

PENGARUH JUMLAH SUDU TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL TIPE *DARRIEUS-H*

Nobertus Dodi¹, Karnowo²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang
e-mail: nobertusdodi@gmail.com

Abstrak. Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan *Windmill*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar daya output yang bisa dihasilkan oleh turbin angin vertikal *Darrieus* tipe-H dengan menggunakan NACA 4415, kemudian selain dari itu untuk mengetahui apakah turbin angin 2 sudu, 3 sudu, dan 4 sudu ini akan menghasilkan daya yang besar atau sebaliknya. Hasil dari penelitian turbin angin vertikal tipe *Darrieus-H* ini menunjukkan seiring bertambahnya kecepatan pada turbin angin maka daya yang akan dihasilkan juga akan semakin meningkat, tetapi dengan seiring bertambahnya variasi pada jumlah sudu daya yang dihasilkan menurun karena setiap pembebanan yang bertambahakan mengurangi daya.

Kata Kunci: Turbin Angin *Darrieus-H*, Jumlah Sudu, NACA 4415.

Abstract. Wind turbines are windmills which used to produce electricity. Generally, wind turbine was designed to accommodate of farmers in the milling of rice, irrigation, etc. Firstly, wind turbines were mostly built in Denmark, the Netherlands and other European countries known as Windmill. This study aim to find how much power output can be generated by the H-type of Darrieus vertical wind turbine using NACA 4415. Parameters of this study is blades wind turbine about 2-4 blades. The results of the study of vertical-type wind turbines of the Darrieus-H type show that wind turbines power increase along with wind speed increases. On the other hand, increasing of blades cause wind turbine power decreases as any implanted loading reduces power.

Keywords: *Darrieus-H* Wind Turbine, The Number Of Blades, NACA 4415.

PENDAHULUAN

Pengembangan sumber energi ini harus memperhatikan tiga "E", yakni energi, ekonomi, dan ekologi. Jadi, pengembangan sumber energi harus dapat memproduksi energi dalam jumlah yang besar, dengan biaya yang rendah serta mempunyai dampak minimum terhadap lingkungan⁽⁴⁾.

Pemanfaatan kincir angin telah dilakukan sejak lama, pada sekitar 5000 SM angin digunakan untuk menggerakkan perahu di sungai nil. Penggunaan kincir sederhana dimulai sejak awal abad ke-7 dan kincir angin sendiri mulai tersebar ke negara-negara persia, mesir dan cina dengan berbagai desain yang dibuat. Di eropa kincir angin mulai dikenal pada abad ke-11 dan pada awal abad ke-19 mulai berkembang pada saat revolusi industri⁽¹⁾.

Kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat akan tetapi energi yang biasanya dijadikan untuk menghasilkan energi listrik yaitu energi fosil, masalah yang dihadapi oleh sebagian besar negara-negara dan termasuk di indonesia sendiri adalah masalah tentang semakin berkurangnya energi. Menurut International Energy Agency (IEA) setiap hari keperluan listrik yang diperlukan adalah sebesar 14 terrawatt atau bisa dikatakan setara dengan 210 juta barel minyak. Kebutuhan energi tersebut diperkirakan akan mengalami kenaikan sekitar 60 terrawatt untuk mencapai pemenuhan energi dari total 8 miliar penduduk didunia saat ini⁽¹⁰⁾.

Peningkatan kebutuhan listrik ini di kemudian hari yang diperkirakan dapat tumbuh rata-rata 6,5 % per tahun hingga 2020. Konsumsi listrik di indonesia sendiri yang begitu besar akan menjadi masalah bila dalam penyediaanya tidak sejalan dengan kebutuhan. Kebutuhan pasokan energi listrik yang terus menerus dan berkualitas menjadi tuntutan yang harus dipenuhi oleh negara. Untuk mengatasi pemenuhan kebutuhan listrik diatas maka diperlukan sebuah sumber energi baru yang mampu memenuhi kebutuhan listrik nasional yang semakin besar.

Menurut Dabiri (2011) menyebutkan bahwa energi angin di indonesia belum sepenuhnya digunakan sebagai energi alternatif sebagai penghasil listrik, pada prinsipnya energi terbarukan yaitu angin sangat mudah untuk diperoleh dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Energi sumber daya angin yang terbarukan sangatlah memerlukan lahan yang strategis untuk bisa menghasilkan jumlah energi yang besar⁽²¹⁾.

Pemanfaatan energi angin dikonversi melalui tahapan-tahapan yaitu yang pertama adalah angin akan menggerakkan rotor atau yang biasa disebut baling-baling, dan menyebabkan baling-baling bisa berputar mengikuti arah angin⁽⁶⁾.

LANDASAN TEORI

Energi Angin

Angin adalah udara yang bergerak karena adanya perbedaan dari tekanan bumi, angin sendiri akan bergerak dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang memiliki tekanan terendah. Terjadinya angin adalah ketika matahari memanaskan udara dan kemudian menimbulkan terjadinya peristiwa udara naik dan membentuk *vacum*, setelah terbentuknya *vacum* turun ke udara yang dingin dan membentuk angin. Terjadinya peristiwa angin juga karena adanya pemanasan oleh matahari. Kemudian para ahli mengasumsikan bahwa 2% energi sinar matahari yang diterima oleh bumi kemudian akan dikonversi menjadi energi kinetik⁽³⁾.

Terjadinya angin yang di permukaan bumi ini juga karena adanya penerimaan dari radiasi surya, kemudian yang menyebabkan terjadinya perbedaan suhu udara, dengan adanya perbedaan suhu tersebut yang kemudian menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan dan menyebabkan terjadinya gerakan udara. Terjadinya perubahan waktu dari siang ke malam merupakan gaya gerak utama sistem angin harian, karena perbedaan antara panas yang kuat antara udara di atas darat dan laut atau antara udaradiatas tanah tinggi dan tanah rendah ⁽¹⁰⁾.

Energi angin sering disebut sebagai energi kinetik dapat diubah menjadi energi listrik atau mekanik dengan menggunakan turbin angin. Energi kinetik yang terdapat pada angin pada umumnya dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Dimana : E = energi Kinetik (joule)

m = massa angin (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

volume udara per satuan waktu yang bergerak dengan kecepatan v dan melewati daerah seluas A adalah : $v = v A$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan p , adalah :

$$m = pV = pv A$$

Untuk daya angin yang dihasilkan dari energi kinetik pada angin yang bergerak dalam satuan waktu dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} (pAv)(v^2) = \frac{1}{2} pAv^3$$

Dimana :

P_w = Daya Angin (Watt)

p = Densitas Udara (kg/m^3)

A = Luas Penampang Turbin (m^2)

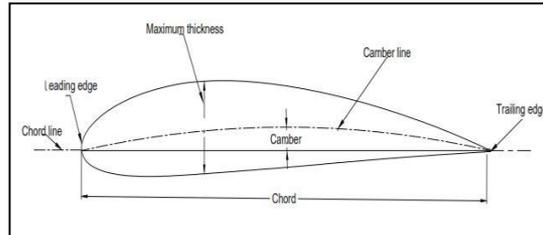
v = Kecepatan Angin (m/s)

Turbin Angin Darrieus

Turbin angin *Darrieus* berbilah lurus yang sangat cocok alternatif yang berasal dari desain konvensional bahkan fitur yang lebih menarik sebagai konstruksi dan manufaktur sederhana. Dalam desain H-rotor, pisau lurus dan vertikal telah digunakan digunakan sebagai pengganti pisau melengkung dan langsung dipasang dan terhubung ke poros rotor oleh struts horizontal, struts ini mungkin di bagian tengah pisau atau pada ujung pisau Salah satu fitur penting dari angin H-rotor *Darrieus* turbin adalah kemampuan untuk menghadapi angin dari segala arah. Selain itu sangat mudah untuk membangun karena desain dan manufaktur yang sederhana, mudah untuk memasang dan memelihara, ini mengarah ke biaya yang sangat rendah dibandingkan ke tipe lain ⁽⁸⁾.

NACA Airfoil

Airfoil adalah bentuk aerodinamika yang dianggap sangat efektif untuk menghasilkan gaya angkat atau yang disebut gaya *Lift*, Airfoil sendiri memberikan nilai koefisien *Drag* yang kecil jika dibandingkan dengan *Lift* yang diberikan. Pada airfoil sendiri terdapat beberapa variabel yang dinyatakan dengan lift yang memberikan gambaran bentuk dari airfoil diantaranya panjang airfoil (*Chord*), ketebalan (*Thickness*) dan lengkungan (*Chamber*)⁽¹⁸⁾.



Gambar 1 Bagian –bagias airfoil

Dari gambar airfoil diatas, dapatdijelaskan lebih rinci sebagai berikut :

- 1) *Leading edge* adalah bagian depan pada blade dan bentuknya menyerupai kurva sehingga udara berhembus dengan lurus.
- 2) *Trailing edge*, merupakan bagian permukaan paling belakang dari camber line.
- 3) *Mean chamber line*, adalah merupakan garis pertengahan yang membagi antara permukaan bagian atas dan permukaan bagian bawah *airfoil*.
- 4) *Chord line*, adalah merupakan garis lurus yang menghubungkan *leading edge* dan *trailing edge*.
- 5) *Chord*, merupakan perpanjangan dari chord line mulai dari leading edge hingga *trailing edge*. chord adalah karakteristik dimensi dari suatu *airfoil*.
- 6) *Maximum chamber*, merupakan jarak antara mean chamber line dengan *chord line*. Maximum chamber membantu mendefinisikan bentuk dari *mean chamber line*.

(TSR) Tip Speed Ratio

TSR atau sering disebut *Tip speed ratio* adalah suatu perbandingan kecepatan antara putaran turbin terhadap kecepatan angin. Tip speed ratio ini dilambangkan dengan λ .

ω merupakan kecepatan sudut rotor yang dapat ditentukan melalui persamaan :

$$\omega = \frac{2\pi n \text{ rad}}{60 \text{ v}}$$

Dimana:

λ = Tip Speed Ratio

ω = Kecepatan Sudut Rotor (rad/s)

R = Jari-Jari Turbin (m)

v = Kecepatan Angin (m/s)

Pada kecepatan tertentu, *TSR* akan mempengaruhi kecepatan rotor. Turbin yang menggunakan prinsip gaya angkat (*Lift*) akan memiliki *TSR* yang relatif lebih besar dibandingkan dengan turbin angin tipe *drag*⁽¹⁴⁾.

Gaya Lift dan Gaya Drag

Dimana pada titik tertentu mengalami perbedaan tekanan tetapi tergantung dimana titik-titik tersebut. Terjadinya perbedaan ini menyebabkan terjadinya distribusi tekanan yang berbeda sehingga menimbulkan gaya aerodinamis. Yang kedua adalah terjadinya tegangan geser yang terjadi pada benda yang berasal dari fluida yang melawan bidang permukaan benda. Resultan dan τ_w pada titik permukaan menghasilkan gaya R , dan kemudian diuraikan menjadi dua komponen gaya. Komponen gaya yang paralel biasa disebut *drag force* atau yang biasa disebut gaya hambat dan gaya angkat biasanya dinamakan gaya *lift force* ⁽²⁰⁾.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}$$

dimana: C_D =Koefisien Gaya Hambat

C_L = Koefisien Gaya Angkat

ρ = Densitas Fluida (kg/m³)

A = Luasan Acuan (m²)

c = Panjang Chord (m)

v =Kecepatan Fluida Relatif Terhadap Obyek (m/s) ⁽¹⁹⁾.

Brake Horse Power

Brake Horse Power adalah daya dari kincir yang diukur setelah mengalami pembebanan. *Brake horse power* adalah nilai dari unjuk kerja turbin yang diukur setelah terjadi massa pembebanan yang tersambung pada generator, gearbox, pompa ataupun perangkat tambahan lainnya .

Dimana:

$$P_{generator} = V \cdot I$$

$P_{generator}$ = Daya Motor Listrik (watt)

V =Tegangan Generator Listrik(volt)

I = Kuat Arus Listrik (Ampere)

Brake Horse Power dapat dihitung setelah didapatkan nilai $P_{generator}$ dengan rumus sebagai berikut:

Dimana

BHP = *Brake Horse Power* (watt)

$P_{generator}$ = Daya Motor Listrik (watt)

$\eta_{generator}$ = Efisiensi Generator Listrik (%).

Efisiensi

$$\eta = \frac{BHP}{P_{input}} \times 100\%$$

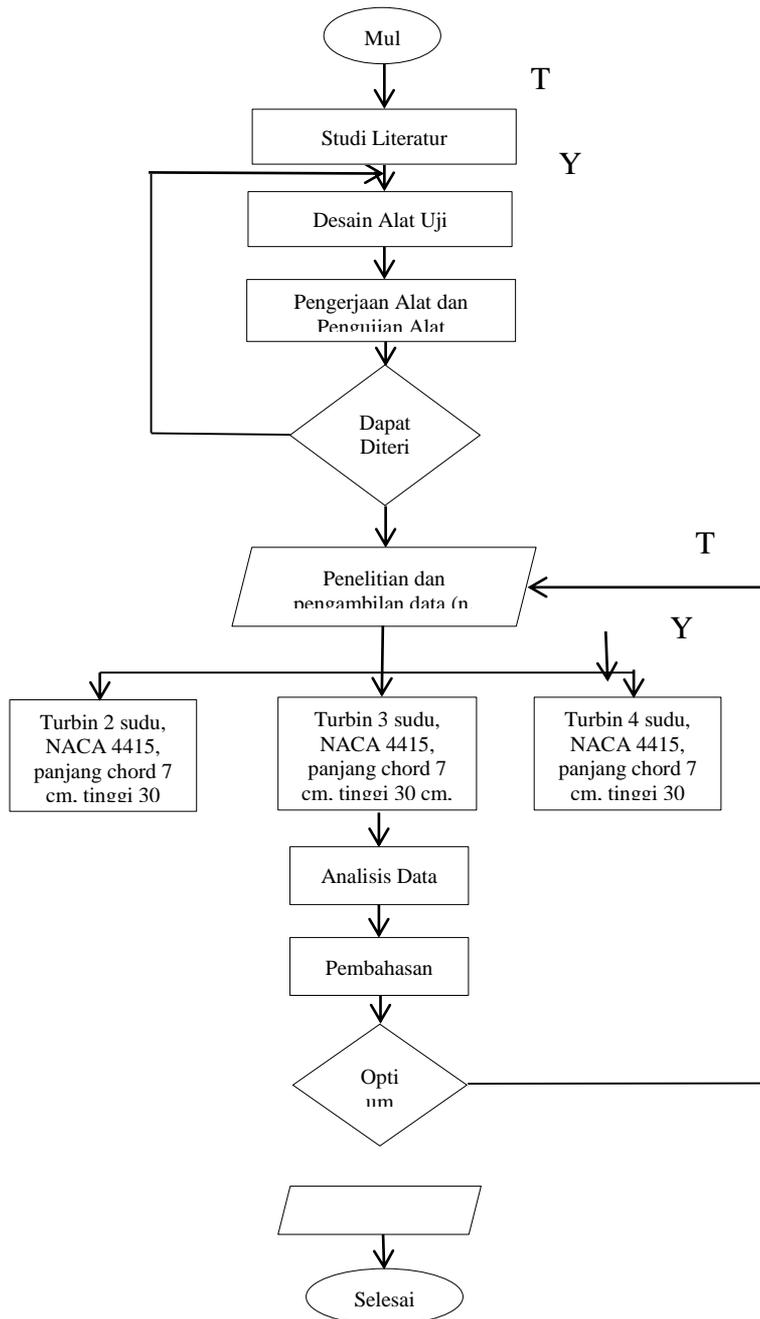
Dimana:

H = Efisiensi (%)

BHP = *Brake Horse Power* (watt)

P_{input} = Daya Masukan (watt)

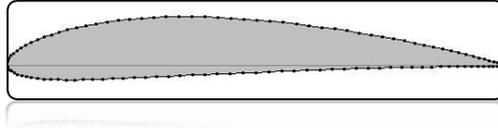
METODE PENELITIAN



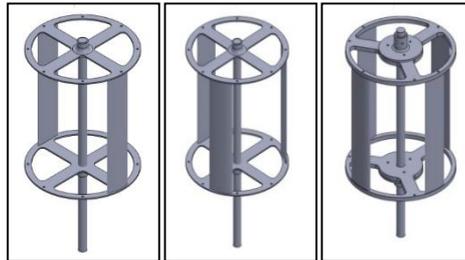
Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Perancangan Turbin

Tahap pertama dalam perancangan turbin ini adalah melakukan perancangan dari sudu yang akan digunakan dengan menggunakan aplikasi *Solidworks* 2014. Profil *Blade* yang akan digunakan adalah 4415, variasi yang akan digunakan dalam perancangan ini adalah jumlah sudu dengan menggunakan 2 sudu, 3 sudu dan 4 sudu.



Gambar 3 Airfoil NACA 4415



Gambar 4 Variasi Jumlah Sudu Pada Turbin

Parameter	2 sudu	3 sudu	4 sudu
<i>Airfoil</i>	NACA 4415	NACA 4415	NACA 4415
Panjang chord	7 cm	7 cm	7 cm
Diameter	25 cm	25 cm	25 cm
Tinggi <i>Blade</i>	30 cm	30 cm	30 cm

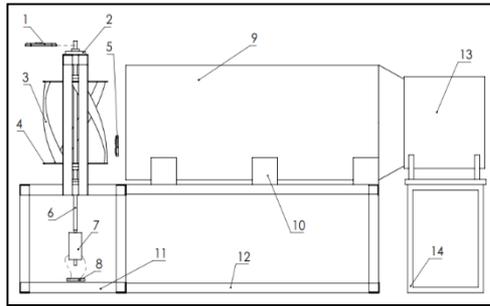
Alat Penelitian

- Blower motor listrik sinkron
- Anemometer
- Tachometer digital
- Amperemeter
- Multitester

Bahan Penelitian

- Serat fiber
- Aluminium
- Bearing

Teknik Pengumpulan Data



1. Tachometer
2. Bearing
3. Blade
4. Spoke Arm
5. Anemometer
6. Poros Turbin
7. Generator
8. multitester
9. Terowongan
10. Dudukan
11. Rangka Turbin
12. Rangka
13. Blower
14. Dudukan blower

Kalibrasi Instrum

kalibrasi instrumen adalah dimana untuk menentukan kebenaran konvensional nilai penunjuk pada alat ukur dan bahan ukur dengan membandingkan terhadap standar alat ukur yang bisa ke standar nasional maupun internasional. Dalam penelitian ini alat-alat yang dibutuhkan adalah anemometer, tachometer, dan multimeter.

a. Anemometer

- 1) Pertama kita mulai melakukan menghubungkan alat ke rangkaian.
- 2) Kedua melakukan instrumen supaya pusat rotasi bisa berada diatas pusat selambar kertas yang sudah diatur dengan tanda sudut.
- 3) Ketiga adalah mengatur atau menempatkan bantalan untuk bisa berorientasi.
- 4) Keempat adalah kalibrasi pada kecepatan sudu ditentukan oleh kecepatan angin.

b. Multimeter

- 1) Pertama memastikan dan mengecek jarum penunjuk meter sudah tepat mengarah ke angka 0.
- 2) Kedua memasang probe pada konektor (+) dan (-).
- 3) Ketiga memutar rangeselektor switch ke skala ohm-meter.
- 4) Keempat memasang probe positif ke probe negatif supaya terjadi short circuit.
- 5) Kelima memastikan arah jarum penunjuk sudah mengarah ke 0 pada skala ohm-meter.

c. Tachometer

- 1) Pertama adalah memasang bagian magnet di keliling coil, sehingga menimbulkan aliran listrik jika alat dijalankan.
- 2) Kedua adalah mengatur rpm yang telah ditentukan.
- 3) Ketiga adalah listrik yang timbul akan membuat gerakan pada bagian meter.

4) Keempat adalah mengulangi mengambil data dan jika sudah selesai mulai

Analisa Data

Penelitian ini akan menggunakan metode deskriptif eksperimen yaitu metode dalam membuat penelitian secara sistematis dan akurat tentang fakta yang didapat dari penelitian. Dalam perhitungan daya yang akan diambil, dan rumus yang akan digunakan adalah seperti persamaan, rumus TSR (*tip speed ratio*), dan rumus koefisien daya (C_p).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil data yang telah diperoleh dari turbin angin dengan memvariasikan pada jumlah sudu, turbin angin 2 sudu, turbin angin 3 sudu dan turbin angin 4 sudu. Dan untuk setiap variasi yang dilakukan dengan empat kali percobaan dengan kecepatan angin (m/s) yaitu 4,2 m/s 5,2 m/s, 6,2 m/s dan 7,2 m/s. Kemudian data yang telah diperoleh dari hasil eksperimen akan di olah menjadi data disusun dalam bentuk tabel dan grafik. Grafik ini terdiri dari beberapa hubungan antara variabel, yaitu kecepatan angin (m/s), putaran (Rpm), arus listrik (I) dan voltase (V).

Data Hasil Pengujian

Tabel 1 Variasi Dengan Jumlah Dua Sudu Turbin Angin Vertikal Tipe Darrieus.

Kecepatan awal (m/s)	Kuat arus, I (Ampere)	Tegangan, V (Volt)	Putaran, n (Rpm)
4,2	0,1426	2,14333	302
5,2	0,3	4,96	508,3
6,2	0,3133	6,20333	699
7,2	0,3266	6,46	914

Tabel 2 Variasi Dengan Jumlah Tiga Sudu Turbin Angin Vertikal Tipe Darrieus.

Kecepatan awal (m/s)	Kuat arus, I (Ampere)	Tegangan, V (Volt)	Putaran, n (Rpm)
4,2	0,1506	2,25333	326,6
5,2	0,28	4,33	455
6,2	0,28	5,42333	627
7,2	0,28	5,66667	815,3

Tabel 3 Variasi Dengan Jumlah empat Sudu Turbin Angin Vertikal Tipe Darrieus

Kecepatan awal (m/s)	Kuat arus, I (Ampere)	Tegangan, V (Volt)	Putaran, n (Rpm)
4,2	0,1636	2,17333	299,3
5,2	0,27	4,33667	445
6,2	0,3	5,34667	617,3
7,2	0,3	5,54	798

Tabel 4 Tip Speed Ratio (TSR)

Kecepatan awal m/s	Tip Speed Ratio (TSR)		
	2 sudu	3 sudu	4 sudu
4,2	0,9031	0,976	0,8951
5,2	1,2278	1,099	1,0748
6,2	1,8889	1,270	1,2506
7,2	1,594	1,42	1,3920

Tabel 5 Power Coefficient (Cp)

Kecepatan awal m/s	Power Coefficient (Cp)		
	2 sudu	3 sudu	4 sudu
4,2	0,0955	0,1060	0,111
5,2	0,245	0,199	0,192
6,2	0,188	0,147	0,155
7,2	0,130	0,098	0,103

Tabel 6 Tegangan volt

Kecepatan awal m/s	Tegangan volt		
	2 sudu	3 sudu	4 sudu
4,2	2,1433	2,2533	2,173
5,2	4,96	4,33	4,336
6,2	6,203	5,423	5,346
7,2	6,46	5,666	5,43

Tabel 7 kuat arus (Ampere)

Kecepatan awal m/s	Kuat Arus (Ampere)		
	2 sudu	3 sudu	4 sudu
4,2	0,1426	0,1506	0,16
5,2	0,3	0,28	0,27
6,2	0,3133	0,28	0,3
7,2	0,32667	0,28	0,3

Tabel 8 Daya (Watt)

Kecepatan awal m/s	Daya (watt)		
	2 sudu	3 sudu	4 sudu
4,2	0,3057	0,3395	0,355
5,2	1,488	1,2124	1,170
6,2	1,94371	1,51853	1,604
7,2	2,11027	1,58667	1,662

Pengolahan Data

Setelah melakukan pengujian, pada tahap ini akan dilakukan pengolahan data yang diambil dari tabel 4.1 dengan variasi dua jumlah sudu dengan kecepatan angin 5,2 m/s. Contoh perhitungan daya listrik, tip speed ratio dan koefisien daya.

$$V1 : 5,2 \text{ m/s}$$

$$V : 4,96 \text{ volt}$$

$$I : 0,3 \text{ A}$$

$$N : 508,33$$

Perhitungan daya listrik dapat ditulis dengan persamaan (2.20) seperti berikut.

$$\begin{aligned} P_{\text{generator}} &: V \cdot I \\ &: 4,96 \cdot 0,3 \\ &: 1,488 \text{ w} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas didapatkan daya listrik dari ($P_{\text{generator}}$) sebesar 1,488 w.

Selanjutnya adalah menghitung koefisien daya turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{P_t}{P_w} \\ &= \frac{P_t}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \\ &= \frac{1,488}{\frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,072 \cdot 5,2^3 \cdot 0,5} \\ &= \frac{1,488}{30,37} \\ &= 0,048 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan koefisien daya (C_p) sebesar 0,048.

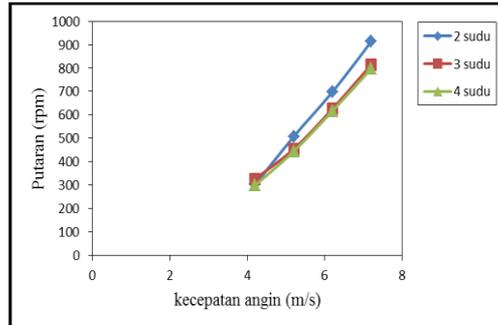
Selanjutnya untuk mendapatkan *Tip Speed Ratio* (TSR) dapat dihitung dengan menggunakan :

$$\begin{aligned} \text{TSR} &= \frac{\omega \cdot r}{v} \\ &= \frac{2\pi n \cdot R}{60 \cdot v} \\ &= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 508,33 \cdot 0,12}{60 \cdot 5,2} \\ &= \frac{383,077}{312} \end{aligned}$$

$$= 1,227$$

Sehingga didapatkan perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 1,227.

Hubungan Variasi Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin Angin.



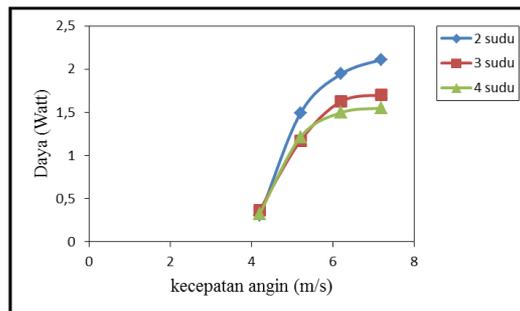
Gambar 5 Grafik (Rpm) dan Kecepatan Angin (m/s)

Pada gambar 4.1 dengan 2 jumlah sudu dengan kecepatan angin 4,2 m/s menghasilkan 302 rpm, sedangkan pada 5,2 m/s menghasilkan 508,33 rpm, dan kemudian pada 6,2 m/s mendapatkan hasil 699 rpm dan kemudian pada variasi 7,2 m/s menghasilkan 914 rpm.

Sedangkan pada jumlah 3 sudu dengan kecepatan angin 4,2 m/s diperoleh 326,667 rpm, sedangkan kecepatan 5,2 m/s mendapatkan hasil 455 rpm, dan pada kecepatan angin 6,2 m/s diperoleh 627 rpm, dan pada kecepatan angin 7,2 m/s diperoleh 815,333 rpm.

Sedangkan pada variasi 4 sudu dengan kecepatan angin 4,2 m/s mendapatkan hasil 299,333 rpm, dan pada kecepatan angin 5,2 m/s berhasil diperoleh 445 rpm, dan pada 6,2 m/s diperoleh 617,333, dan pada kecepatan 7,2 m/s mendapatkan hasil 798 rpm.

Hubungan Variasi Kecepatan Angin Terhadap Daya (Watt) Turbin Angin.



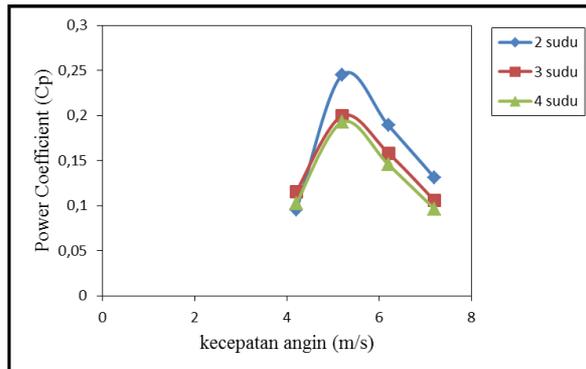
Gambar 6 Variasi Kecepatan Angin(m/s) Terhadap Daya Turbin Angin

Seperti yang terlihat digrafik kecepatan angin 4,2 m/s dengan variasi 2 sudu menghasilkan daya sebesar 0,30578 watt, sedangkan pada kecepatan angin 5,2 m/s menghasilkan daya sebesar 1,488 watt, pada variasi kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan daya sebesar 1,94371 watt, dan pada variasi kecepatan angin 7,2 m/s menghasilkan daya sebesar 2,11027 watt.

Pada 3 jumlah sudu dengan variasi kecepatan angin 4,2 m/s menghasilkan daya sebesar 0,3395 watt, dan pada 5,2 m/s menghasilkan daya sebesar 1,2124, kemudian pada kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan daya sebesar 1,51853 watt dan pada variasi kecepatan angin 7,2 m/s

menghasilkan daya sebesar 1,58667 watt. Pada gambar grafik diatas menunjukkan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin maka daya yang dihasilkan juga meningkat, tetapi dengan seiring bertambahnya variasi jumlah sudu daya yang didapatkan semakin kecil, dan berat pada sudu juga mempengaruhi daya yang dihasilkan karna setiap pembebanan yang bertambah akan mengurangi daya yang dihasilkan.

Hubungan Variasi Kecepatan Angin Terhadap Power Coefficient (Cp) pada turbin.



Gambar 7 Variasi Kecepatan Angin Terhadap Power Coefficient (Cp)

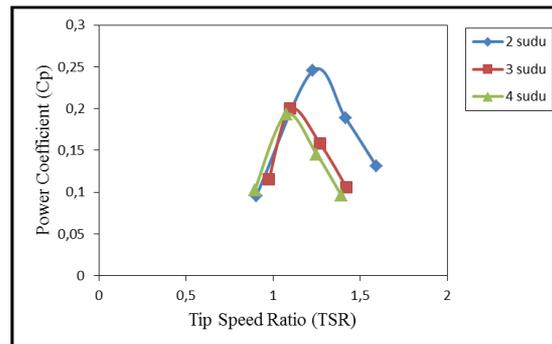
Pada gambar 7 variasi kecepatan angin terhadap power coefficient (Cp). Pada variasi 2 sudu dengan kecepatan angin 4,2 m/s menghasilkan Cp sebesar 0,09556, seiring bertambahnya variasi kecepatan angin 5,2 m/s menghasilkan 0,24514 dan kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan Cp sebesar 0,18889, dan pada 7,2 m/s menghasilkan Cp sebesar 0,13091.

Sedangkan pada 3 jumlah sudu dengan kecepatan angin 4,2 n/s menghasilkan 0,11525, kecepatan 5,2 m/s menghasilkan sebesar 0,19974, namun pada kecepatan berikutnya mengalami penurunan, pada kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan 0,15811 dan kecepatan angin 7,2 m/s menghasilkan nilai sebesar 0,10546.

Turbin dengan variasi 4 jumlah sudu dengan variasi kecepatan angin 4,2 m/s menghasilkan nilai sebesar 0,11525, dan pada kecepatan angin 5,2 m/s turbin dengan variasi empat jumlah sudu mengalami peningkatan sebesar 0,1929, namun pada kecepatan angin berikutnya mengalami penurunan pada kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan nilai sebesar 0,14549, dan pada kecepatan angin 7,2 m/s menghasilkan nilai sebesar 0,09623.

Dari variasi jumlah sudu diatas dengan kecepatan angin 5,2 m/s memiliki nilai koefisien daya yang paling besar pada semua kecepatan dan pada variasi jumlah sudu masing-masing. Berbeda dengan hasil daya dan putaran yang selalu meningkat pada setiap penambahan kecepatan angin, pada *power coefficient* turbin penambahan kecepatan akan membentuk garis parabolik dan pada kecepatan angin tertentu menghasilkan nilai tertinggi, dan dengan penambahan kecepatan angin akan mengakibatkan nilai pada *power coefficient* menurun, dan pada hal tersebut dikarenakan daya yang dihasilkan oleh generator tidak bisa mengimbangi peningkatan daya secara normal.

Hubungan Antara Variasi Kecepatan Angin Terhadap *Power Coefficient* (C_p) dan *Tip Speed Ratio* (Tsr).



Gambar 8 Hubungan Antara Variasi Kecepatan Angin (m/s) Terhadap *Power Coefficient* (C_p) dan *Tip Speed Ratio* (TSR).

Hubungan C_p - Tsr pada turbin angin darrieus dengan variasi kecepatan angin dan jumlah sudu, pada variasi kecepatan angin 4,2 m/s dengan 2 jumlah sudu menghasilkan nilai tsr sebesar 0,90312 dan nilai cp dihasilkan sebesar 0,9556, dan kemudian pada kecepatan angin 5,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 1,22782 dan nilai cp dihasilkan sebesar 0,24514, dan pada kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 1,41604 dan menghasilkan nilai cp sebesar 0,18889 dan pada kecepatan angin paling tinggi yaitu 7,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 1,59442 dengan nilai cp sebesar 0,13091.

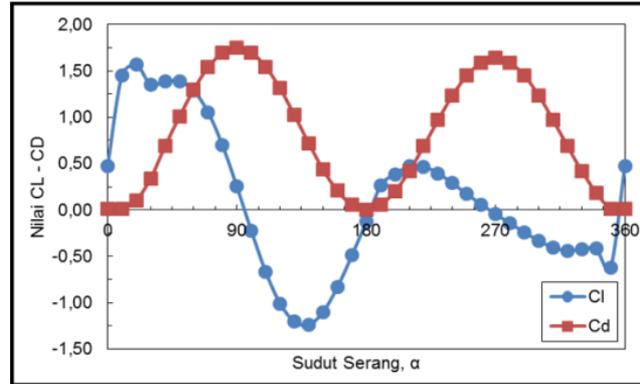
Kemudian pada 3 jumlah sudu dengan variasi kecepatan angin, 4,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 0,97689 dengan nilai C_p sebesar 0,11525, dan pada variasi kecepatan angin 5,2 m/s mampu menghasilkan nilai tsr dengan sebesar 1,099 dan nilai cp yang dihasilkan adalah sebesar 0,19974 dan kemudian pada variasi kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 1,27018 dan menghasilkan nilai cp sebesar 0,15811, dan pada kecepatan angin tertinggi pada 7,2 m/s menghasilkan nilai sebesar 1,4223 dengan menghasilkan nilai cp sebesar 0,10546.

Pada variasi kecepatan angin dan 4 jumlah sudu ini, dengan kecepatan angin 4,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 0,89515 dan menghasilkan C_p sebesar 0,10233, dan pada kecepatan angin 5,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 1,07485 dengan menghasilkan nilai cp sebesar 0,1929, dan pada kecepatan angin 6,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 1,2506 dengan menghasilkan nilai cp sebesar 0,14549, dan pada kecepatan angin tertinggi 7,2 m/s menghasilkan nilai tsr sebesar 1,39207 dengan menghasilkan nilai cp sebesar 0,09623.

Pada *Power Coefficient* ini berbeda dengan nilai daya dan putaran yang dihasilkan, semakin bertambah kecepatan angin semakin besar nilai yang dihasilkan, pada *Power Coefficient* ini dengan penambahan variasi kecepatan angin akan menghasilkan grafik berbentuk parabolik dan pada kecepatan angin tertentu akan menghasilkan nilai tertinggi dan pada hal ini dikarenakan daya yang dihasilkan oleh generator tidak bisa stabil untuk mengimbangi peningkatan daya secara normal. Dan pada *Tip Speed Ratio* ini semakin bertambahnya kecepatan angin maka nilai

yang dihasilkan semakin naik, tapi seiring dengan bertambahnya jumlah sudu nilai yang dihasilkan semakin turun hal itu disebabkan karena pengaruh terjadinya turbulensi mengakibatkan mengurangi gaya yang dihasilkan dan menghasilkan efisiensi yang rendah.

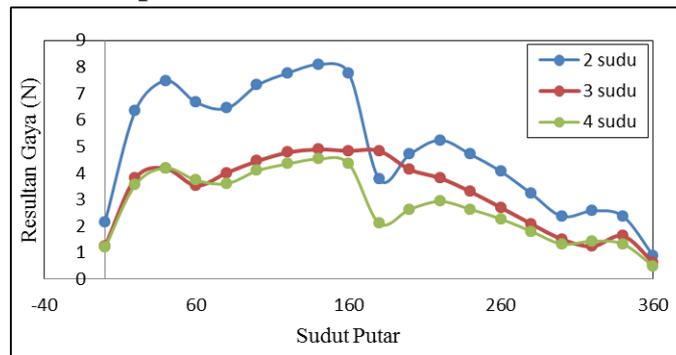
Nilai Cl – Cd Pada Sudut Putar Turbin Angin Darrieus



Gambar 9 nilai Cl – Cd airfoil NACA 4415.

Berdasarkan nilai Cl dan Cd diatas, menunjukkan bahwa pada turbin angin sumbu vertikal (TASV) tipe *Darrieus* dalam penelitian ini gaya *Drag* lebih dominan dibandingkan dengan gaya *Lift*. gaya *Lift* dalam turbin tersebut membantu untuk berputarnya turbin.

Nilai Resultan Gaya Terhadap Sudut Putar



Gambar 10 Nilai Resultan Gaya Terhadap Sudut Putar.

Gambar 4.9 di atas menunjukkan pada nilai gaya resultan yang terjadi pada setiap sudut putar. Grafik di atas juga menunjukkan nilai gaya resultan setiap variasi pada jumlah sudu. Semakin banyak jumlah sudu pada turbin, semakin kecil pula nilai gaya resultannya. Turbin dengan jumlah sudu dua memiliki nilai gaya resultan tertinggi sebanding dengan daya yang dihasilkan dan turbin dengan jumlah sudu empat memiliki nilai gaya resultan terendah. Dengan semakin meningkatnya nilai pada resultan menyebabkan kinerja turbin juga semakin meningkat.

Namun penurunan nilai total gaya resultan tidak terjadi secara signifikan, nilai pada gaya resultan dua sudu ke tiga sudu sebesar 34%, sedangkan penurunan terjadi dari tiga sudu ke empat sudu sebesar 17%. sehingga dengan menambah jumlah sudu belum tentu turbin akan berputar lebih baik karena dengan semakin banyak jumlah sudu menyebabkan turbin menjadi berat dan sulit berputar. Semakin besar perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu sudu

menyebabkan semakin besar pula gaya lift yang akan dihasilkan dan nilai pada resultan akan berbanding lurus.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pada turbin angin sumbu vertikal tipe *Darrieus-H* menyimpulkan bahwa semakin bertambahnya jumlah sudu mengurangi daya yang dihasilkan pada turbin dan menyebabkan efisiensi yang dihasilkan rendah dikarenakan semakin bertambahnya jumlah sudu maka beban turbin juga semakin bertambah. Pada penelitian prototipe turbin angin ini memvariasikan pada jumlah sudu yaitu dengan 2 sudu, 3 sudu dan 4 sudu. Dari variasi ini jumlah 2 sudu yang menghasilkan daya yang paling tinggi dibandingkan dengan 3 sudu dan 4 sudu. Pada penelitian ini membuktikan bahwa turbin angin dengan variasi 2 sudu masih membutuhkan bantuan untuk melakukan putaran awal dikarenakan pada sudu terjadinya aliran yang menerobos melalui celah-celah tengah pada turbin yang mengakibatkan turbin berhenti pada putaran rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajao, K. R. dan M. R. Mahamood. 2009. Wind Energy Conversion System: The Past, The Present And The Prospect. *Journal of American Science*. 5(6): 17-22
- Androga, F. M. dan I. H. Siregar. 2015. Uji Eksperimental Model Turbin Angin Darrieus Tipe H 2 Tingkat Dengan Kombinasi 3 Bilah Naca 0018 Dan 2 Bilah Savonius Per Tingkat. *Jurnal Teknik Mesin* 1(1): 126-131.
- Budiastra, I. N., I. A. D. Girianti, W. Artawijaya, dan C. I. Partha. 2009. Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Di Nusa Penida dan Dampaknya Terhadap Lingkungan. *Jurnal Bumi Lestari* 9(2): 263-267
- Culp, Archie W., 1991. Prinsip Prinsip Konversi Energi. Jakarta. Erlangga. Terjemahan : Principles Of Energy Conversion. 1979. McGraw-Hill, Ltd
- Febrielviyanti.,M. Ginting, dan Zulkarnain. 2015. Konversi Energi Angin menjadi Energi Listrik Dalam Skala Laboratorium. *JOM FMIPA* 2(1): 228-234.
- Habibie, M. N. A. Sasmito, dan R. Kurniawan. 2008. Kajian Potensi Energi Angin Angin Di Wilayah Sulawesi dan Maluku Study Of Wind Energy Potency In Sulawesi And Maluku. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika* 12(2): 181–187.
- Hau, E. 2013. Wind Turbines. Dipl.-Ing. Munich. Terjemahan H.V. Renouard. 2013. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Third Translated Edition. London: Springer-Verlag.
- Hashem, I, dan M, H. Mohamed. 2017. Aerodynamic Performance Enhancements Of H-Rotor Darrieus Wind Turbine. *Energy*. 142, 531–545.
- Martinus, M. D. Susila, dan M. Budiyo. 2011. Analisis Fenomena Penampang Alir Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Tipe Heliks Terhadap Kecepatan Angin Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berskala Rumah Tangga. *Jurnal Mechanical* 2(2).
- Napitupulu, F.H dan F, Mauritz. 2013. Uji Eksperimental dan Analisis Pengaruh Variasi Kecepatan dan Jumlah Sudu Terhadap Daya dan Putaran Turbin Angin Vertikal Axis

- Savonius Dengan Menggunakan Sudu Pengarah. *Jurnal Dinamis* 2(12): 49-59
- Pamungkas, S. F., D. S. Wijayanto, dan H. Saputro. 2017. Pengaruh Variasi Penambahan Fin Terhadap Cut In Speed Turbin Angin Savonius Tipe S. *Journal Of Mechanical Engineering Education* 2(1):11-20.
- Pangaribuan, L. P. 2015. Pengaruh Jumlah Sudu Turbin Angin Sumbu Tegak (Tast) Terhadap Daya dan Efisiensi Turbin. Skripsi. Institut Pertanian Bogor. Bogor
- Prasetyo, B., M. A. F. Ramadhan, dan M. D. Rusdianto. 2017. Alat Pengisi Baterai Ponsel Tenaga Angin. *Jurnal Teknik Energi* 13(1): 25-31.
- Sayoga, I. M. A., I. K. Wiratama, I. M. Mara, dan A. d. Catur. 2014. Pengaruh Variasi Jumlah Blade Terhadap Aerodinamik Performan Pada Rancangan Kincir Angin 300 Watt. *Dinamika Teknik Mesin* 4(2): 103-109.
- Sunyoto, A., F. Wenehenubun, dan H. Sutanto. 2013. The Effect Of Number Of Blades On The Performance Of H-Darrieus Type Wind Turbine. *IEEE*. 192-196.
- Shaheen, M. dan S. Abdallah. 2017. Efficient Clusters and Patterned Farms For Darrieus Wind Turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (19): 125–135.
- Sitepu, A. W., J. B. Sinaga, dan A. Sugiri. 2014. Kajian Eksperimental Pengaruh Bentuk Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Helik Untuk Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). *Jurnal FEMA* 2(2):72-78
- Susanto, A. 2015. Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Serang Terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal. Tugas Akhir. Universitas Muhammadiyah Surakarta. Surakarta
- Sudargana, dan R. G. K. Yuniarso. 2012. Analisa Perancangan Turbin Darrieus Pada Hydrofoil Naca 0015 Dari Karakteristik C_l dan C_d Pada Variasi Sudut Serang Menggunakan Regresi Linier Pada Matlab. *Rotasi* 14(1): 21–28.
- Tjitro, S. dan A. A. Wibawa. 2000. Perbaikan Karakteristik Aerodinamika Pada Kendaraan Niaga. *Jurnal Teknik Mesin* 1(2): 108-115.
- Zulkifli., Mursalin, dan A. Zainuri. 2015. *Analisis Potensi Energi Angin Di Kecamatan Batudaa Pantai Gorontalo Provinsi Gorontalo*. F.MIPA Universitas Negeri Gorontalo. 23 Maret 2018 (13.10).