

## PENGARUH JUMLAH SUDU TERHADAP KINERJA GENERATOR PADA TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL

**Sang Aji**

Program Studi S1. Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya.  
e-mail : [sangaji@mhs.unesa.ac.id](mailto:sangaji@mhs.unesa.ac.id)

**Mahendra Widyartono**

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya.  
e-mail : [mahendrawidyartono@unesa.ac.id](mailto:mahendrawidyartono@unesa.ac.id)

### Abstrak

Dewasa ini, energi listrik telah menjadi kebutuhan utama bagi masyarakat. Hal tersebut mengakibatkan tingginya permintaan akan energi listrik, yang menyebabkan harus adanya sumber energi terbarukan di luar energi fosil sebagai sumber utama agar bisa memenuhi permintaan energi listrik. Energi hembusan angin dapat digunakan sebagai sumber penghasil energi listrik melalui sistem yang disebut sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB). PLTB memiliki banyak bagian penting yang berfungsi mengubah energi hembusan angin menjadi energi listrik yang siap digunakan oleh masyarakat. Salah satu bagian dari PLTB yang berperan penting dalam proses perubahan energi ini adalah turbin angin yang berfungsi penggerak utama dari generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Tujuan penulisan artikel *literature review* ini ialah untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah sudu terhadap kinerja generator pada turbin angin sumbu vertikal. Yang diantaranya mengetahui tegangan luaran rata-rata generator, *coefisien of performance*, serta efisiensi dari kinerja generator. Dan beberapa hasil yang didapat antara lain bahwa jika dipasang dua sudu dengan kecepatan angin 8m/s generator dapat menghasilkan tegangan luaran sebesar 3.033V. Kemudian untuk nilai faktor daya ( $C_p$ ) terbesar untuk kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s dimiliki oleh turbin dengan jumlah 6 sudu, sedangkan pada kecepatan angin 8 m/s nilai  $C_p$  terbesar dimiliki oleh turbin yang dipasang 3 sudu. Hal ini menunjukkan bahwasanya pada kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s turbin dengan 6 sudu mampu untuk mengonversi energi angin menjadi energi mekanik lebih maksimal Sedangkan untuk nilai efisiensi ( $\eta$ ) terbesar untuk setiap kecepatan angin yang beroperasi pada turbin dimiliki oleh turbin dengan 2 sudu.

**Kata Kunci:** Jumlah sudu, generator, kecepatan angin

### Abstract

Nowadays, electricity has become a major need for the community. This resulted in high demand for electricity, which led to the need for renewable energy sources outside of fossil energy as the main source in order to meet the demand for electrical energy. Wind energy can be used as a source of electricity generation through a system called Wind Power Plant (WPP). WPP has many important parts that function to convert wind energy into electrical energy that is ready for use by the public. One part of the WPP that plays an important role in the process of converting this energy is a wind turbine that functions as the main driver of the generator so that it can produce electrical energy. The purpose of writing this literature review article is to determine the effect of changing the number of blades on the performance of the generator on a vertical axis wind turbine. Which includes knowing the average output voltage of generators, the coefficient of performance, and the efficiency of generator performance. And the authors get several results, among others, that if installed two blades with wind speeds of 8m/s the generator can produce an output voltage of 3,033V. Then for the largest power factor value ( $C_p$ ) for wind speeds of 3 m/s, 5 m/s, and 6 m/s are owned by turbines with a total of 6 blades, whereas at wind speeds of 8 m/s the largest  $C_p$  values are owned by turbines that are 3 blades installed. This shows that at wind speeds of 3 m/s, 5 m/s, and 6 m/s turbines with 6 blades are able to convert wind energy to mechanical energy more optimally, while for the largest efficiency value ( $\eta$ ) for each operating wind speed the turbine is owned by a turbine with 2 blades.

**Keywords:** Number of blades, generator, wind speed

## PENDAHULUAN

Pada era milenial saat ini kebutuhan akan sumber energi listrik kian meningkat. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS-Indonesia) mulai tahun 2007 hingga 2018 menunjukkan peningkatan pada sektor daya yang dihasilkan dalam satuan GWh (GigaWatt-hour) Hingga kini pemerintah Republik Indonesia tetap berusaha guna merealisasikan proyek 35.000 MW. Secara keseluruhan rata-rata potensi angin di Indonesia tidaklah besar, namun berdasarkan pengukuran data kecepatan angin yang telah dilakukan sejak 1979, terdapat banyak daerah di nusantara yang memiliki rata-rata kecepatan angin tahunan sebesar 3,4 - 5 m/s atau mempunyai energi 200kWh/m hingga 1000kWh/m. Hal tersebut merupakan sebuah potensi untuk membangkitkan energi listrik skala kecil hingga 10kW.

Dengan terealisasinya proyek tersebut, berarti akan muncul berbagai dampak yang terjadi baik dampak segi positif maupun dampak segi negatif. Seperti yang dilansir dari pernyataan Presiden Indonesia Ir. Joko Widodo ketika memberi pengarahan terhadap jajaran direksi PT. PLN Persero ([www.bumn.go.id](http://www.bumn.go.id) 2014). terkait dampak positif dari terealisasinya proyek tersebut “Listrik yang cukup ialah kunci tercapainya pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat” Namun apabila ditinjau dari dari segi negatifnya maka, konsumsi bahan bakar untuk pembangkit listrik khususnya pembangkit listrik yang memakai bahan bakar batu bara dan/atau olahan minyak bumi beserta turunannya akan semakin meningkat dan memiliki kemungkinan besar untuk merusak lingkungan. Apabila melihat dari data kecepatan angin yang direkam oleh BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika) Provinsi Jawa Timur dari tahun 2015 hingga 2017 menunjukkan untuk kecepatan angin terendah sebesar 6,6 – 9,5 knot atau 3,395 – 4,887 m/s yang berarti memenuhi kriteria untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik tenaga angin.

Tabel. 1. Data Kecepatan Angin Jawa Timur

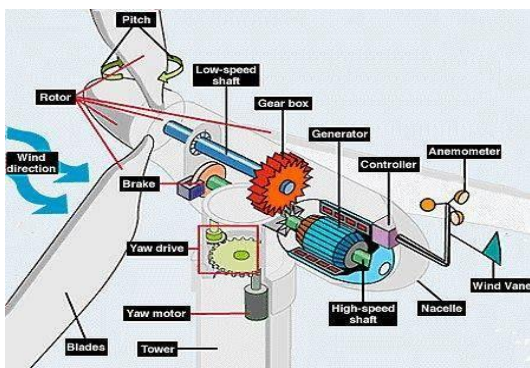
Bulan	Kecepatan Angin (knot)					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Januari	15	22	22	8.30	7.10	8.80
Februari	11	20	22	7	7.70	9.50
Maret	16	20	18	7	6.50	7
April	12	14	16	6.60	7	6.50
Mei	12	15	17	6.80	6.70	7.50
Juni	13	20	17	6.70	6.80	8
Juli	13	20	16	8	7.20	7
Agustus	14	18	19	8.20	7.90	8.30
September	14	20	15	8.30	7.40	8.50
Oktober	14	15	18	9	7.50	7.70
November	13	19	16	7	7	7
Desember	12	28	18	7.50	7.50	7.70

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan, merupakan suatu energi yang bersifat baik dan ramah lingkungan apabila dimanfaatkan untuk dikonversikan menjadi energi mekanik menjadi energi listrik. Pengubahan energi mekanik menjadi energi listrik dengan proses mengkonversikan energi angin tersebut menjadi putaran mekanik turbin dan selanjutnya memutar suatu alat yang dibutuhkan sesuai dengan kebutuhan pemakaian. Dalam proses pengubahan energi ini disebut dengan proses konversi energi angin, selanjutnya alat untuk mengkonversikan menjadi energi angin menjadi disebut kincir angin atau turbin angin.

Dalam pemanfaatan energi angin, diperlukan data atau informasi mengenai potensi energi angin aktual yang tersedia di lokasi pemasangan dan pemanfaatan sesuai dengan kebutuhan di lokasi tersebut. Kajian dan evaluasi yang lebih akurat mengenai kedua aspek ini dibutuhkan secara bersamaan dengan aspek ekonomi yang nantinya diharapkan akan menghasilkan suatu sistem konversi energi yang optimal di suatu lokasi.

Pemanfaatan energi angin secara ekonomis memerlukan lokasi dengan kecepatan angin paling kurang 3 m/s atau lebih, misalnya dengan menghubungkan secara interkoneksi ke jaringan listrik lokal yang ada. Namun, dalam kondisi tertentu dan juga untuk sumber-sumber energi terbaru lainnya, aspek dari segi ekonomi bukanlah persyaratan yang utama, maka pemanfaatan dalam skala yang lebih kecil atau menengah merupakan pilihan yang tepat. Hal ini misalnya diperlukan oleh daerah pedesaan atau pulau - pulau terpencil yang belum memiliki atau belum terjangkau jaringan listrik umum atau untuk pemakaian lainnya, Sedangkan energi konvensional adalah sumber energi dan teknologi yang sudah mantap dan merupakan bagian yang terbesar dari kebutuhan energi ekonomi modern, misalnya batu bara, minyak, gas alam, tenaga air besar serta energi listrik yang di hasilkan dari sumber-sumber tersebut.

Turbin angin ialah suatu komponen penting dalam sistem pembangkitan energi listrik tenaga angin. Pada umumnya turbin angin dibedakan menjadi 2 jenis yakni, turbin angin sumbu horisontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin horisontal biasanya digunakan untuk sistem pembangkit listrik skala besar dengan sapuan angin berkecepatan sedang dan tinggi. Berbeda dengan turbin sumbu horisontal, turbin angin sumbu vertikal justru lebih digunakan dalam sistem pembangkitan skala kecil atau biasanya digabungkan dengan panel surya sebagai penyedia energi listrik cadangan. Gambar 1 di bawah ini menjelaskan mengenai skema dan komponen yang umum digunakan dalam pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) skala besar.



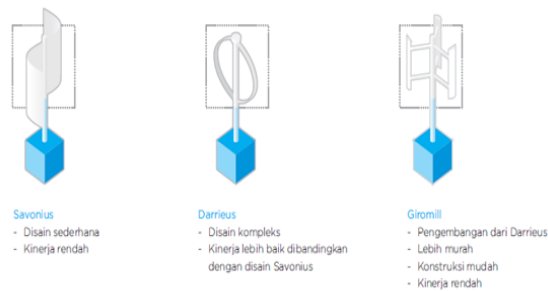
Gambar 1. Komponen Turbin Angin

Rotor adalah penghubung turbin dan bilah turbin atau yang sering disebut dengan sudu. *Pitch* atau laras sudu berfungsi sebagai pengendali kecepatan rotor dan mempertahankan posisi rotor dari perubahan arah putar karena kecepatan dan arah angin yang fluktuatif. Rem atau *brake* adalah cakram yang digunakan baik secara mekanik, elektrik, maupun hidrolis, untuk menghentikan rotor saat keadaan darurat seperti kecepatan angin yang terlalu kencang. *Gear box* atau roda gigi merupakan penghubung *shaft*/poros rotor antara kecepatan rendah, dengan yang berkecepatan tinggi yang berfungsi untuk meningkatkan kecepatan putar generator sehingga dapat menghasilkan daya listrik yang diinginkan. *Blades* atau sudu pada turbin angin berfungsi untuk menangkap serta memberikan gerak rotasi dari angin yang bertiup melalui turbin menuju generator. Generator berfungsi untuk mengonversi kecepatan putar menjadi energi listrik atau mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. *Controller* berfungsi untuk mengendalikan sistem PLTB mulai saat awal operasi hingga energi listrik dapat dihasilkan serta mengatur sistem proteksi turbin itu sendiri. Anemometer merupakan alat untuk mengukur kecepatan angin serta sebagai penyimpan data kecepatan angin ke sistem *controller*.

Pada umumnya turbin angin dibedakan menjadi 2 jenis, yakni turbin angin sumbu horisontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu horisontal memiliki konstruksi yang memaksimalkan tangkapan angin karena posisi sudu tegak lurus dengan arah angin. Turbin angin jenis ini harus dilengkapi dengan sistem pengereman guna meminimalisir terjadinya putaran lebih dikarenakan kecepatan angin yang kencang.



Gambar 2. Turbin Angin Sumbu Horisontal



Gambar 3. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal memiliki konstruksi yang relatif lebih sederhana dimana posisinya yang berdekatan dengan permukaan tanah. Turbin angin sumbu vertikal memiliki kecepatan *startup* angin rendah serta kemampuan untuk menerima tangkapan angin dari arah manapun. Namun, memiliki kekurangan pada efisiensi dikarenakan terdapat penambahan beban pada sudu turbin itu sendiri. Terkadang, tipe Savonius digunakan sebagai turbin angin skala kecil, biasanya digunakan sebagai penunjang penggerak pompa air kecil. Turbin jenis ini tidak cocok untuk digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga angin. Hal ini dikarenakan rasio kecepatan putar (TSR) yang rendah. Dengan mengoptimalkan permodelan aerodinamis, *savonius* dapat mengangkat system aerodinamis dan koefisien daya maksimum.

Bersamaan dengan itu, dapat dikatakan jika turbin angin sumbu vertikal terutama tipe Darrieus memiliki kemungkinan potensial untuk dijadikan sebagai opsi pembangkit listrik tenaga angin selain turbin angin sumbu horisontal yang marak ditemui.

Tujuan dilakukannya penelitian berikut ialah untuk mengetahui pengaruh dari perubahan jumlah sudu terhadap kinerja generator pada turbin angin sumbu vertikal. Yang diantaranya mengetahui tegangan luaran rata-rata generator, *coefisien of performance*, serta efisiensi dari kinerja generator.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh 1) Suwandi, dkk pada tahun 2016. 2) Jamal, pada tahun 2019. 3) Rakesh Kumar, dkk pada tahun 2018. Dan 4) Alfred Sunny, dkk pada tahun 2016. 5) Untung Budiato, dkk pada tahun 2018. 6) Fadiel Muhammad, dkk pada tahun 2018. Didapat hasil sebagai berikut :

#### Pengukuran Tegangan Rata-rata yang Dihasilkan

Pengukuran berikut dilakukan guna mengetahui kinerja generator dc yang berupa besar tegangan luaran (V) dengan variasi jumlah sudu dan kecepatan angin yang berbeda menggunakan bantuan alat ukur voltmeter digital agar pembacaan lebih akurat.



Tabel 2. Hasil Pengukuran dengan 2 sudu

Kecepatan Angin (m/s)	Hasil Pengukuran Rata-rata Tegangan yang dihasilkan (V)
3	1,534
5	2,458
6	2,632
8	3,033

Tabel 3. Hasil Pengukuran dengan 3 sudu

Kecepatan Angin (m/s)	Hasil Pengukuran Rata-rata Tegangan yang dihasilkan (V)
3	1,398
5	2,297
6	2,493
8	2,932

Tabel 4. Hasil Pengukuran dengan 4 sudu

Kecepatan Angin (m/s)	Hasil Pengukuran Rata-rata Tegangan yang dihasilkan (V)
3	1,403
5	2,314
6	2,543
8	2,872

Tabel 5. Hasil Pengukuran dengan 5 sudu

Kecepatan Angin (m/s)	Hasil Pengukuran Rata-rata Tegangan yang dihasilkan (V)
3	1,335
5	2,248
6	2,43
8	2,843

Tabel 6. Hasil Pengukuran dengan 6 sudu

Kecepatan Angin (m/s)	Hasil Pengukuran Rata-rata Tegangan yang dihasilkan (V)
3	1,271
5	2,179
6	2,363
8	2,731

Dari Tabel 2 bisa dilihat untuk tegangan luaran generator tertinggi dihasilkan oleh turbin dengan jumlah sudu 2 dengan kecepatan angin sebesar 8 m/s yakni 3,033V. Sedangkan tegangan luaran terendah yang dihasilkan oleh generator ditunjukkan oleh data pengukuran dari turbin yang dipasangkan dengan jumlah sudu 2 buah dan beroperasi pada kecepatan angin 3m/s

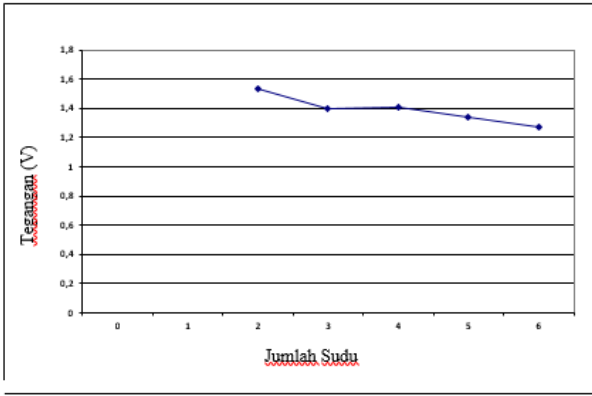
sebesar 0,417V. Untuk kecepatan angin 5m/s dan 6m/s menghasilkan tegangan luaran masing-masing 0,528V dan 0,547V. Terdapat selisih yang cukup besar yang ditunjukkan oleh tegangan luaran yang dihasilkan generator yang dihubungkan dengan turbin jumlah sudu 2 yang beroperasi pada kecepatan angin antara 3 m/s dan 5 m/s yakni, sebesar 0,111V. Sedangkan selisih tegangan luaran generator yang dihasilkan antara 5 m/s dan 6 m/s hanya 0,031V. Dan antara generator yang dipasangkan dengan turbin 2 sudu yang beroperasi pada kecepatan 6 m/s dan 8m/s memiliki selisih 0,04V.

Untuk Tabel 3, generator dipasangkan dengan turbin dengan jumlah sudu 3. Pengukuran yang dilakukan sama dengan sudu berjumlah 2 yakni dioperasikan pada kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, 6 m/s, dan 8 m/s. Pada saat beroperasi di kecepatan angin 3 m/s, pengukuran tegangan luaran generator menunjukkan hasil rata-rata 1,398V. Sedangkan pada kecepatan 5 m/s menghasilkan rata-rata tegangan luaran sebesar 2,297V. Hasil yang hampir sama didapatkan pada saat kecepatan dinaikkan menjadi 6 m/s yakni 2,493V. Ketika kecepatan dinaikkan kembali menjadi 8 m/s, generator menghasilkan tegangan luaran sebesar 2,932V.

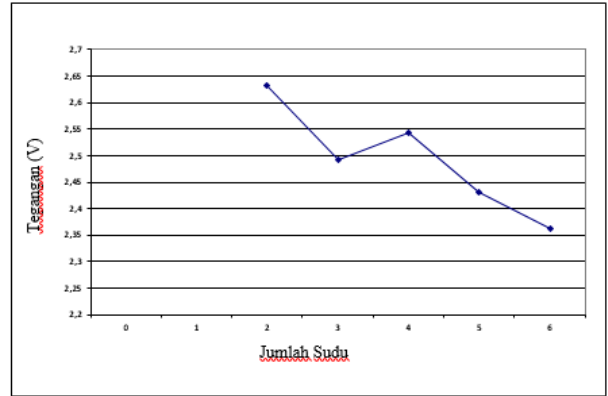
Pada Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran dari generator yang dipasangkan dengan turbin berjumlah 4 sudu. Saat mendapatkan sapuan angin dengan kecepatan 3 m/s didapatkan hasil tegangan luaran generator sebesar 1,403V. Untuk kecepatan angin 5 m/s menghasilkan tegangan luaran generator sebesar 2,314V. terdapat kenaikan menjadi 2,543V saat beroperasi pada angin berkecepatan 6 m/s. Ketika kecepatan angin dinaikkan menjadi 8 m/s alat ukur menunjukkan hasil tegangan luaran generator 2,872V.

Hasil pengukuran yang ditampilkan pada Tabel 5 menunjukkan generator yang dihubungkan dengan turbin dengan jumlah sudu 5 buah yang beroperasi pada angin yang berkecepatan 3 m/s menghasilkan tegangan luaran sebesar 1,335V. Untuk hasil yang diperoleh dari pengukuran dengan kecepatan angin 5 m/s dan 6 m/s memiliki selisih yang cukup kecil yakni masing-masing 2,248V dan 2,43V. Sedangkan hasil pengukuran saat mendapatkan angin dengan kecepatan 8 m/s sebesar 2,843V.

Untuk hasil pengukuran generator yang dihubungkan dengan turbin berjumlah sudu 6 ditunjukkan oleh Tabel 6 dimana ketika kecepatan angin sebesar 3 m/s menghasilkan 1,271V. Ketika kecepatan angin ditambah menjadi 5m/s menunjukkan hasil pengukuran tegangan luaran 2,179V. Pada saat beroperasi di kecepatan angin 6 m/s generator menghasilkan tegangan luaran 2,363V. Dan hasil pengukuran menunjukkan besaran 2,731V ketika generator yang dihubungkan dengan turbin berjumlah sudu 6 buah beroperasi pada kecepatan angin 8 m/s.



Gambar 4. Kinerja Generator pada  $V=3$  m/s



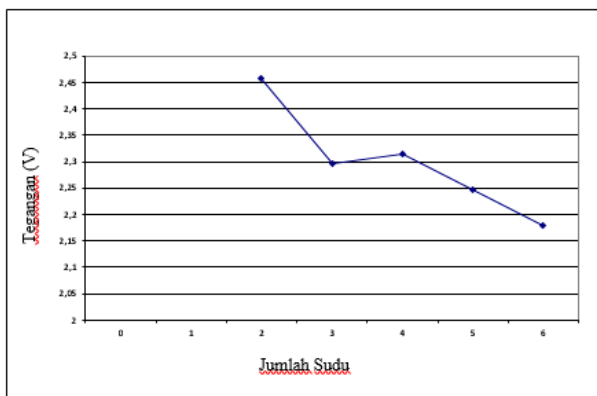
Gambar 6. Kinerja Generator pada  $V=6$  m/s

**Hubungan Antara Tegangan Luaran Generator dan Kecepatan Angin Tiap Jumlah Sudu.**

Berdasarkan Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6 yang kemudian diolah menjadi grafik yang menjelaskan hubungan antara tegangan luaran generator dan kecepatan angin pada jumlah sudu terpasang yang ditunjukkan pada Gambar 4, 5, 6, 7, dan 8.

Seperti apa yang ditampilkan data statistik pada Gambar. 4 menunjukkan kinerja generator menghasilkan tegangan luaran dimana beroperasi pada kecepatan angin 3 m/s untuk setiap jumlah sudu yang terpasang. Dapat dijelaskan bahwa untuk jumlah sudu 2 mampu menghasilkan tegangan luaran sebesar 1,534 V. pada saat jumlah sudu ditambah menjadi 3, tegangan yang dihasilkan generator turun menjadi 1,398 V. Namun, ketika generator dipasang dengan turbin berjumlah sudu 4, tegangan yang dihasilkan mengalami kenaikan walaupun tidak signifikan yakni sebesar 1,403V. Hasil yang berbeda didapatkan ketika dipasang dengan jumlah sudu 5 dan 6 buah yang masing-masing menunjukkan angka rata-rata 1,335V dan 1,271V.

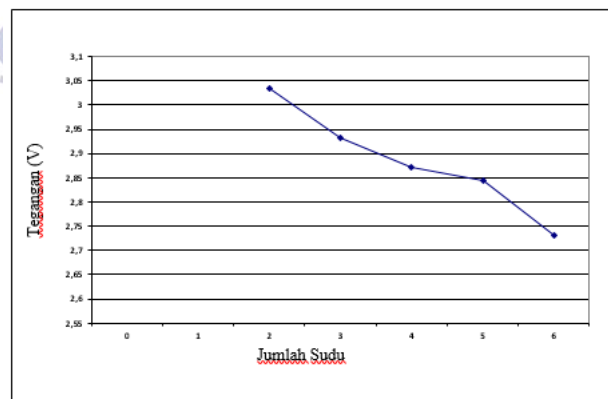
Gambar 5 menjelaskan tentang pengaruh dari perubahan jumlah sudu pada kecepatan angin konstan sebesar 5 m/s terhadap kinerja generator dalam menghasilkan tegangan luaran. Pada saat turbin dengan jumlah sudu 2 buah terpasang, generator mampu menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 2,458V.



Gambar 5. Kinerja Generator pada  $V=5$  m/s

Ketika jumlah sudu yang terpasang diganti dengan 3 buah buah sudu kemudian beroperasi pada kecepatan 5 m/s hasil yang diperoleh yakni 2,297V. Untuk jumlah sudu 4, generator menghasilkan tegangan luaran sebesar 2,543V. Saat generator terpasang dengan turbin dengan jumlah sudu 5 dan beroperasi pada kecepatan angin yang sama yakni 5 m/s, tegangan yang dihasilkan sebesar 2,248V. Dan untuk generator yang dipasangkan dengan turbin dengan jumlah sudu 6 buah menghasilkan tegangan luaran sebesar 2,179V.

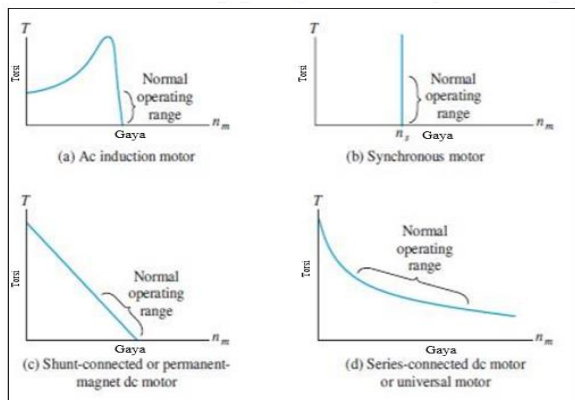
Kinerja generator pada kecepatan angin 6 m/s dapat dilihat pada Gambar. 6. Pada Gambar. 6 bisa dilihat grafik dimana pada saat generator yang dipasang dengan turbin angina berjumlah sudu 2 mampu menghasilkan tegangan luaran sebesar 2,632V. Ketika turbin berjumlah sudu 3 dipasangkan pada generator, generator mampu menghasilkan tegangan 2,493V. Saat terpasang dengan jumlah sudu 4, tegangan yang dihasilkan generator mengalami kenaikan sebesar 0,05V menjadi 2,543V. Namun tegangan luaran generator mengalami penurunan menjadi 2,43V saat dipasangkan dengan turbin dengan jumlah sudu 5 buah. Dan saat jumlah sudu dirubah menjadi 6 buah, generator menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 2,363V.



Gambar 7. Kinerja Generator pada  $V=8$  m/s

Pada grafik hubungan antara kinerja generator dan kecepatan angin konstan yang ditunjukkan Gambar 7. Menunjukkan hasil bagaimana kinerja generator dalam menghasilkan tegangan. Saat dipasangkan dengan turbin dengan jumlah sudu 2 buah, generator mampu menghasilkan tegangan luaran rata-rata sebesar 3,033V. Untuk jumlah sudu berjumlah 3, generator dapat menghasilkan tegangan luaran sebesar 2,932V. Generator menghasilkan tegangan luaran sebesar 2,872V saat beroperasi ketika dipasngkan dengan turbin berjumlah sudu 4. Turbin dengan jumlah sudu 5 yang dipasangkan dengan generator mampu membuat generator menghasilkan tegangan luaran sebesar 2,843V pada kecepatan angin 8 m/s. Terdapat penurunan sebesar 0,112V dari 2,843V hingga 2,731V pada tegangan yang dihasilkan oleh generator ketika dipasng dengan turbin dengan jumlah sudu 6 buah.

Dari Gambar 4, 5, 6, dan 7 dapat dilihat adanya perbedaan pergeseran nilai besar tegangan luaran yang dihasilkan generator akibat perbedaan jumlah sudu, meskipun turbin yang terpasang pada generator bekerja pada kecepatan angin yang sama. Hal ini menunjukkan apabila nilai *self starting* dari turbin angin itu sendiri dengan jumlah sudu yang berbeda mempengaruhi besarnya tegangan luaran yang dihasilkan oleh sistem turbin angin sumbu vertial. *Self starting* dari masing-masing turbin dengan variasi jumlah sudu yang berbeda dipengaruhi oleh torsi yang dimiliki oleh setiap turbin dengan jumlah sudu yang berbeda. Setiap jumlah sudu memiliki massa yang berbeda-beda sehingga dapat mempengaruhi besarnya momen inersia dan kecepatan putar dari turbin angin tersebut sehingga menghasilkan besar tegangan luaran yang berbeda. Kecepatan angin yang berubah-ubah juga sangat berdampak pada *self-starting* dari setiap turbin sehingga mempengaruhi kecepatan putar di dalam generator dan nilai torsi yang dibutuhkan saat generator memulai putaran dan selama generator berbeda berdasarkan Gambar. 8 dibawah ini.



Gambar 8. Hubungan Torsi dan Rpm Generator. (Sumber : Ahmad Qhurtobi, 2016)

### Analisis Hubungan Daya Angin, Daya Mekanik, dan Daya Listrik yang dihasilkan.

Analisis hubungan antara, daya mekanik, daya angina, dan daya listrik yang dibangkitkan oleh turbin angin pada kecepatan angina dilakukan melalui perbandingan nilai faktor daya atau *coefisien of performance* ( $C_p$ ) dan *efficiency* ( $\eta$ ) dari masing-masing turbin yang memiliki jumlah sudu yang berbeda. Kinerja turbin dalam mengonversi energi angin menjadi energi mekanik diperlihatkan oleh besarnya nilai  $C_p$ . Sedangkan, nilai  $\eta$  menampilkan tingkat kinerja turbin dalam kemampuannya mengonversi energi mekanik berubah menjadi energi listrik. Sedangkan, besar nilai TSR diperoleh dengan menyantumkan kecepatan putar turbin. TSR sendiri ialah kecepatan putar rata-rata dari turbin tersebut. Nilai  $C_p$  sendiri didapatkan melalui persamaan di bawah ini.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3 \tag{1}$$

Dimana :

$P$  = Daya yang dibangkitkan (Watt)

$\rho$  = massa jenis angin (1,225 kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = Koefisien daya

$A$  = Luas penampang sudu (m<sup>2</sup>)

$v$  = Kecepatan angin (m/s)

Dan besarnya efisiensi ( $\eta$ ) diperoleh melalui perbandingan antara daya mekanik dan daya listrik yang dihasilkan dapat dilihat pada persamaan berikut.

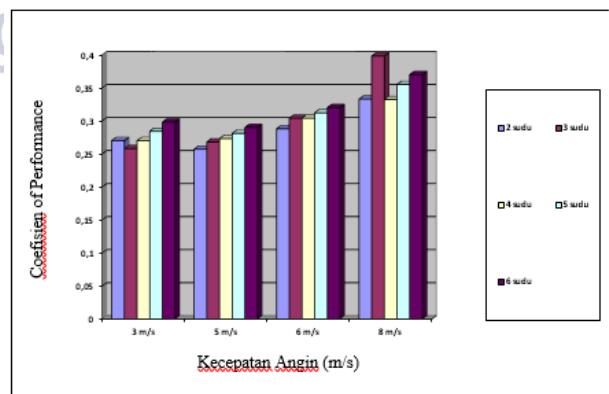
$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_m}{P} \times 100\% \tag{2}$$

Dimana :

( $\eta$ ) = Efisiensi daya (%)

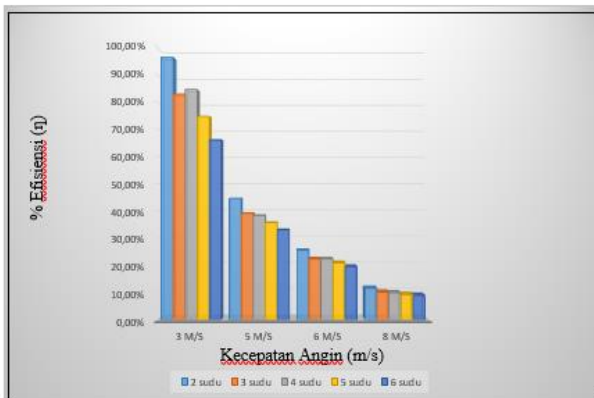
$P_m$  = Daya mekanik (Nm)

$P$  = Daya yang dibangkitkan (Watt)



Gambar 9. Grafik  $C_p$  pada tiap jumlah sudu.





Gambar 10. Grafik efisiensi  $\eta$  pada tiap jumlah sudu.

Nilai *coefisien of performance* atau nilai factor daya dapat dilihat pada Gambar 8 dimana untuk jumlah sudu 2 memiliki besar nilai  $C_p$  yang masing-masing untuk setiap kecepatan angin sebesar 0,270 untuk kecepatan angin 3 m/s, 0,257 untuk kecepatan angin 5 m/s, 0,288 untuk kecepatan angin 6 m/s, dan 0,333 untuk kecepatan angin 8 m/s. Dan untuk jumlah sudu 3 buah ketika kecepatan angin 3 m/s didapatkan hasil 0,258, untuk kecepatan angin 5 m/s didapatkan hasil 0,273, untuk kecepatan angin 6 m/s didapatkan hasil 0,304, dan untuk kecepatan angin 8 m/s didapatkan hasil 0,398. Pada jumlah sudu berjumlah 4 hasil yang didapatkan saat beroperasi pada kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, 6 m/s, dan 8 m/s secara berurutan yakni 0,270 untuk 3 m/s, 0,273 untuk 5 m/s, 0,304 untuk 6 m/s, dan 0,352 untuk 8 m/s. Sedangkan untuk turbin dengan jumlah sudu 5 buah diperoleh hasil untuk masing-masing kecepatan angin secara runtut yakni 0,284, 0,281, 0,312 dan 0,355. Dan yang terakhir untuk sudu berjumlah 6 dapat diperoleh hasil 0,298 untuk 3 m/s, 0,290 untuk 5 m/s, 0,320 untuk 6 m/s, serta 0,370 untuk 8 m/s.

Pada Gambar 10 diatas menggambarkan bagaimana seberapa besar nilai efisiensi dari sistem turbin angin itu sendiri. Apabila dilihat dari yang ditampilkan oleh grafik diatas, pada saat beroperasi di kecepatan angin 3 m/s turbin yang terpasang 2 sudu memiliki efisiensi sebesar 96,51%, 3 sudu dengan 82,94%, 4 sudu dengan 84,65%, 5 sudu dengan 74,76%, dan 6 sudu dengan 66,15%. Selanjutnya, untuk efisiensi pada kecepatan 5 m/s di setiap jumlah sudu yang terpasang yakni, 44,55% ketika menggunakan 2 sudu, 39,06% ketika menggunakan 3 sudu, 38,30% ketika menggunakan 4 sudu, 35,65% ketika menggunakan 5 sudu, dan 32,96% ketika menggunakan 6 sudu. Kemudian ketika pengujian dilakukan dengan kecepatan angin 6 m/s, efisiensi yang didapatkan pada jumlah sudu 2 sebesar 25,50%, pada jumlah sudu 3 dan sudu 4 memiliki efisiensi yang sama yaitu sebesar 22,27%, dan untuk jumlah sudu 5 dan 6 didapatkan hasil masing-masing 20,89% dan

19,47%. Yang terakhir ialah pengujian pada kecepatan angin 8 m/s diperoleh hasil untuk setiap jumlah sudu yang terpasang yakni, 11,50% untuk sudu berjumlah 2, 10,03% untuk sudu berjumlah 3, 9,79% untuk sudu berjumlah 4, 9,19% untuk sudu berjumlah 5, dan 8,85% untuk sudu berjumlah 6.

Besarnya nilai TSR pada turbin dengan 2 sudu mengakibatkan torsi yang dihasilkan turbin semakin kecil. Karena nilai torsi yang kecil, sehingga memberikan keuntungan bagi turbin yang bekerja pada kecepatan angin yang tidak konstan karena mempengaruhi *self-starting* dari generator saat memulai putaran dan selama berputar. Saat angin berhembus turbin akan memulai putaran dengan torsi yang besar dan menurun seiring putaran berlangsung yang kemudian disaat angin berhenti berhembus, turbin akan berhenti berputar dan akan berputar lagi saat angin datang. Namun mengulang kembali besarnya nilai torsi yang dibutuhkan untuk memulai putaran.

## PENUTUP

### Simpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan analisa hasil dan pembahasan diatas antara lain sebagai berikut (1) Tegangan luaran rata-rata terbesar yang dihasilkan generator yakni ketika generator terpasang dengan jumlah sudu 2 dan beroperasi pada kecepatan angin 8 m/s dengan nilai 3,033V. (2) Nilai faktor daya ( $C_p$ ) terbesar untuk kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s dimiliki oleh turbin dengan jumlah 6 sudu, sedangkan pada kecepatan angin 8 m/s nilai  $C_p$  terbesar dimiliki oleh turbin yang dipasang 3 sudu. Hal ini menunjukkan bahwasanya pada kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s turbin dengan 6 sudu mampu untuk mengonversi energi angin menjadi energi mekanik lebih maksimal apabila dibandingkan dengan turbin dengan jumlah sudu terpasang sebanyak 2, 3, 4, dan 5 sudu. Hal tersebut dikarenakan energi mekanik yang dimiliki oleh turbin 6 sudu lebih besar untuk setiap kecepatan angin yang beroperasi pada turbin. Besarnya nilai energi mekanik ini dikaitkan dengan nilai TSR yang kecil jika dibandingkan turbin dengan jumlah sudu lainnya. Semakin kecil nilai TSR maka nilai torsi akan semakin besar. Apabila dihubungkan dengan daya mekanik, semakin besar torsi yang dimiliki maka, daya mekanik yang dihasilkan akan semakin besar pula. Atau bisa dikatakan torsi berbanding lurus dengan daya mekanik dan berbanding terbalik dengan nilai TSR. (3) Nilai efisiensi ( $\eta$ ) terbesar untuk setiap kecepatan angin yang beroperasi pada turbin dimiliki oleh turbin berjumlah sudu 2 buah dengan nilai maksimal 96,51%. Hal ini dapat dikatakan bahwa pada turbin angin dengan 2 sudu mampu mengubah atau mengoversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan lebih maksimal jika dibandingkan dengan

turbin berjumlah sudu 3, 4, 5, dan 6 yang masing-masing memiliki nilai efisiensi ( $\eta$ ) maksimal sebesar 82,94%, 84,65%, 74,76%, serta 66,15%. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam kondisi kecepatan angin yang tidak konstan, turbin angin dengan 2 sudu mampu bekerja lebih maksimal untuk membangkitkan energi listrik walaupun energi mekanik terbesar dihasilkan oleh turbin dengan jumlah sudu 6.

### Saran

Hasil luaran generator masih kurang maksimal, sehingga kedepannya bisa dilakukan optimalisasi dengan menggunakan konfigurasi *gearbox* untuk mendapatkan kinerja yang baik dari generator pada turbin angin sumbu vertikal. Serta masih rentan terhadap ancaman angin kencang yang mana bisa merusak generator tersebut. Untuk kedepannya bisa ditambah dengan sistem proteksi terhadap ancaman angin kencang.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ahsan, Razzaqul, dkk. 2018. "*Small wind Turbine System for Application in Oman*". Muscat, Oman : *Institute Electrical and Electronics Engineers Journal*.
- Alfred, K. Sunny, dkk. 2013. "*Vertical axis wind turbine: Aerodynamic modelling and its testing in wind tunnel*". Cochin : *6th International Convergence*.
- Budiarto, Untung, dkk. 2018. "Analisa Turbin Tipe H-Rotor Guna Meningkatkan Output Daya Pada Perencanaan Pembangunan PLTAL di Selat Pantar". Semarang : Universitas Diponegoro.
- Contained Energy Indonesia. 2011. "Buku Panduan Energi yang Terbarukan". Jakarta : PT Cipta Tani Lestari.
- Gerardo, Geovanni. 2014. "*From Savonius to Bronzinus : A comparisson among wind turbines*". Prato, Italy : *University of Genova*.
- Hau, Erick. 2013. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics 3rd Edition*. New York : *Springer Science and Business Media*.
- Hermana, Opik, dkk. "Perancangan Turbin Angin Tipe Savonius Sumbu Vertikal 6 Sudu". Bandung : Politeknik Negeri Bandung.
- Jamal. 2019. "Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Savonius". Makasar : Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Prabowo, Adi. 2017. "*Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia*". Jakarta : Kementrian ESDM Republik Indonesia.
- Qhurtobi, Ahmad. 2016. "Analisis Pengaruh Jumlah Sudu pada Turbin Angin Savonius Sumbu Vertikal Terhadap Tegangan dan Arus pada Proses Pengisian Akumulator". Bandung : Telkom University
- Trisno, Bambang, dkk. 2017. "Modul Pendalaman 2 Teknik Energi Surya Dan Angin : Perencanaan Sistem Mekanik PLTB". Jakarta : Kemenristekdikti.