

Effect of Tip Speed Ratio on Power Generated Prototype of Horizontal Axis Wind Turbine with Three Blades

Rachmat Miftakhul Huda^{1,*}, Illa Rizianiza¹ dan Sulistijono²

¹Prodi Teknik Mesin, Jurusan Teknologi Industri dan Proses, Institut Teknologi Kalimantan – Balikpapan

²Prodi Teknik Material dan Metalurgi, Jurusan Ilmu Kebumian dan Lingkungan, Institut Teknologi Kalimantan – Balikpapan

*Korespondensi: rachmatmhuda@gmail.com

Abstract. One of the variables that can have an impact on the amount of power generated by the Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) is the design of the wind turbine blades. The blade's design begins by calculating the length of the chord (C) on the blade's cross-section airfoil. Tip speed ratio (λ) is one of the variables in the calculation of the chord's length that can affect the width of the blade and gives an impact on the power generated by the turbine. An investigation is conducted on the design of a small-scale HAWT prototype with three blades. Prototype design combined with extruded deposition-based rapid prototyping technology that is printed using 3d printer design for more accurate results. Variations of λ are 3 and 4 as assumptions on the calculation in the search for the value of C. Variations of wind velocities are 3.844 m/s; 4,381 m/s and 4,828 m/s. Test results show the most optimum power is in the configuration with $\lambda = 3$ with the wind speed of 4.828 m/s that is 92.64 mW.

Abstrak. Salah satu variabel yang dapat memberikan dampak terhadap besarnya daya yang dihasilkan oleh Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) adalah perancangan pada sudu turbin angin. Perancangan sudu diawali dengan menghitung panjang *chord* (C) pada penampang *airfoil* sudu turbin. *Tip speed ratio* (λ) merupakan salah satu variabel dalam perhitungan panjang *chord* yang dapat memengaruhi lebar sudu dan memberikan dampak terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin. Penelitian dilakukan terhadap daya pada perancangan prototipe TASH skala kecil dengan tiga sudu. Perancangan prototipe dipadukan dengan teknologi *extruded deposition-based rapid prototyping* yakni desain dicetak menggunakan *3d printer* agar hasil lebih akurat. Variasi λ yakni 3 dan 4 sebagai asumsi pada perhitungan dalam mencari nilai C. Variasi kecepatan angin yakni 3,844 m/s; 4,381 m/s dan 4,828 m/s. Hasil pengujian menunjukkan daya listrik paling optimal berada pada konfigurasi dengan $\lambda = 3$ dengan kecepatan angin 4,828 m/s yakni 92,64 mW.

Kata kunci: Turbin Angin Sumbu Horizontal, tiga sudu, *airfoil*, *chord*, *tip speed ratio*, *3d printing*, daya

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Peningkatan pembangunan pada bidang teknologi yang semakin pesat akan diikuti oleh kebutuhan energi khususnya energi listrik yang semakin besar pula. Saat ini sumber energi dari pembangkit listrik masih didominasi oleh sumber yang tidak dapat diperbarui misal minyak bumi, gas dan batu bara. Sumber energi tersebut termasuk dalam jenis sumber energi yang tidak dapat diperbarui sehingga akan habis suatu saat nanti. Penggunaan sumber energi yang dapat diperbarui pun menjadi solusi yang bisa diambil untuk permasalahan tersebut. Salah satu sumber energi terbarukan adalah angin.

Menurut Turyanti dan Effendy [1], angin merupakan dinamika perpindahan massa udara secara horizontal yang pada umumnya diukur dalam dua parameter yaitu kecepatan dan arah. Angin memiliki energi kinetik dikarenakan angin bergerak dan memiliki massa. Sedangkan Pariwono dan Manan [2] mendefinisikan angin sebagai gerakan

udara horizontal yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara (tekanan tinggi ke tekanan rendah) di sekitarnya. Angin disebabkan oleh gerakan molekul udara di atmosfer. Penyebab gerakan pada molekul udara tersebut berasal dari energi yang ditimbulkan oleh panas matahari. Setiap benda statis termasuk molekul udara menyimpan energi laten yang disebut dengan energi potensial. Energi potensial tersebut dikonversi menjadi energi kinetik sebagai akibat dari kecepatan molekul udara. Energi kinetik dapat dikonversi menjadi bentuk energi lain dengan bantuan mesin konversi energi.

Mesin konversi energi yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik dinamakan turbin angin. Sesuai dengan letak sumbu rotornya, turbin angin dapat diklasifikasikan menjadi Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) dan Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH). TASH memiliki keunggulan dibanding TASV

dalam efisiensi daya atau *coefficient of power* (Cp). Jumlah sudu pada rotor TASH sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan. Menurut Jansen [3] pada umumnya turbin angin dengan soliditas tinggi (banyak sudu) akan menghasilkan torsi yang besar, efisiensi rendah serta *rated wind speed* yang tidak terlalu tinggi. TASH dengan tiga sudu paling banyak digunakan karena memiliki efisiensi yang cukup tinggi walaupun dengan desain yang tidak terlalu rumit.

Berdasarkan ukuran dari rotor, TASH dapat diklasifikasikan menjadi TASH skala kecil dan TASH untuk keperluan komersial. TASH skala kecil biasa dimanfaatkan sebagai bahan penelitian karena proses pembuatannya yang lebih ekonomis. Hirahara, dkk [4] melakukan studi mengenai kinerja dari TASH skala kecil dengan empat sudu. Diameter rotor prototipe sebesar 500 mm diuji dengan kecepatan angin 8-12 m/s dan menghasilkan Cp maksimum yakni 0,4 saat *tip speed ratio* (λ) sebesar 2,7. Kishore, dkk [5] telah melakukan penelitian mengenai TASH skala kecil dengan tiga sudu. Prototipe dengan diameter rotor 394 mm menghasilkan daya listrik maksimum 0,83 W saat kecepatan 5 m/s.

Pada prototipe TASH skala kecil, desain sudu sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan. Penampang melintang sudu menggunakan profil *airfoil* sebab lebih aerodinamis. Salah satu faktor yang memengaruhi daya yang dihasilkan adalah besar λ sebagai asumsi pada perhitungan desain penampang sudu. Proses pembuatan sudu dilakukan dengan mendesain pada *software CAD* kemudian dilanjutkan dengan mencetak desain yang telah dibuat menggunakan *3d printer*. Hal ini dimaksudkan agar mengurangi error pada profil *airfoil* sudu.

Metode Penelitian

Variabel kontrol atau variabel yang sudah ditetapkan pada penelitian ini adalah diameter rotor sebesar 428 mm dan sudut serang sebesar 15°. Penetapan diameter rotor didasari oleh limit pencetakan pada *3d printer* yang digunakan. Variabel independen pada penelitian ini adalah dua variasi λ terhadap tiga variasi kecepatan angin. Variasi λ adalah 3 dan 4, sedangkan variasi kecepatan angin yakni 3,844 m/s; 4,381 m/s dan 4,828 m/s. Variasi dependen pada penelitian ini adalah daya listrik ($P_{listrik}$). Cp dihitung dengan membandingkan daya rotor (P_{out}) dengan daya angin (P_{in}) maksimum pada pengujian.

Panjang tiap sudu yaitu 210 mm dibagi menjadi delapan lapisan yang tiap lapisannya terdiri atas desain *airfoil* beserta ukuran yang meliputi tebal dan lebar sudu dari sisi *leading edge*. Perancangan

sudu dengan metode *layer per layer* mengikuti teori *Blade Element Momentum*. Menurut Ingram [6] metode *layer per layer* memudahkan perancangan agar dapat membentuk sudu dengan profil yang kompleks. *Pitch angle* atau sudut relatif angin terhadap sudu (β) dianalisis dengan asumsi *tip speed ratio* relatif (λ_r) sama pada tiap penampangnya seperti pada Pers. (1).

$$\beta = 90^\circ - \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \quad (1)$$

Dari Pers (1) kemudian dihitung nilai $\cos \beta$. Panjang *chord airfoil* sudu (C) dianalisis setelah menentukan jumlah sudu (B), jarak antara ujung terluar sudu dengan *layer* yang akan dirancang (r) dan λ_r yang juga diasumsikan sama pada tiap penampang. Persamaan yang digunakan sesuai dengan Pers (2). Hasil akhir pada perhitungan panjang *chord* dalam satuan mm.

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot \cos \beta}{3 \cdot \lambda_r \cdot B} \quad (2)$$

Nilai C tidak boleh kurang dari 5 mm, maka r pada penampang satu sudu dengan $\lambda = 4$ dimulai dari 0,06 mm. Hasil perhitungan panjang *chord* (C) dengan asumsi $\lambda = 3$ ditunjukkan pada Tabel 1 dan $\lambda = 4$ ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 1. Hasil Perhitungan C dengan asumsi $\lambda = 3$

Penampang	r (mm)	B	C (mm)
1	4	3	7,93
2	6	3	11,89
3	8	3	15,85
4	10	3	19,81
5	12	3	23,78
6	14	3	27,74
7	16	3	31,70
8	18	3	35,67

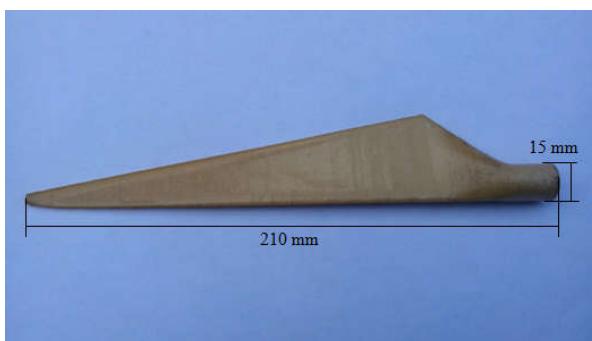
Tabel 2. Hasil Perhitungan C dengan asumsi $\lambda = 4$

Penampang	r (mm)	B	C (mm)
1	6	3	6,81
2	8	3	9,08
3	10	3	11,35
4	12	3	13,62
5	14	3	15,89
6	16	3	18,16
7	18	3	20,43
8	20	3	22,70

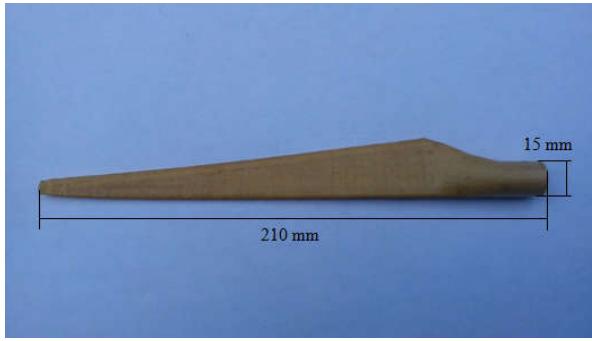
Jenis *airfoil* yang digunakan adalah NACA 4412 yang merupakan seri NACA 4 digit. Jenis ini banyak diaplikasikan untuk *blade* dengan dimensi yang kecil dan untuk ukuran panjang dibawah 5 m. Persentase *chamber* maksimum pada *chord* sebesar 4%, jarak *chamber* maksimum dari *leading edge*

sebesar 40% dan persentase ketebalan maksimum *airfoil* pada *chord* sebesar 12%.

Hasil yang telah didapat digunakan sebagai acuan untuk desain profil sudu pada *software CAD*. Perancangan prototipe dipadukan dengan teknologi *extruded deposition-based rapid prototyping* yakni desain dicetak menggunakan *3d printer*. Material yang digunakan untuk mencetak sudu dari prototipe adalah *polylactic acid* (PLA). Sudu yang telah tercetak diampelas dan dilapisi resin agar permukaan menjadi lebih halus dan sudu menjadi lebih kuat. Hasil dari pencetakan dan *finishing* dapat dilihat pada gambar 1 untuk sudu dengan λ adalah 3 dan gambar 2 untuk sudu dengan λ adalah 4. *Hub* sebagai penghubung antara sudu dan poros juga didesain menggunakan *software CAD* dan dicetak menggunakan *3d printer* dengan profil menyerupai bagian depan pesawat terbang agar angin yang menerpa *hub* tetap laminar ketika diteruskan ke sudu.



Gambar 1. Hasil dari pencetakan dan *finishing*, $\lambda = 3$



Gambar 2. Hasil dari pencetakan dan *finishing*, $\lambda = 4$

Pengujian dilakukan setelah semua komponen dirangkai menjadi prototipe TASH skala kecil dengan tiga sudu. Prototipe terlebih dahulu diperlengkap dengan memasang reflektor *tachometer* pada roda gigi untuk pengujian kecepatan putaran, pemasangan sudu yang sesuai dengan sudut serang, roda gigi dipastikan tidak mengalami slip, jarak sumber angin dengan titik uji yang tepat agar mendapatkan kecepatan angin yang sama pada tiap pengujian dan memastikan pusat sumber angin

sejajar dengan pusat poros serta arah angin sejajar terhadap sumbu pusat rotor.

Pengambilan data dilakukan ketika putaran turbin angin telah *steady*. Hal ini dimaksudkan agar data yang diperoleh tidak memiliki *range* yang begitu besar ketika dilakukan iterasi pengujian. Pengulangan dilakukan sebanyak tiga kali pada tiap pengujian lalu diambil nilai rata-rata agar data yang didapat signifikan. Variabel yang didapat setelah pengujian adalah kecepatan angin, kecepatan putaran, kuat arus dan tegangan listrik. Daya listrik dihitung menggunakan Pers. (3), daya rotor dan daya angin dihitung setelah mendapatkan nilai daya listrik maksimum dengan Pers. (4) dan Pers. (5) serta C_p dengan Pers. (6).

$$P_{\text{listrik}} = V_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} \quad (3)$$

$$P_{\text{out}} = T \cdot \omega \quad (4)$$

$$P_{\text{in}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_{\text{in}}^3 \quad (5)$$

$$C_p = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (6)$$

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh λ pada perhitungan C_p pada sudu adalah semakin kecil nilai λ maka semakin lebar profil sudu yang dihasilkan. Lebar sudu pada TASH berpengaruh besar terhadap daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Kuat arus dan tegangan pada generator dapat diukur sehingga berdasarkan Pers. 3 daya listrik dapat dihitung dan didapat hasil pada Tabel 2.

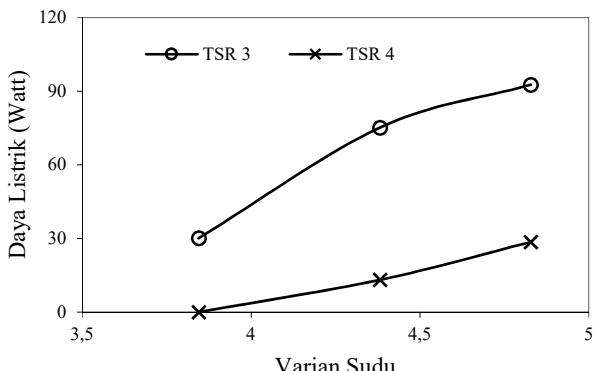
Tabel 3. Daya listrik yang dihasilkan

Tip speed ratio	Kecepatan angin (m/s)	Daya listrik (mW)
3	3,844	30,1
	4,381	75,19
	4,828	92,64
	3,844	0
4	4,381	13,15
	4,828	28,56

Data yang ditampilkan pada tabel 3. ditampilkan dalam bentuk grafik untuk melihat *trend* yang terjadi. Grafik perbandingan daya listrik terhadap kedua varian sudu ditunjukkan oleh gambar 3. Sumbu y merupakan besar daya listrik yang dihasilkan, sedangkan sumbu x merupakan kecepatan angin.

Dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan oleh gambar 3 bahwa sudu dengan $\lambda = 3$ memiliki daya listrik yang jauh lebih besar dibanding sudu dengan $\lambda = 4$. Pada grafik tersebut juga terlihat kecenderungan yang positif dimana semakin besar kece-

patan angin, maka daya listrik yang dihasilkan oleh kedua jenis sudu akan lebih besar pula. Daya listrik paling besar yaitu pada sudu dengan perancangan $\lambda = 3$ ketika kecepatan angin 4,828 m/s.



Gambar 3. Grafik perbandingan daya listrik

Pada pengujian sudu dengan $\lambda = 4$ dan kecepatan angin 3,844 m/s tidak dapat menghasilkan daya listrik. Kecepatan angin tersebut masih kurang untuk memutar rotor dikarena-kan gaya dorong angin terhadap sudu yang dihasilkan terlalu kecil. Namun kelebihan sudu dengan $\lambda = 4$ adalah lebih stabil ketika diterpa angin yang kencang. Getaran yang ditimbulkan rotor juga lebih kecil jika dibanding dengan sudu $\lambda = 3$ pada kecepatan yang sama. Oleh karena itu TASH skala komersial lebih memilih memanjangkan bilah dibanding melebarkannya.

Pada pengujian prototipe dengan daya listrik maksimum yakni pada sudu dengan perancangan $\lambda = 3$ dan kecepatan angin 4,828 m/s, dihitung P_{out} , P_{in} dan juga C_p dengan menggunakan Pers. 4, Pers. 5 dan Pers. 6. Hasil yang didapat adalah P_{out} yakni 0,725 W, P_{in} yakni 9,71 W dan rasio antara keduanya atau C_p yakni 0,075. Penyebab efisiensi yang rendah antara lain dikarenakan pergerakan transmisi roda gigi yang tidak halus. Hal ini disebabkan oleh vibrasi yang berlebihan saat mencetak komponen sehingga menyebabkan filamen meluber pada awal pencetakan. Ketika kedua roda gigi bersinggungan akan menyebabkan pergerakan antar gigi tidak optimal. Selain itu pada poros yang digunakan terdapat lendutan yang mengakibatkan *unbalance* pada poros.

Kesimpulan

Hasil analisis dari pengujian prototipe skala kecil TASH tiga sudu dengan diameter 428 mm didapatkan kesimpulan bahwa semakin besar λ pada perancangan sudu, akan semakin tipis dan ramping bentuk sudu yang dihasilkan. Dengan bentuk yang ramping tentu akan menghasilkan torsi yang kecil. Sehingga sudu dengan λ tinggi memerlukan

perancangan bilah yang lebih panjang agar permukaan yang diterpa angin semakin luas. Jika panjang kedua bilah sama, maka besar daya yang dihasilkan akan lebih besar pada perancangan dengan $\lambda = 3$ dibanding $\lambda = 4$.

Konfigurasi terbaik dari penelitian yang telah dilakukan yakni pada pengujian sudu dengan $\lambda = 3$ dengan sudut serang 15° saat kecepatan angin 4,828 m/s. Daya listrik yang dihasilkan yakni 92,64 mW. Daya rotor didapatkan hasil 0,725 W, daya angin sebesar 9,71 W dan *coefficient of power* atau C_p yakni 0,075.

Referensi

- [1] A. Turyanti, S. Effendy, 2006, *Meteorologi*, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- [2] Pariwono, Manan, *Angin*. O. S. R. Ongkosongo dan Suyarso (ed.), 1991, Angin. P3O-LIPI. Jakarta.
- [3] Jansen, W.A.M, 1981, Horizontal axis fast running wind turbines for developing countries, Steering Committee Wind Energy Developing Countries. 76.
- [4] H. Hirahara, Hossain, M.Z., Kawahashi, M., Nonomura, Y., 2005, Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes, *Renewable Energy*. 30, 1279-1297.
- [5] R.A. Kishore, T. Coudron, S. Priya, 2013, Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT), *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 116, 21-31.
- [6] G. Ingram, 2011, Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method, Version 1.1, Durham University, Durham.