	16.615	162.000	.018 ^b
	Residual	1.385	1	1.385		
	Total	18.000	2			

a. Dependent Variable: Panjang Chord (mm)
 b. Predictors: (Constant), Koefisien Daya (%)

Dari hasil Tabel 8 dapat dilihat bahwa nilai $F_{hitung} = 162 > F_{tabel} = 161,45$, dan nilai signifikansi sebesar $0,018 > 0,05$. ini menunjukkan bahwa H_0 ditolak dan menerima H_1 . Artinya bahwa panjang *chord* berpengaruh terhadap koefisien daya yang dihasilkan turbin angin, sehingga semakin besar panjang *chord* sudu turbin maka koefisien daya yang dihasilkan juga semakin besar.

Hal ini juga ditunjukkan dalam penelitian [12] bahwa panjang *chord* sudu secara signifikan dapat mempengaruhi koefisien daya turbin. Semakin meningkat panjang *chord*, maka daya turbin yang dihasilkan juga meningkat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil data pengujian maka kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian "Pengaruh Panjang

Chord Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal” adalah:

1. Panjang *chord* sudu berpengaruh terhadap daya angin, daya rotor, daya generator dan koefisien daya. Semakin panjang *chord* sudu turbin maka daya angin, daya rotor, daya generator dan koefisien daya yang dihasilkan semakin besar.
2. Panjang *chord* sudu berpengaruh terhadap torsi. Semakin panjang *chord* sudu turbin maka torsi yang dihasilkan semakin kecil.
3. Panjang *chord* sudu berpengaruh terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR). Semakin panjang *chord* sudu turbin maka TSR yang dihasilkan semakin besar.

Ucapan Terimakasih

Dalam kegiatan penelitian ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (P3M) Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe Cepu melalui hibah Penelitian Internal sehingga penulis memiliki kesempatan untuk menyumbangkan pemikiran.
2. Instruktur, staf, asisten laboratorium Konversi Energi, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran sehingga prototype dan pengujian pada turbin angin sumbu vertikal dapat dilakukan.

Daftar Rujukan

- [1] A. Sugiyono, 2016. Outlook Energi Indonesia 2015-2035 : Prospek Energi Baru Terbarukan, pp. 87–96.
- [2] W. Furqona, 2017. Pemanenan energi listrik dari kincir angin vertikal.
- [3] M. Adaramola, 2014. Wind Turbine Technology Principles and Design. Toronto, New Jersey: Apple Academic Press, Inc.
- [4] A. Kusbiantoro, R. Soenoko, and D. Sutikno, 2015. Pengaruh panjang lengkung sudu terhadap unjuk kerja turbin angin poros vertikal savonius,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9.
- [5] V. Lyatkher, 2014. Wind Power Turbine Design, Selection, and Optimization, 1st ed. Salem, Massachusetts.
- [6] T. Nurcahyadi and Sudarja, 2008. Pengaruh Lokasi Ketebalan Maksimum Airfoil Simetris Terhadap Koefisien Angkat Aerodinamisnya,” *J. Ilm. Semesta Tek.*, vol. 11, no. 1, pp. 110–124.
- [7] J. V. Akwa, H. A. Vielmo, and A. P. Petry, 2012. A review on the performance of Savonius wind turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3054–3064.
- [8] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, 2015. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades,” in 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014 An, vol. 68, pp. 297–304.
- [9] J. Jamal, A. M. S. Yunus, and L. Lewi, 2019. “Pengaruh Kelengkungan Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius,” *INTEK J. Penelit.*, vol. 6, no. 2, p. 139.
- [10] E. S. Wijayanti, Saparin, and Y. Setiawan, 2019. Turbin Angin Savonius Empat Sudu Dengan Variasi Model Profil Sebagai Media Belajar Siswa,” *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 57–61.
- [11] F. Aryanto, I. M. Mara, and M. Nuarsa, 2013. Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 1, pp. 50–59.
- [12] Z. Mao, W. Tian, and S. Yan, 2016. Influence analysis of blade chord length on the performance of a four-bladed Wollongong wind turbine,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2.