

Analisis Pengaruh Karakteristik Turbin Terhadap Kinerja Turbin Angin Tipe *Propeller*

Awi Deskabelly, Satyo Nuryadi

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Informasi dan Elektro
Universitas Teknologi Yogyakarta
Jl. Ringroad Utara Jombor Sleman Yogyakarta
E-mail : deskabelly@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu faktor utama pendukung kemajuan suatu negara atau wilayah adalah ketersediaan energi dan pemanfaatan energi yang ada. Pada umumnya sumber energi mentah diubah menjadi energi listrik sebelum dimanfaatkan serta dikonversikan menjadi energi lain dan digunakan untuk peralatan lain. Energi listrik yang dapat dinikmati seperti sekarang ini berawal dari proses pembangkitan. Namun, seiring meningkatnya populasi penduduk di Indonesia dan meningkatnya kebutuhan akan pasokan energi, terjadi selisih yang sangat besar antara kebutuhan pasokan dan ketersediaan sumber daya energi. Energi terbarukan (*renewable energy*) menjadi pilihan yang sangat menjanjikan dalam mengatasi permasalahan ini. Energi terbarukan merupakan alternatif sumber energi yang sangat menjanjikan dan penerapannya dapat dilakukan sedini mungkin. Pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia terutama di Yogyakarta direalisasikan melalui pembangunan Turbin Angin berskala variatif di wilayah Pantai Pandansimo Kabupaten Bantul. Energi listrik yang diproduksi oleh turbin angin yang ada di Pantai Pandansimo masih belum cukup untuk memenuhi kebutuhan pengguna listrik di kawasan tersebut. Tujuan tugas akhir ini adalah untuk mendapatkan gambaran turbin angin seperti apa yang ideal dibangun di kawasan ini yang dapat berkerja secara optimal mengkonversi energi angin ke listrik sehingga dapat memenuhi kebutuhan pengguna listrik di kawasan ini. Metode yang digunakan adalah observasi, studi literatur dan perancangan desain turbin angin. Observasi dilakukan dengan meninjau secara langsung di PLTH Pandansimo dan melihat jenis-jenis turbin yang sudah beroperasi. Selanjutnya, data-data yang diperoleh dibandingkan dengan studi atau jurnal mengenai efisiensi turbin angin yang sudah ada. Dari proses ini selanjutnya dibangun sebuah desain turbin angin yang ideal digunakan di kawasan Pantai Pandansimo. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapati bahwa turbin WES5 Tulipo dan Solwind SW 10/4800 adalah yang ideal digunakan di Pantai Pandansimo. Rata-rata kecepatan angin di wilayah Pantai Pandansimo Bantul adalah 3,3 m/s. Kecepatan tersebut tergolong rendah jika dibandingkan dengan kecepatan angin di wilayah daratan eropa. Turbin angin horizontal tipe WES5 Tulipo dan turbin angin vertikal tipe Solwind SW 10/4800 adalah yang paling ideal untuk digunakan di wilayah Pantai Pandansimo karena kedua turbin ini dapat beroperasi pada angin kecepatan rendah namun tetap menghasilkan V_{out} dan *Rated Power* yang tinggi. Menara kedua turbin angin ini dapat digabung di sebuah menara tunggal, sehingga di Pantai Pandansimo dapat dibangun lebih banyak turbin angin hibrid ini.

Kata kunci: Turbin, Angin, Pandansimo, Energi

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu faktor utama pendukung kemajuan suatu negara atau wilayah adalah ketersediaan energi dan pemanfaatan energi yang ada. Seiring meningkatnya populasi penduduk di Indonesia dan meningkatnya kebutuhan akan pasokan energi, terjadi selisih yang sangat besar antara kebutuhan pasokan dan ketersediaan sumber daya energi.

Masalah ketersediaan sumber daya energi menggerakkan para ilmuwan, akademisi bahkan anggota bisnis dan komunitas untuk mencari pemecahan serta solusi konkret atas permasalahan yang sangat mendasar tersebut. Energi terbarukan

(*renewable energy*) merupakan alternatif sumber energi yang sangat menjanjikan dan penerapannya dapat dilakukan sedini mungkin untuk mengatasi permasalahan ini.

Pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia terutama di Yogyakarta direalisasikan melalui pembangunan Turbin Angin berskala variatif di wilayah Pantai Pandansimo Kabupaten Bantul mengingat kecepatan angin rata-rata di wilayah pantai selatan adalah 3,33 m/s, sehingga sangat memungkinkan jika di wilayah ini dibangun turbin angin yang mampu beroperasi pada angin kecepatan tersebut seperti turbin angin WES5 Tulipo. Pembangunan Turbin Angin yang dilakukan di

kawasan Pantai Pandansimo ini diharapkan dapat menjadi *pilot project* bagi kemajuan teknologi di Indonesia terutama dibidang pemanfaatan energi terbarukan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui turbin dengan karakteristik seperti apa yang ideal untuk dibangun di kawasan Pantai Pandansimo Bantul
2. Membuat desain turbin angin yang edisien dan ideal digunakan di Pantai Pandansimo
3. Menemukan solusi untuk permasalahan keterbatasan area/ruang untuk pemasangan turbin angin baru di Pantai Pandansimo

1.3 Batasan Masalah

Adapun untuk memastikan penelitian ini tidak keluar dari pokok pembahasan, penulis membuat batasan-batasan penelitian sebagai berikut:

1. Turbin Angin yang diteliti adalah Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) tipe Darrieus.
2. Turbin angin yang diteliti adalah turbin angin yang berkerja di daratan dan bukan *offshore*.
3. Pemilihan turbin angin yang sesuai berdasarkan turbin angin yang sudah ada dan sudah pernah diteliti oleh peneliti sebelumnya.
4. Jumlah sudu yang digunakan pada desain berdasarkan penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya.

1.4 Tujuan Penelitian

Berikut ini adalah tujuan yang hendak dicapai melalui penelitian ini:

1. Mengetahui karakteristik turbin angin yang lebih efisien dan ideal untuk kawasan Pantai Pandansimo.
2. Menganalisis kinerja turbin angin yang disebutkan di PLTH Pandansimo.
3. Mengetahui pengaruh kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan.
4. Membuat desain turbin angin yang ideal untuk digunakan di PLTH Pandansimo.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Menurut Firman Aryanto (2013) Turbin Angin poros horizontal ini dapat ditingkatkan efisiensinya untuk mendapat koefisien daya yang maksimal. Salah satunya dengan menggunakan sudu berjumlah banyak. Efisiensi sistem yang maksimal ini akan meningkatkan jumlah Watt (daya) yang dihasilkan sehingga untuk mendapatkan jumlah Watt tertentu cukup dengan menggunakan jumlah Turbin Angin yang lebih sedikit. Ia juga mengatakan bahwa jumlah sudu paling efisien pada kecepatan angin yang rendah adalah 5 sudu.

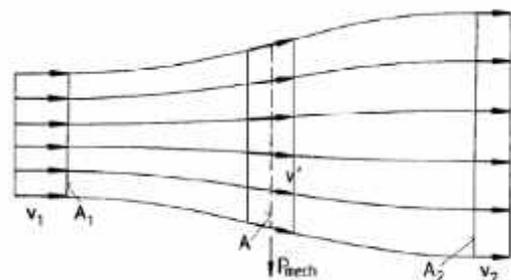
Setiap turbin angin memiliki nilai efisiensi yang berbeda-beda dan hal ini ditentukan oleh bentuk sudu, sudut sudu, bentuk ekor, material bahan pembuatan turbin angin, dan jumlah sudu (Puji, 2012).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Teori Momentum Elementer Betz

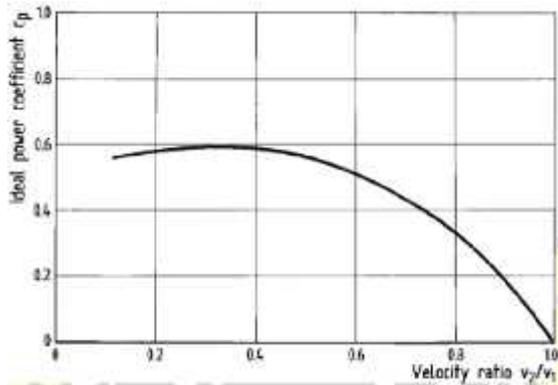
Berdasarkan teori momentum elementer Betz, besarnya energi yang maksimum dapat diserap dari angin hanya 0.59259 dari energi yang tersedia. Hal tersebut dapat dicapai dengan merancang sudu sedemikian rupa serta dengan memperhitungkan kecepatan keliling sudu pada puncak perputaran (perputaran maksimum) sudu sebesar 6 kali kecepatan angin. Pada dasarnya turbin angin untuk generator listrik hanya akan bekerja antara suatu kecepatan angin minimum, yaitu kecepatan star C_s , dan kecepatan nominalnya C_r .

Teori momentum elementer Betz sederhana berdasarkan pemodelan aliran dua dimensi angin yang mengenai rotor menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan sebagian energi kinetik angin diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Walaupun teori elementer Betz telah mengalami penyederhanaan, namun teori ini cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversikan menjadi bentuk energi lainnya.



Gambar 1: Model Aliran dari Teori Momentum Betz (Hau, 2006)

Koefisien daya hasil dari konversi daya angin ke daya mekanis turbin tergantung pada perbandingan dari kecepatan angin sebelum dan sesudah dikonversikan. Jika keterkaitan ini di masukan ke dalam bentuk grafik, secara langsung solusi analitis juga dapat ditemukan dengan mudah. Dapat dilihat bahwa koefisien daya mencapai maksimum pada rasio kecepatan angin tertentu seperti pada terlihat pada gambar berikut ini:



Gambar 2: Koefisien Daya Berbanding Dengan Rasio Kecepatan Aliran Sebelum dan Setelah Konversi Energi (Hau, 2006).

Besarnya efisiensi teoritis atau maksimum dari turbin angin (C_p) adalah:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593$$

ini menunjukkan bahwa turbin angin dapat mengkonversikan tidak lebih dari 60% energi total yang terdapat pada angin. Betz adalah orang pertama yang menemukan nilai ini, untuk itu nilai ini disebut juga dengan Betz faktor.

2.2.2 Energi Yang Terdapat Pada Angin

Pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh matahari menyebabkan terciptanya angin. Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Pada umumnya angin bergerak hal ini menyebabkan angin memiliki energi kinetik. Energi kinetik angin dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Oleh karena itu, kincir atau turbin angin sering disebut sebagai Sistem Konversi Energi Angin/SKEA.

Bentuk energi yang terdapat pada angin yang dapat diekstraksi oleh turbin angin adalah energi kinetiknya. Angin adalah massa udara yang bergerak. Besarnya energi yang terkandung pada angin tergantung pada kecepatan angin dan massa jenis angin atau udara yang bergerak tersebut. Jika diformulasikan, besar energi kinetik yang terkandung pada angin atau udara bergerak yang bermassa m dan berkecepatan v adalah:

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

dimana:

E_k = Energi kinetik (joule)

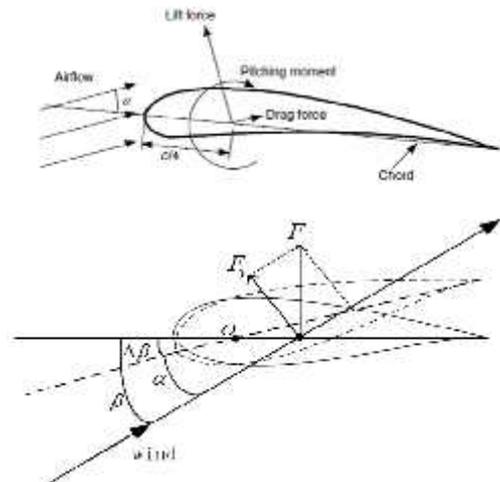
m = massa udara (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

Energi kinetik yang terdapat pada angin berbanding lurus dengan massa jenis udara () dan berbanding lurus dengan kuadrat dari kecepatannya. Turbin angin menangkap energi kinetik yang

dimiliki oleh angin karena angin mengandung massa dan kecepatan kemudian merubahnya menjadi perputaran rotor.

Pada Gambar 3 dibawah dijelaskan bahwa ketika sudu terkena terpaan angin dari arah *airflow/wind*, maka akan menghasilkan vektor gaya *lift* (terangkat keatas), serta *drag* dan terdapat resultan.



Gambar 3: Arah Terpaan Angin dan Vektor Gaya Pada Sudu Turbin

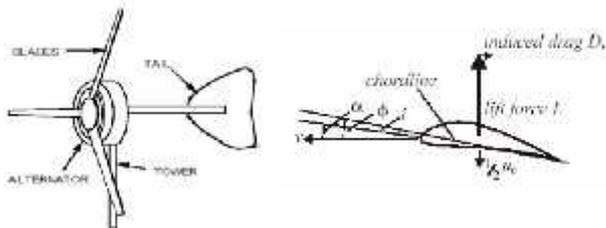
Perubahan gaya *lift* dan *drag* ini dipengaruhi langsung oleh bentuk geometri (kontur dan segmen) sudu, kecepatan dan arah angin terhadap garis utama (*chord*) sudu. Akibat dari perubahan gaya *lift* dan *drag* maka kecepatan sudut dan torsi poros akan berubah juga.

2.2.3 Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah perangkat mekanik yang memanfaatkan energi kinetik dari angin yang bergerak secara cepat dan mengubahnya menjadi energi listrik. Pada saat angin bertiup, angin disertai dengan energi kinetik (energi gerak) yang dapat dimanfaatkan untuk melakukan suatu pekerjaan. Contoh, perahu layar memanfaatkan tenaga angin untuk mendorongnya bergerak di air. Angin yang berhembus dapat diubah menjadi energi listrik dengan seperangkat alat pembangkit energi angin pada turbin angin

Dalam beberapa dekade terakhir ini, kekhawatiran akan habisnya energi fosil telah mendorong pengembangan dan penggunaan turbin angin secara meluas dalam mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat dengan prinsip konversi energi. Prinsip dasar Turbin Angin adalah mengkonversi tenaga mekanik dari putaran kincir menjadi energi listrik dengan induksi magnetik. Putaran kincir dapat terjadi dengan efektif dengan mengaplikasikan dasar teori aerodinamika pada desain batang kincir (*blade*). Ketersediaan angin dengan kecepatan yang memadai menjadi faktor utama dalam implementasi teknologi Turbin Angin.

Pada sebuah sudu ada gaya angkat (*Lift*) dan daya dorong (*Drag*). Untuk tipe Turbin Angin yang horizontal harus dibuat agar gaya *Lift* lebih besar dari gaya *Drag*. Gaya inilah yang menyebabkan proses perputaran turbin angin.



Gambar 4: Prinsip kerja dasar dari turbin angin

2.2.4 Jenis-Jenis Turbin Angin

Turbin Angin pada dasarnya dibagi menjadi dua jenis berdasarkan sumbu rotasi rotornya:

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) atau **Turbin angin Sumbu Horizontal (TASH)** adalah turbin yang sumbu rotasi rotornya sejajar dengan tanah dan juga sejajar terhadap arah angin. Jenis ini selanjutnya dibagi menjadi dua jenis:

1. *Upwind Turbine* adalah turbin angin yang rotornya menghadap angin. Saat ini sebagian besar HAWT diproduksi dengan desain ini. Turbin ini harus tidak fleksibel dan ditempatkan agak jauh dari menara. Keuntungan dasar turbin ini adalah, ia mampu menghindari naungan angin di belakang menara. Dibutuhkan *yaw mechanism*, sehingga rotornya selalu menghadap angin.
2. *Downwind Turbine* adalah turbin angin yang letak rotornya berada di sisi bawah menara. Turbin angin ini tidak membutuhkan *Yaw Mechanism*. Rotor dan *nacelles* dirancang sedemikian rupa sehingga *nacelles* memungkinkan angin mengalir secara terkendali.

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) atau **Turbin angin Sumbu Vertikal (TASV)** adalah turbin angin yang sumbu rotasi rotornya tegak lurus terhadap tanah dan juga tegak lurus terhadap arah angin. Jenis turbin ini selanjutnya dibagi menjadi tiga jenis:

1. Turbin Tipe Darrieus adalah jenis VAWT. Ini pertama kali ditemukan dan dipatenkan pada tahun 1931 oleh insinyur penerbangan Perancis, Georges Jean Marie Darrieus. Turbin ini juga dikenal sebagai turbin pengocok telur karena baling-baling rotornya yang berbentuk pengocok telur. Turbin ini terdiri dari pisau berorientasi vertikal yang dipasang pada rotor vertikal. Ini bukan turbin yang dapat dinyalakan sendiri dan karenanya diperlukan motor kecil untuk memulai putarannya. Pertama turbin Darrieus diputar dengan menggunakan motor bertenaga kecil. Setelah mencapai kecepatan yang cukup, angin yang mengalir melintasi bilahnya menghasilkan

gaya angkat dan gaya angkat ini memberikan torsi yang diperlukan untuk rotasi. Ketika rotor berputar, rotor tersebut juga memutar generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik.

2. Turbin Tipe Giromill. Jenis ini mirip dengan turbin Darrieus tetapi perbedaannya adalah jenis ini memiliki rotor berbentuk H. Ia bekerja dengan prinsip yang sama dengan turbin Darrieus. Disini desain Darrieus yang memiliki bilah rotor berbentuk pengocok telur digantikan oleh bilah vertikal lurus yang terpasang dengan menara pusat dengan penyangga horizontal. Umumnya jenis turbin angin ini terdiri dari 2-3 *blade*.
3. Turbin Tipe Savonius. Turbin ini pertama kali ditemukan pada tahun 1922 oleh Insinyur Finlandia Sigurd Johannes Savonius. Ini adalah salah satu turbin paling sederhana di antara semua turbin yang ada. Ini adalah turbin dengan prinsip "*drag-type*" dan terdiri dari dua atau tiga *scoops*/bilah. Jika kita melihatnya dari atas maka turbin angin ini akan terlihat seperti bentuk 'S' di bagian melintang. Bilah turbin ini memiliki bentuk lengkungan dan karena itu, ia mengalami lebih sedikit hambatan ketika bergerak melawan angin daripada bergerak dengan angin. Karena ini adalah turbin dengan prinsip "*drag-type*", ia mampu mengekstraksi tenaga angin dalam jumlah yang sangat sedikit dibandingkan dengan turbin tipe lift berukuran serupa lainnya.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Observasi

Observasi dilakukan dengan mengamati dan meninjau secara langsung sistem dan jenis-jenis turbin angin yang sudah ada dan yang beroperasi saat ini di PLTH Pandansimo Bantul. Penulis juga melakukan pengumpulan data seperti kecepatan angin dan total jumlah turbin yang ada di PLTH Pandansimo.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari dokumen-dokumen dan data yang sudah didapat di PLTH Pandansimo. Penulis juga mempelajari beberapa penelitian, jurnal dan buku terkait karakteristik turbin angin, kecepatan dan karakteristik angin di Indonesia, efisiensi turbin angin serta jenis-jenis turbin angin yang sesuai digunakan di PLTH Pandansimo atau pantai selatan secara umum.

3.3 Perancangan Turbin Angin

Tahapan berikutnya adalah melakukan pemilihan turbin angin yang sesuai sehingga penulis dapat merancang turbin angin yang efisien dan dapat digunakan secara optimal di wilayah Pantai Pandansimo. Pada tahap ini penulis melakukan perancangan turbin angin hibrid yang hanya membutuhkan satu tiang/tower.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Potensi Energi Angin di Pantai Pandansimo

Pantai Pandansimo yang terletak di kabupaten Bantul ini menyimpan potensi energi yang dapat dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan pasokan energi listrik di sekitar kawasan tersebut.

Berdasarkan data kecepatan angin di PLTH Pandansimo, wilayah Pantai Pandansimo dan pantai selatan, rata-rata kecepatan angin adalah 3,3 m/s.

Tabel 1: Data Kecepatan Angin Wilayah Pandansimo Bantul

BULAN	KECEPATAN ANGIN (m/s)
Januari	3,0
Februari	3,1
Maret	2,3
April	2,6
Mei	3,6
Juni	4,0
Juli	4,6
Agustus	4,7
September	4,0
Oktober	3,1
November	2,6
Desember	2,3
RATA-RATA	3,3

Berdasarkan data diatas dapat dilihat bahwa rata-rata kecepatan angin di daerah Pantai Pandansimo Bantul adalah sekitar 3,3 m/s. Sementara untuk kecepatan tertinggi mencapai 4,7 m/s dan kecepatan terendah hanya sekitar 2,3 m/s. Oleh karena itu, pemanfaatan energi angin dan pemilihan jenis turbin angin di daerah ini harus memperhatikan jenis turbin yang dapat bekerja pada kecepatan angin rendah.

4.2 Jenis Turbin Angin Yang Sesuai

Berdasarkan data kecepatan angin diatas, ada beberapa jenis turbin angin yang sesuai untuk digunakan di kawasan Pantai Pandansimo, yang memenuhi kriteria angin di kawasan tersebut:

Tabel 2: Jenis Turbin Angin Sumbu Horizontal

N	Nama	Rated Power	Cut In Wind Speed	Max Wind Speed	V out
1	Energy Ball	500 W	2 m/s	40 m/s	100 V
2	WES 5 Tulipo	2,5 kW	3 m/s	59,5 m/s	400 V
3	Gazelle	20 kW	4 m/s	20 m/s	400 V
4	Swift 1,5 kW	1,5 kW	3,4 m/s	n/a	400 V

Tabel 3: Jenis Turbin Angin Sumbu Vertikal

N	Nama	Rated Power	Cut In Wind Speed	Max Wind Speed	V out
1	LDG-100 RV	100 W	1,5 m/s	45 m/s	12V/24V
2	SOLWIND SW 10/4800	4,8 kW	1,5 m/s	27 m/s	415V
3	RV NE-300R	300 W	2 m/s	45 m/s	12V/24V
4	RV NE-400 SV	400 W	2 m/s	45 m/s	12V/24V
5	RV NE-500 H	500 W	2 m/s	35 m/s	12V/24V

Berdasarkan tabel 2 dan tabel 3 diatas, maka turbin tipe WES5 Tulipo dan SOLWIND SW 10/4800 adalah yang paling ideal untuk digunakan di wilayah Pantai Pandansimo karena kedua turbin ini dapat beroperasi pada angin kecepatan rendah dan menghasilkan V out dan Rated Power yang tinggi.

4.3 Turbin WES5 Tulipo (Turbin Angin Sumbu Horizontal)

WES5 Tulipo disebut juga sebagai “urban turbine”, dimana turbin angin ini berukuran kecil dan didesain untuk lingkungan masyarakat urban. Desain blade ini relatif memiliki low rotation dan turbin ini hampir tidak menghasilkan noise maupun getaran yang mengganggu lingkungan.

Tabel 4: Tabel Spesifikasi WES5 Tulipo

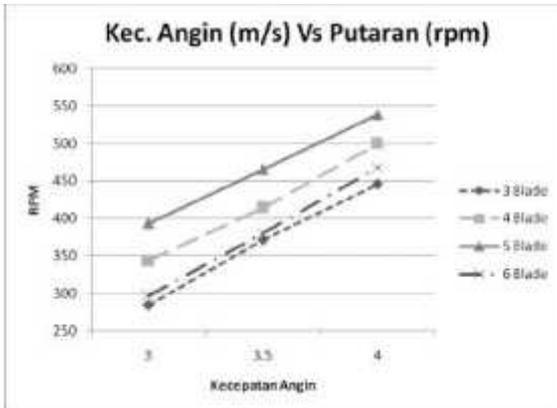
Spesifikasi Turbin WES5 Tulipo	
Rated power	2,5 kW AC
Cut in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed	20 m/s
Maximum wind speed	55 m/s
Tegangan keluaran	400 V
Lifetime	20 tahun
Dimensi	
Massa Total	200 kg
Diameter rotor	5 m
Swapt area	19,6 m ²
Tinggi Tower	6 – 12 m

Turbin WES5 Tulipo dapat beroperasi dengan baik pada jangkauan suhu 200-400 Celcius. Turbin ini bekerja secara self-starting machine dan menggunakan generator asynchronous dan yaw control system.

Turbin ini merupakan tipe upwind turbin dimana rotor menghadap angin. Keuntungan tipe upwind adalah menghindari angin terhalang oleh tower. Turbin ini dapat berputar menyesuaikan arah

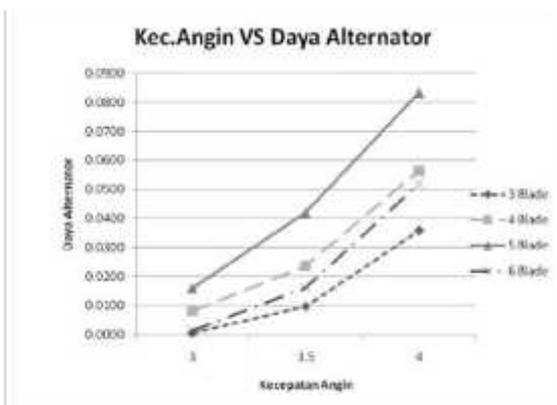
angin, sehingga rotor dapat terus berputar. Pada umumnya turbin WES5 Tulipo memiliki 3 sudu.

Menurut Firman Aryanto (2013), jumlah sudu paling efisien pada kecepatan angin yang rendah adalah 5 sudu sehingga kincir angin WES5 Tulipo perlu dimodifikasi dengan 5 sudu.



Gambar 5: Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Putaran (Firman, 2013)

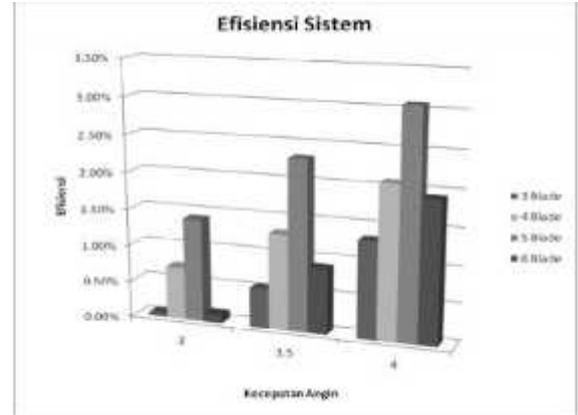
Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa kecepatan angin berbanding lurus dengan putaran yang dihasilkan, artinya semakin besar kecepatan angin yang diberikan, maka semakin besar putaran turbin yang dihasilkan, semakin besar energi yang diberikan oleh angin terhadap turbin maka energi yang dapat dikonversikan turbin menjadi putaran semakin meningkat. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa putaran maksimal yang dihasilkan turbin angin sebesar 538.60 rpm dengan kecepatan angin maksimal yaitu 4 m/s pada jumlah blade 5, sedangkan untuk putaran minimal yang terjadi pada kecepatan yaitu 3 m/s sebesar 284.27 rpm pada jumlah blade 3.



Gambar 6: Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Alternator (Firman, 2013)

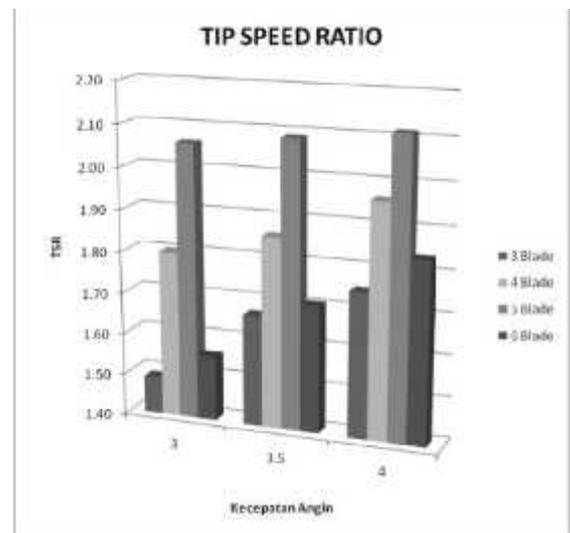
Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa daya maksimum yang dihasilkan pada jumlah blade 5 dan kecepatan angin terbesar 4 m/s sebesar P alternator 0.0833 watt, sedangkan daya minimum terjadi pada kecepatan angin 3 m/s dan jumlah blade 3 sebesar P alternator 0.0006 watt yang dihasilkan dari perkalian tegangan dan arus rata-rata yang diukur pada

generator pada saat penelitian. Dari variasi jumlah blade yang dilakukan juga memiliki nilai daya yang berbeda, dimana daya maksimum terjadi pada jumlah blade 5 lebih besar bila dibandingkan dengan jumlah sudu yang lain.



Gambar 7: Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Efisiensi Sistem (Firman, 2013)

Efisiensi Sistem adalah perbandingan daya alternator dengan daya angin, semakin besar daya yang mampu diserap oleh rotor maka efisiensi sistem juga akan semakin meningkat. Dari grafik diatas terlihat bahwa kecepatan angin berbanding lurus dengan efisiensi sistem, semakin meningkat kecepatan angin maka *coefisient power* juga akan semakin meningkat, karena semakin besar kecepatan angin maka daya angin yang dihasilkan juga semakin besar.



Gambar 8: Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan TSR (Firman, 2013)

Dari grafik hubungan antara kecepatan angin dengan Tip Speed Ratio (TSR) terlihat nilai TSR maksimal pada jumlah blade 5 dan kecepatan angin maksimal 4 m/s lebih besar dibandingkan jumlah blade yang lain, ini dikarenakan faktor penentu dari TSR seperti kecepatan angin dan putaran, sehingga dengan semakin meningkatnya putaran turbin maka

TSR yang dihasilkan akan meningkat. Untuk semua pengujian blade, nilai TSR maksimal pada kecepatan maksimal 4 m/s terjadi pada jumlah blade 5 yaitu sebesar $\lambda = 2.11$, sedangkan untuk nilai terendah pada kecepatan angin 3 m/s dihasilkan pada jumlah blade 3 yaitu sebesar $\lambda = 1.49$.

4.4 Turbin Angin Solwind SW 10/4800

Turbin angin sumbu vertikal Solwind SW 10/4800 adalah turbin angin yang dikembangkan oleh perusahaan bernama Solwind di Selandia Baru. Turbin ini dirancang secara khusus untuk berkerja pada kecepatan angin 1.5 m/s dan mulai menghasilkan energi listrik saat kecepatan angin mencapai 3.7 m/s dan akan memproduksi daya optimal saat kecepatan angin mencapai 10 m/s.

Saat beroperasi, turbin ini tidak menghasilkan banyak *noise*. Hal ini adalah karena blade turbin ini terletak relatif jauh dari tiang. Pada turbin angin sumbu horizontal letak blade yang relatif dekat dengan tiang menara (*mast*) menyebabkan terjadinya *noise* setiap kali blade berputar.

Blade selalu berada pada jarak yang sama dari tiang. *Blade* turbin ini terbuat dari bahan *fiber glass* sehingga fleksibel dan mudah dalam perawatannya.

Tabel 5: Spesifikasi Solwind 10/4800

Rated power	4,8 kW
Cut-in wind speed	1,5 m/s
Cut-out wind speed	27 m/s
Maximum wind speed	53 m/s
Tegangan keluaran	415 V AC
Tipe Generator	Magnetic Levitation Alternator (MLA)
Tinggi Tower	6,5 meter

Turbin ini menggunakan generator berkecepatan rendah *Magnetic Levitation Alternator* (MLA). Hanya ada satu bagian yang bergerak pada generator ini, hal ini meminimalisir terjadinya aus pada komponen, sehingga memperpanjang umur turbin angin itu sendiri.

Pada kecepatan angin tinggi turbin akan secara otomatis berhenti, dan akan berhenti secara total pada kecepatan angin 27 m/s. Dalam kondisi ini (*stall*), turbin akan secara otomatis mempertahankan kecepatan outputnya.

Turbin yang didesain berdasarkan desain darrieus ini dapat menangkap angin dari segala arah dan tidak memerlukan *yaw*/pengarah turbin untuk mengarahkannya bladenya ke posisi arah datang angin.

4.5 Turbin Angin di Pantai Pandansimo

Turbin angin yang digunakan pada PLTH Pantai Baru termasuk jenis turbin angin *lattice*. Spesifikasi dari turbin angin yang terdapat di PLTH Pantai baru untuk jenis *lattice* dan *tri angel* bisa dilihat pada tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 6: Spesifikasi Elektrik Turbin Angin di Pantai Pandansimo

Tipe Sistem	1 kW/240 V
Pmax	1 kW
Vmax	240 V
Kecepatan Angin Cut In	3,5 m/s < V angin < 25 m/s
Kecepatan Angin Cut Off	V angin < 3,5 m/s dan V angin < 25 m/s
Kecepatan Rotasi	375 rpm
Generator 3 Phasa	1500 Watt
Sifat Magnet Generator	Magnet Permanen
Tinggi Menara	15 mm
Jumlah Sudu	3 buah
Panjang Sudu	1450 mm
Berat Sudu	2,45 kg
Bahan Sudu	<i>Fiber Reinforced</i>
Pengarah Turbin	Plat Ekor

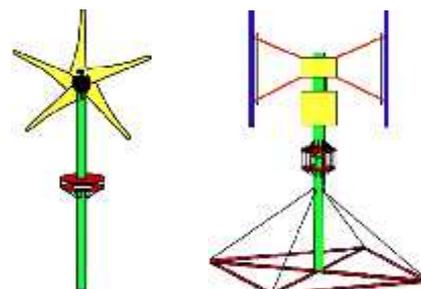
Sumber: <https://id.scribd.com/doc/241215866/plth>

4.6 Perancangan Turbin Angin

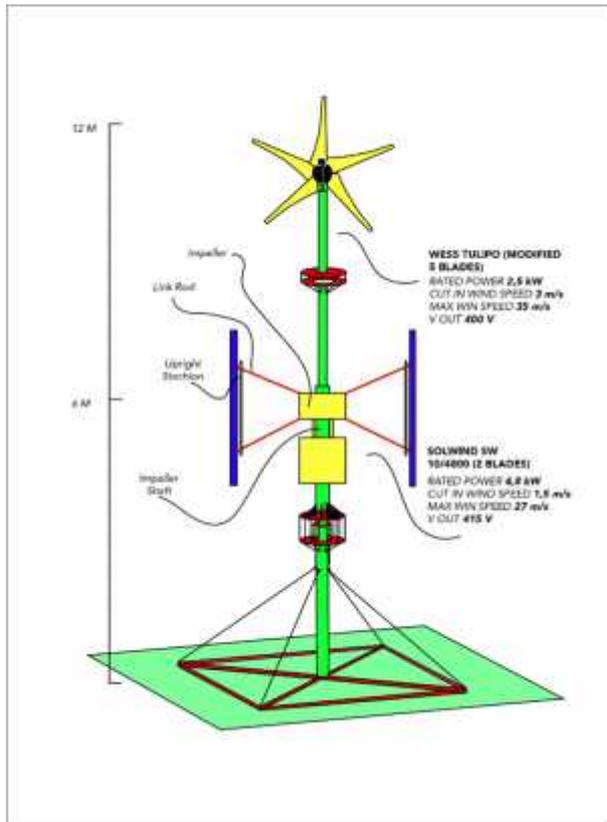
Dari data yang sudah diketahui, turbin sumbu horizontal WES5 Tulipo yang dimodifikasi sehingga memiliki 5 blade dan turbin sumbu vertikal Solwind 10/4800 adalah yang paling ideal digunakan di Pantai Pandansimo. Kedua turbin angin ini ideal digunakan karena pada kecepatan angin rata-rata 3,3 kedua jenis turbin angin ini dapat beroperasi dan menghasilkan *Vout* dan *Rated Power* yang tinggi.

Meski demikian, ada banyak kekurangan jika masing-masing turbin angin tersebut dibangun dengan menggunakan tower terpisah, salah satunya adalah masalah jumlah ruang yang terbatas dan biaya pembangunan yang lumayan tinggi. Berdasarkan hal tersebut, maka akan lebih efisien jika kedua turbin angin tersebut di hybrid menggunakan satu tiang/tower, mengingat tinggi kedua turbin angin yang bervariasi yakni 6 meter untuk jenis Solwind 10/4800, dan 12 m dari permukaan tanah untuk jenis WES5 Tulipo. Tinggi minimal yang berbeda tersebut memungkinkan kedua turbin angin ini untuk digabungkan di satu buah tower.

Berikut ini adalah desain tower untuk turbin angin hybrid ini:



Gambar 9: Turbin sumbu horizontal dan sumbu vertikal



Gambar 10: Desain Turbin Angin Hybrid WES5 Tulipo (Modified 5 blades) dan Solwind 10/4800

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang penulis lakukan, maka berikut ini beberapa kesimpulan yang penulis dapatkan:

1. Turbin angin horizontal tipe WES5 Tulipo dan turbin angin vertikal tipe Solwind SW 10/4800 adalah turbin angin yang ideal untuk digunakan di wilayah Pantai Pandansimo karena kedua turbin ini dapat beroperasi pada angin kecepatan rendah namun tetap menghasilkan V out dan Rated Power yang tinggi. Selain itu harga komponen yang relatif rendah juga membuat dua jenis turbin angin ini sangat ideal untuk digunakan di Pantai Pandansimo.
2. Jumlah sudu WES5 Tulipo umumnya hanya 3 sudu, sedangkan jumlah sudu paling efisien pada kecepatan angin yang rendah adalah 5 sudu, sehingga turbin angin ini perlu dimodifikasi menjadi 5 sudu.
3. Turbin angin Solwind SW 10/4800 dapat beroperasi pada kecepatan angin 1.5 m/s, sehingga meskipun turbin WES5 Tulipo belum dapat beroperasi pada kecepatan angin yang sangat rendah, turbin Solwind SW 10/4800 dapat beroperasi dan memproduksi energi listrik pada kecepatan angin 3.7 m/s.
4. Karena tiang/tower kedua turbin angin ini digabung menggunakan sebuah tiang/tower tunggal, maka di Pantai Pandansimo dapat

dibangun lebih banyak turbin angin hibrid ini, mengingat selama ini PLTH Pandansimo mengalami permasalahan mengenai keterbatasan lahan/jumlah ruang yang tersedia untuk melakukan pembangunan turbin angin baru.

5. Tinggi standar yang dianjurkan untuk pemasangan kedua turbin angin ini bervariasi, yakni 6 meter dari permukaan tanah untuk jenis Solwind 10/4800, dan 12 meter dari permukaan tanah untuk jenis WES5 Tulipo. Tinggi standar yang berbeda tersebut memungkinkan kedua turbin angin ini untuk digabungkan di satu buah tower dengan tinggi 12 meter dari permukaan tanah.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang penulis lakukan, berikut ini beberapa saran yang dapat diperhatikan untuk memudahkan penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan karakteristik dan mendesain turbin angin hibrid:

1. Pemilihan turbin angin yang akan di hibrid harus memperhatikan biaya, ukuran, serta dampak gangguan yang akan terjadi terhadap lingkungan sekitar. Misalnya *noise*, suara dan getaran.
2. Desain turbin angin harus memperhatikan tinggi standar pemasangan turbin angin. Turbin angin dengan tinggi yang berbeda lebih optimal saat di hibrid karena kedua turbin angin berada pada tinggi standar yang dibutuhkan, sehingga dapat bekerja menerima energi secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anggraini, Dita. 2016. *Analisis Potensi Angin di Pantai Baru Pandansimo Kabupaten Bantul* [skripsi]. Yogyakarta (ID): Universitas Gajah Mada.
- [2] Aryanto, F., 2013. *Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal*. *Dinamika Teknik Mesin, Vol 3 No. 1*, Nusa Tenggara Barat, Teknik Mesin, Universitas Mataram.
- [3] Hau, Erich. 2006. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Edisi Kedua. Germany. Springer.
- [4] Ikhsan, I. dan Hipi M.A., 2011. *Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Kinerja Kincir Angin Tipe Propeller Pada Wind Tunnel Sederhana*. Skripsi, Makassar: Teknik Mesin, Universitas Hasanuddin.
- [5] Puji, 2012. *Studi Awal Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Daya Keluaran Turbin Angin Tipe Horizontal Berdiameter 1,6 Meter Sebagai Sumber Penyedia Listrik Pada Proyek Rumah DC di FMIPA UNJ*. Seminar Nasional Fisika, Jakarta: Universitas Negeri Jakarta.