

Analisis Performansi Turbin Angin Poros Horizontal Model *Double Rotor Contra Rotating* dengan Posisi Rotor Saling Berhimpitan

Fredrikus M. Bere¹⁾, Verdy A. Koehuan¹⁾, Jahirwan Ut. Jasron¹⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang NTT, Indonesia
Email: verdy_koehuan@yahoo.com

Abstract

The contra rotating wind turbine is a horizontal axis turbine which has two shaft rotating in opposite directions on the same axis, and it can work at low wind speeds. In general, the performance of the wind turbine are affected by several factors, which is the aerodynamics shape of turbine, the numbers of blade and the selection angle of blade. In this study, conducted by determining the variation of angle on the blade and the blade angle used in the study is 0°, 5°, and 10°, on the two rotors with diameter of front rotor is 0.50 meters and the rear rotor is 0.30 meters, with the position of the rotor blade is coincident with each other. The purpose of this study, is to determine the effect of blade angle variation on the turbine rotation (rpm), torque (T), the power coefficient (Cp), torque coefficient (Cq) and the efficient of the turbine at any wind speeds variations. On the graph relation of blade angle on the shaft rotation, turbine rotation riding known to along with the addition of angle of the blade. The speed of wind is very affect on the output or mechanical power and power coefficient. On the blade angle 0° with wind speed at 4.03 m/s, the power can be generate is 3.013 Watt, and for blade angle 10° with wind speeds 6.08 m/s, the power can be generate is 8.217 Watt. The lowest rotation of rotor without loading is 702 rpm at the wind speeds on 4.03 m/s with angle of blade 0°, the highest rotation of rotor is 1484 rpm on the wind speeds 6.08 m/s with angle of blade 10°. From the graph of analysis data can be seen , with change of angle blade on wind turbine horizontal shaft contra rotating models, power coefficient (Cp) generated of turbine activity increases with increased of angle, with Cp maks 0.718 for angle 10°, maximum efficiency an generated reach out 71.8%.

Keywords: contra rotating, wind turbine, blade angle, power coefficient

PENDAHULUAN

Akhir-akhir ini, pemanfaatan energi angin dengan menggunakan turbin angin terus meningkat sebagai alat konversi energi yang sudah dikenal sejak dahulu. Namun seiring ditemukannya minyak bumi kecendrungan pemanfaatan energi angin untuk kehidupan manusia mulai menurun, keadaan ini berlangsung hingga terjadinya krisis energi. Dengan keadaan demikian masyarakat mulai menyadari perlunya pengembangan manfaat sumber energi nonminyak termasuk pengembangan pemanfaatan energi angin melalui turbin angin.

Secara teori, efisiensi maksimum yang bisa dicapai setiap desain turbin angin adalah 59%, artinya energi angin yang bisa diserap hanyalah 59%. Jika faktor-faktor seperti kekuatan dan durabilitas diperhitungkan, maka efisiensi sebenarnya hanya 35-45%, bahkan untuk desain terbaik. Terlebih lagi jika ditambah

efisiensi sistem wind turbin lengkap, termasuk generator, bearing, transmisi daya dan sebagainya, hanya 10-30% energi angin yang bisa dikonversikan ke listrik. Dalam sistem konversi energi angin, energi kinetik angin kemudian dikonversikan oleh suatu turbin angin untuk dijadikan energi mekanik sebagai penggerak poros dengan menggunakan rotor atau sudu sebagai penangkap angin. Kombinasi antara gaya angkat dan tarik menyebabkan rotor berputar seperti propeler dan memutar generator.

Dari berbagai pengembangan berkelanjutan untuk turbin angin model *contra rotating*, pemanfaatan turbin angin sebagai sumber energi alternatif meliputi permasalahan pada bagian rotor atau sudu yang berfungsi sebagai penangkap angin dan meneruskannya ke poros juga jenis bahan yang digunakan dalam perancangan serta efisiensi yang dicapai oleh turbin angin untuk mendapatkan energi. Energi angin bisa ditangkap dengan dua atau tiga buah

bilah, ketika angin bertiup melalui bilah atau sudu, maka akan timbul udara bertekanan rendah di bagian bawah dari sudu, tekanan udara yang rendah akan menarik sudu bergerak ke area tersebut.

Pengembangan turbin angin telah menunjukkan tingkat yang tinggi karena pembangkit listrik melalui turbin angin adalah biaya yang lebih rendah dari sumber daya energi terbarukan. Efisiensi konversi energi turbin angin biasanya ditandai dengan koefisien daya yang merupakan perbandingan antara daya mekanik turbin angin dengan daya angin.

Koefisien sebuah turbin angin *contra-rotating* dua rotor berputar berlawanan arah pada sumbu yang sama sebagai konsep baru untuk meningkatkan daya maksimum dari turbin angin. Dalam teori momentum klasik, Newman menemukan bahwa daya maksimum koefisien turbin angin memiliki dua rotor tanpa kerugian meningkat menjadi sekitar 64%. Turbin angin *contra-rotating* rotor berputar memiliki dua arah yang berlawanan pada sumbu yang sama. Dalam studi ini unsur momentum teori turbin *contra rotating* dikembangkan untuk menyelidiki efek parameter desain seperti kombinasi dari sudut lapangan, kecepatan berputar, dan jari-jari rotor pada kinerja aerodinamis dari turbin angin *contra-rotating*. Hal ini menimbulkan pandangan bahwa pengembangan turbin angin tepat untuk dikembangkan di Indonesia, karena terdapat banyak daerah yang memiliki potensi angin yang memadai.

Mengingat angin merupakan sumber energi alam yang dapat diperbaharui dalam pengembangannya, bermanfaat bagi kehidupan manusia sebagai energi alternatif untuk pembangkit listrik yang berdampak positif terhadap lingkungan. Maka dalam meningkatkan koefisien daya dan efisiensi dari turbin angin itu sendiri, perlu adanya perancangan suatu turbin angin *contra rotating* atau doble rotor poros horizontal.

KAJIAN TEORI

Turbin angin *contra rotating* rotor berputar memiliki dua arah yang berlawanan pada sumbu yang sama. Prinsip dasar kerja dari

turbin angin ini adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada rotor, lalu putaran rotor digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Umumnya, daya efektif maksimum dalam perancangan turbin angin sebesar 59,3% (Betz, 1920). Tidak lebih dari 59% energi yang dibawa oleh angin dapat diserap oleh turbin. Faktor teknik yang juga harus diperhitungkan adalah kekuatan (*strenght*) dan daya tahan (*durability*) turbin, sehingga daya efektif turbin angin terbaik 35-45%.

Hans Honneff (1932), menulis sebuah buku pada penggunaan *contra rotation*, menggunakan dua rotor satu di belakang yang lain, mendorong dua bagian dari sebuah generator listrik, konsep *contra rotating* digunakan pada pesawat terbang, dan kapal selam untuk meningkatkan efisiensi sementara menghilangkan torsi asimetris dihadapi oleh rotor konvensional. Sebuah sistem *Double-rotor* dapat digambarkan sebagai suatu sistem terdiri dari dua rotor dipisahkan oleh jarak yang sesuai.

Menurut teori Betz (1933), daya maksimum yang dapat diekstraksi dari angin adalah sekitar 59% dari yang tersedia energi angin saat kecepatan angin aksial berkurang oleh dua pertiga di disc rotor tunggal. Namun, praktis turbin angin mengkonversi kurang dari 40% dari energi angin menjadi energi listrik. Oleh karena itu, hampir 60% dari energi angin potensial tanpa dimanfaatkan. Dalam kenyataannya, energi yang terdapat di belakang rotor tunggal hampir sama besarnya dengan energi yang terdapat di depan rotor. Bagian ini energi dapat diekstraksi lanjut dengan memasang rotor kedua.

Daya angin dapat di hitung dengan menggunakan rumus :

$$P_i = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3$$

Torsi diperoleh dengan menggunakan sistem pengeremam yaitu dengan menggantungkan beban pada puli yang berputar. Untuk persamaanya adalah sebagaiberikut:

$$T = F \cdot r$$

Daya turbin merupakan *output* dari turbin angin.

$$P_m = T \cdot \omega \quad \omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

Koefisien daya (C_p) adalah perbandingan antara daya yang dibangkitkan oleh turbin angin dengan daya angin.

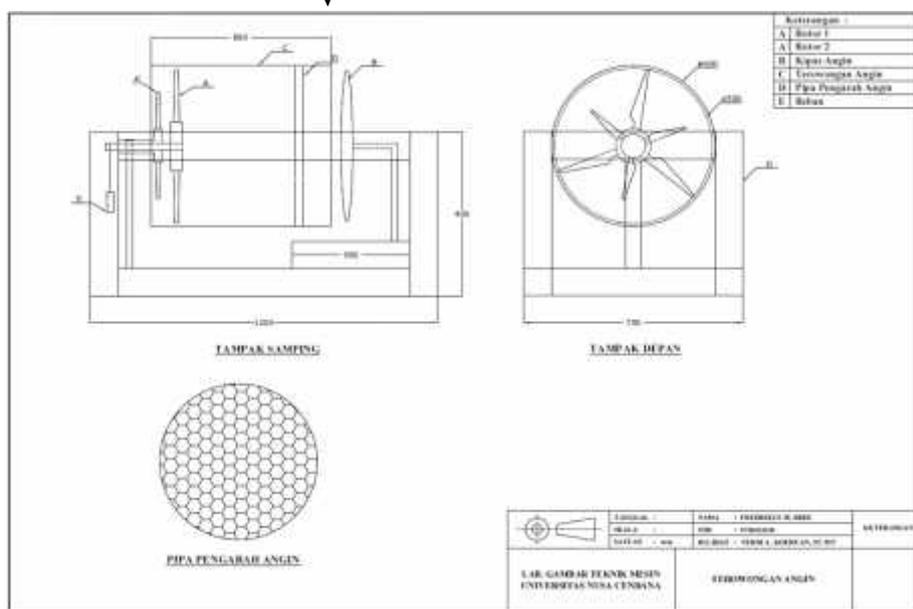
$$C_p = \frac{P_o}{P_i}$$

Koefisien torsi, $C_q = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot R}$

Ratio kecepatan ujung blade, $\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$

METODE PENELITIAN

Penelitian melalui metode eksperimen dilakukan untuk menguji rotor turbin dalam membangkitkan torsi dan daya dengan beberapa variasi sudut blade pada kondisi kecepatan angin tertentu. Sebelum pengujian, maka terlebih dahulu dilakukan pembuatan alat uji yaitu turbin angin model *Contra Rotating* (dua rotor) dengan diameter masing-masing 0,50 m dan 0,30 m, dipersiapkan juga rangkaian *wind tunnel* sederhana beserta kipas angin sebagai sumber angin untuk memutar turbin dengan melakukan pengujian turbin angin poros horizontal model *Contra Rotating*



Gambar 3.1 skema pengujian Turbin Angin Contra Rotating.

PEMBAHASAAN

Pengujian dilakukan berdasarkan karakteristik turbin dengan tiga variasi sudut blade yaitu : sudut 0°, 5°, dan 10° untuk setiap perubahan kecepatan angin.

Berdasarkan hasil rancangan pada turbin angin poros horizontal model *Contra Rotating* data awal dalam pengujian ini adalah :

- Diameter (D_k) dual rotor masing-masing 50 cm atau 0,50 m dan 30 cm atau 0,30 m
- Kecepatan angin (V) 4,03 m/s, 5,05 m/s, dan

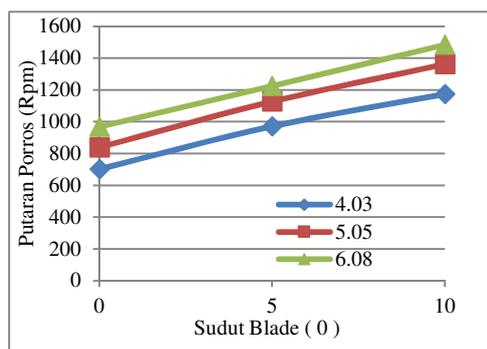
6,08 m/s

- Variasi sudut blade (β) 0°, 5°, dan 10°
- Jari-jari (R) 25 cm atau 0,25 m
- Jari-jari poros (r) 0,17 cm atau 0,017 m

Pengaruh Variasi Sudut Blade Terhadap Daya Mekanik Turbin

Pengaruh variasi sudut blade terhadap putaran poros pada Gambar 4.1 dapat dilihat besarnya hubungan antara variasi sudut blade terhadap putaran poros turbin dimana putaran poros naik sejalan dengan penambahan sudut

blade. Perubahan besar sudut pada blade rotor turbin mempengaruhi daya output dari turbin angin. Setiap penambahan sudut blade maka semakin naik putaran pada poros turbin. Pada sudut 0° untuk kecepatan angin 4,03 m/s putaran turbin sebesar 702 rpm, sedangkan untuk sudut 5° sebesar 971 rpm, untuk sudut 10° mencapai 1174 rpm dan putaran turbin pada kecepatan angin 6,08 m/s untuk setiap perubahan sudut sebesar 986 rpm, 1225 rpm dan 1484 rpm untuk sudut 10° . Penambahan besar sudut mempengaruhi gaya *lift* dan gaya *drag*. Akibat dari perubahan gaya *lift* dan *drag*, maka kecepatan putaran poros turbin angin dan torsi poros akan berubah pula. Perubahan sudut blade akan mempengaruhi putaran poros turbin karena adanya perubahan daya angin yang diterima oleh bilah yang dikonversi menjadi daya mekanik turbin.

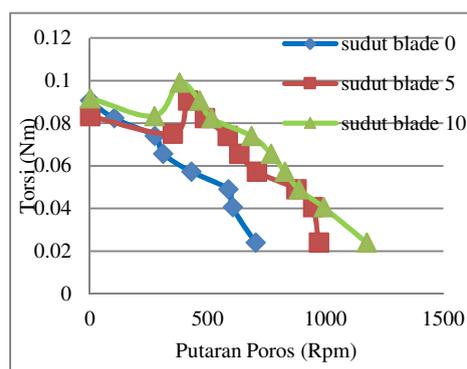


Gambar 4.1 Grafik hubungan sudut blade terhadap putaran poros.

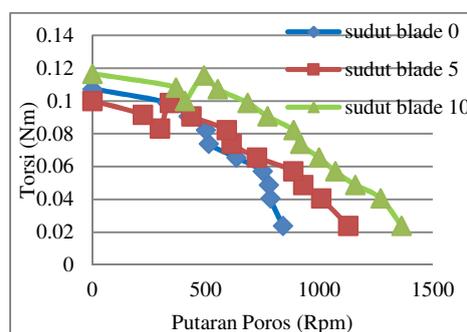
Pengaruh variasi sudut blade terhadap putaran poros dan torsi

Pada saat turbin angin berputar diberikan pembebanan sehingga terjadi pengereman berupa gesekan antara poros dan tali nilon sehingga terjadi momen puntir pada poros yang dikenal dengan torsi. Hubungan antara torsi dan pembebanan yaitu berbanding lurus artinya semakin besar beban yang diberikan pada poros maka torsi yang terjadi juga semakin besar dan sebaliknya semakin kecil pembebanan yang diberikan pada turbin maka torsinya juga semakin kecil. Setiap pembebanan yang diberikan akan mengurangi putaran poros turbin angin. Kecepatan angin berbanding lurus dengan torsi maksimum yang terjadi terhadap

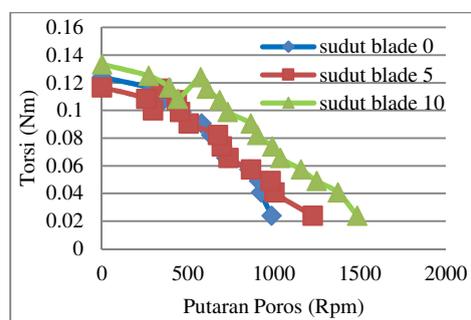
putaran poros, semakin cepat kecepatan angin maka torsi maksimum yang terjadi juga semakin besar dan terjadi di atas putaran poros kecepatan angin sebelumnya, demikian pula sebaliknya. Penambahan besar sudut blade dan kecepatan angin sangat berpengaruh terhadap torsi yang terjadi. Pada gambar 4.2 sampai 4.4 menunjukkan torsi bertambah secara linear terhadap putaran poros.



Gambar 4.2 Grafik hubungan putaran poros dan torsi untuk kecepatan angin 4,03 m/s.



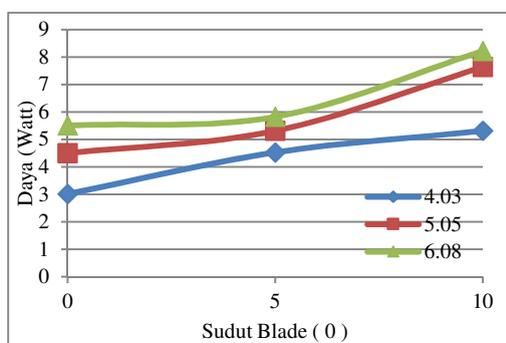
Gambar 4.3 Grafik hubungan putaran poros dan torsi untuk kecepatan angin 5,05 m/s.



Gambar 4.4 Grafik hubungan putaran poros dan torsi untuk kecepatan angin 6,08 m/s.

Semakin menurunnya kecepatan putaran poros maka torsi yang terjadi semakin bertambah. Pada posisi sudut blade 0° dengan kecepatan angin 4,03 m/s, putaran poros sebesar 702 rpm tanpa diberi beban, kemudian putaran poros berkurang seiring dengan bertambahnya beban yang diberikan, untuk pembebanan 100 gram putaran poros berkurang menjadi 605 rpm, kemudian untuk pembebanan 350 gram putaran poros 102 rpm, sedangkan pada sudut blade 5° putaran poros dengan tanpa pembebanan sebesar 971 rpm dan pada saat diberi beban 100 gram putaran poros berkurang menjadi 946 rpm, kemudian untuk pembebanan 350 rpm putaran poros menjadi 487 rpm. Dalam pengujian ini, daya turbin angin didapat dari hasil kali antara torsi dan kecepatan sudut sehingga besarnya pembebanan dan putaran poros turbin mempengaruhi daya yang dihasilkan turbin angin. Turbin yang diam tidak menghasilkan daya sama sekali demikian pula bila turbin angin tersebut berputar sangat cepat. Diantara kedua harga tersebut terdapat putaran maksimum dimana terjadi daya maksimum dari sebuah turbin angin.

Pengaruh penambahan besar sudut blade terhadap daya yang dihasilkan turbin



Gambar 4.5 Grafik hubungan penambahan besar sudut blade terhadap daya yang dihasilkan turbin.

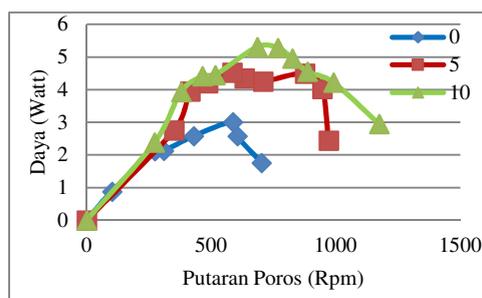
Dari hasil pengujian penambahan sudut pada blade dapat menambah torsi awal rotor turbin angin sehingga rotor menjadi lebih mudah berputar pada kecepatan angin yang rendah sekalipun. Setiap kenaikan sudut blade maka daya yang dihasilkan juga bertambah.

Gambar 4.5 menunjukkan hubungan penambahan besar sudut blade dari 0° , 5° , dan 10° terhadap daya yang dihasilkan, pada

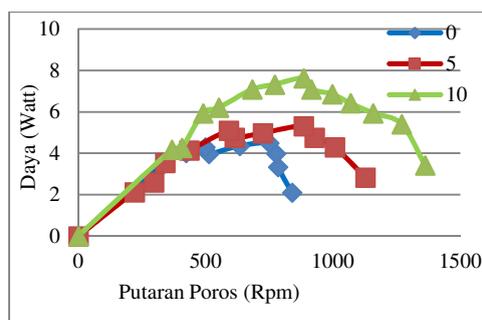
kecepatan angin 4,03 m/s, 5,05 m/s, dan 6,08 m/s. Terlihat bahwa semakin besar penambahan sudut blade dan kecepatan angin maka semakin besar daya yang dihasilkan. Untuk sudut blade 0° pada kecepatan angin 4,03 m/s daya yang dihasilkan sebesar 3,013 watt, sedangkan pada kecepatan angin 5,05 m/s sebesar 4,499 watt, dan pada kecepatan angin 6,08 m/s daya yang dihasilkan naik sebesar 5,509 watt, kenaikan daya ini seiring dengan perubahan sudut blade, dan untuk sudut blade 10° daya yang dihasilkan sebesar 8,217 watt pada kecepatan angin 6,08 m/s.

Kinerja Turbin Angin Terhadap Daya Maksimum dan Efisiensi

Hubungan kinerja turbin angin terhadap daya maksimum.



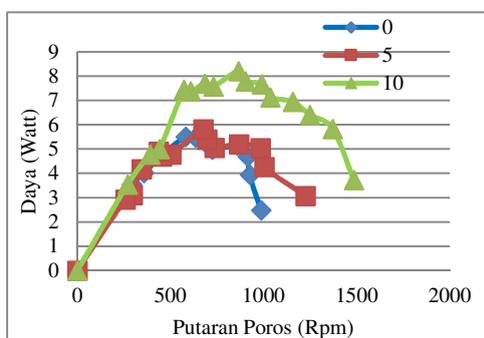
Gambar 4.6 Grafik hubungan putaran poros terhadap daya untuk kecepatan angin 4,03 m/s.



Gambar 4.7 Grafik hubungan putaran poros terhadap daya untuk kecepatan angin 5,05 m/s

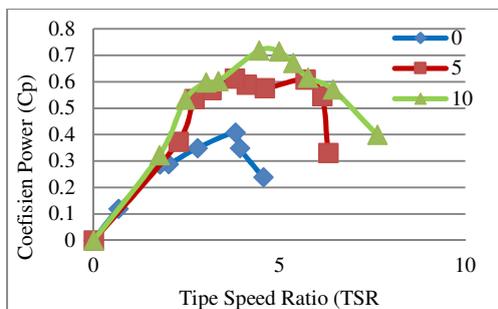
Berdasarkan Gambar 4.6 sampai 4.8, daya maksimum turbin angin diperoleh pada putaran poros optimum dari setiap kecepatan angin dan besar sudut. Sehingga grafik yang terbentuk merupakan hubungan polinomial antara daya dan putaran poros turbin angin. Gambar 4.6

sampai 4.8 untuk setiap perubahan sudut blade juga menunjukkan bahwa setiap penambahan besar sudut blade dan kenaikan kecepatan angin maka daya yang dihasilkan juga semakin besar, untuk sudut blade 0° daya maksimum yang dihasilkan sebesar 5,509 watt pada putaran poros 580 rpm, sedangkan untuk sudut blade 5° daya maksimum yang dihasilkan 5,822 watt pada putaran poros 675 rpm, sedangkan daya maksimum terbesar terjadi pada sudut blade 10° dengan kecepatan angin 6,08 m/s menghasilkan daya sebesar 8,217 watt pada putaran poros 865 rpm.



Gambar 4.8 Grafik hubungan putaran poros terhadap daya untuk kecepatan angin 6,08 m/s

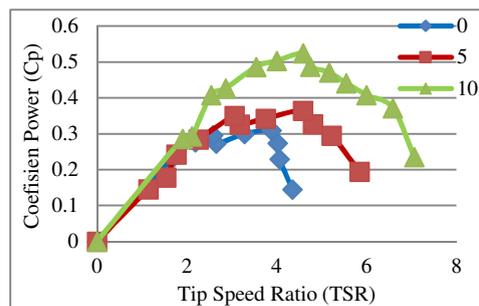
Hubungan koefisien daya (Cp) terhadap tip speed ratio (TSR).



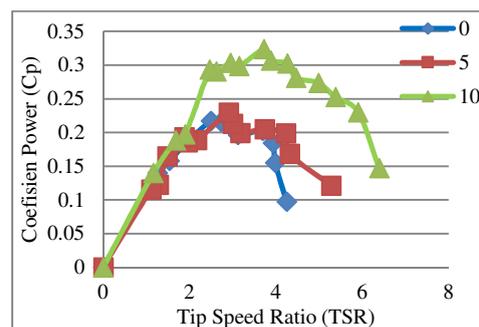
Gambar 4.9 Grafik hubungan Cp dan TSR untuk kecepatan angin 4,03 m/s.

Pada sudut blade 0° , untuk kecepatan angin 4,03 m/s koefisien daya maksimumnya 0,407 dengan TSR 3,813, untuk kecepatan angin 5,05 m/s koefisien daya maksimumnya 0,309 dengan TSR 3,883, sedangkan untuk kecepatan angin 6,08 m/s koefisien daya maksimumnya 0,217 dengan TSR 2,497. Pada

sudut blade 10° , untuk kecepatan angin 4,03 m/s koefisien daya maksimumnya 0,718 dengan TSR 4,450, untuk kecepatan angin 5,05 m/s koefisien daya maksimumnya 0,525 dengan TSR 4,588, sedangkan untuk kecepatan angin 6,08 m/s koefisien daya maksimumnya 0,324 dengan TSR 3,724.



Gambar 4.10 Grafik hubungan Cp dan TSR untuk kecepatan angin 5,05 m/s

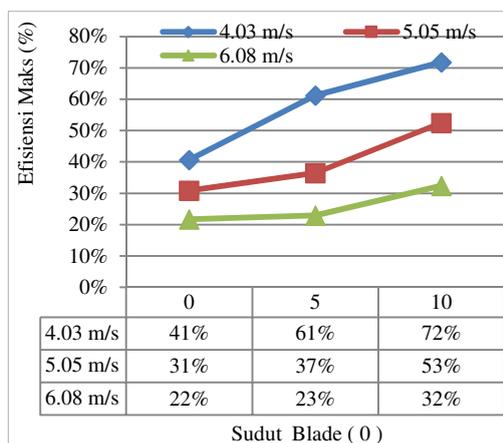


Gambar 4.11 Grafik hubungan Cp dan TSR untuk kecepatan angin 6,08 m/s

Gambar 4.9 sampai 4.11 tersebut di atas menunjukkan nilai Koefisien Daya semakin meningkat pada penambahan sudut blade tetapi nilai tersebut menurun pada penambahan kecepatan angin. Hal ini disebabkan karena koefisien daya maksimum pada kecepatan angin rendah terjadi pada TSR yang lebih tinggi sedangkan pada kecepatan angin tinggi terjadi pada TSR rendah. Artinya konversi energi angin oleh rotor turbin pada kecepatan angin rendah, lebih optimum dari pada kecepatan angin tinggi. Pada kecepatan angin rendah dengan sudut blade 10° menghasilkan koefisien daya dua kali lebih besar jika dibandingkan dengan pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Semakin besar kecepatan angin menyebabkan makin tinggi sudut serangnya yang mengakibatkan

terjadi penambahan gaya hambat dan penurunan gaya angkat yang ditunjukkan dengan turunnya torsi yang dibangkitkan.

Hubungan kinerja turbin angin terhadap efisiensi maksimum (η_{maks}).



Gambar 4.12 Grafik hubungan sudut blade terhadap koefisien power (C_p)

Efisiensi maksimum atau efisiensi teoritis, dari sebuah turbin angin adalah perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan terhadap daya input angin yang masuk turbin, idealnya untuk turbin angin rotor tunggal hanya sekitar 59% dari energi angin yang melewati turbin.

Dari data hasil pengujian dan data hasil perhitungan untuk turbin *Double* rotor ini, yang terdapat pada lampiran 1.A sampai 1.D tabel hasil perhitungan sudut blade 0° , 5° , dan 10° untuk setiap kecepatan angin, penambahan sudut pada blade mempengaruhi efisiensi maksimum atau efisiensi teoritis dari turbin angin *contra rotating*. Pada sudut blade 0° untuk kecepatan angin 4,03 m/s efisiensi sebesar 40,7%, sedangkan untuk kecepatan angin 5,05 dan 6,08 m/s efisiensi yang dihasilkan masing-masing sebesar 30,9% dan 21,7%. Pada sudut blade 5° untuk kecepatan angin 4,03 m/s sebesar 61,2%, sedangkan untuk kecepatan angin 5,05 m/s dan 6,08 m/s efisiensi yang dihasilkan masing-masing sebesar 36,5 % dan 22,9 %. Pada sudut blade 10° untuk kecepatan angin 4,03 m/s efisiensi yang dihasilkan sebesar 71,8%, sedangkan untuk kecepatan angin 5,05 m/s dan 6,08 m/s efisiensi yang dihasilkan

masing-masing sebesar 52,5% dan 32,4%.

Dengan demikian pengaruh variasi sudut pada blade 0° , 5° dan 10° dengan kecepatan angin 4,03 m/s, 5,05 m/s dan 6,08 m/s diperoleh hasil efisiensi maksimum (η_{maks}) terbesar dari turbin angin poros horizontal model *contra rotating* pada sudut blade 10° dengan kecepatan angin 4,03 m/s, efisiensi maksimum yang dihasilkan mencapai 71,8%. Nilai ini ternyata lebih tinggi dari nilai koefisien daya ideal untuk turbin rotor tunggal (59%), artinya turbin angin dengan *Double* rotor mampu mengkonversi energi lebih banyak dari pada rotor tunggal.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan, data hasil pengujian dan pembahasan perubahan sudut pada blade turbin angin poros horizontal model *Contra rotating* dengan posisi rotor blade saling berhimpitan, daya mekanik yang dihasilkan turbin meningkat. Koefisien daya (C_p) yang dihasilkan dari kerja turbin meningkat seiring dengan bertambahnya sudut blade, dengan koefisien daya maksimalnya 0,718 pada *tip speed ratio* 4,450 untuk sudut 10° . Kecepatan angin sangat berpengaruh pada *power output* atau daya mekanik, putaran rotor dan gaya pada rotor *thrust*, *Power output* terendah 7,396 watt pada kecepatan angin 4,03 m/s, *power output* tertinggi 25,397 watt pada kecepatan angin 6,08 m/s, Putaran rotor terendah dengan tanpa pembebanan 702 rpm pada kecepatan angin 4,03 m/s dengan sudut blade 0° , putaran rotor tertinggi 1484 rpm pada kecepatan angin 6,08 m/s dengan sudut blade 10° .

Kinerja atau performansi turbin angin sangat mempengaruhi daya maksimum efisiensi maksimum yang dihasilkan turbin angin poros horizontal model *Contra rotating* dimana setiap penambahan besar sudut blade efisiensi yang dihasilkan cenderung naik, pada sudut blade 0° untuk kecepatan angin 4,03 m/s efisiensi maksimum sebesar 40,7%, pada sudut blade 5° sebesar 61,2%, dan pada sudut blade 10° efisiensi maksimum yang dihasilkan meningkat menjadi 71,8%, namun akan berkurang pada saat penambahan kecepatan angin dimana pada kecepatan angin 5,05 m/s dan 6,08 m/s efisiensi yang dihasilkan berkurang menjadi 52,5% dan

32,4 % pada sudut blade yang sama, ini menunjukkan bahwa turbin angin poros horizontal model *Contra rotating* sangat baik beroperasi pada kecepatan angin rendah 4,03 m/s pada sudut blade 10^0 .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andrzej Piegat. 2005. A New Definition Of The Fuzzy Set. Faculty Of Computer Science And Information Systems Technical University Of Szczecin Ul. Żołnierska, Poland.
- [2] Chantharasenawong C., Suwantragul B. and Ruangwiset A. (2008). Axial Momentum Theory for Turbines with Co-axial Counter Rotating Rotors, *Commemorative International Conference of the Occasion of the 4th Cycle Anniversary of KMUTT Sustainable Development to Save the Earth: 11-13 December 2008, Bangkok, Thailand*
- [3] Betz A 1920 Zeitschrift für das gesamte turbinewesen 307-309.
- [4] Daryanto, Y. 2007. Kajian Potensi Angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu. Balai PPTAGG: Yogyakarta.
- [5] Denny Putra, Pratama, (2007). Euro-fuzzy, system pengendalian sudut pitch, turbin angin Teknik Fisika-FTI-ITS.
- [6] Eggleston, D. M. & Stoddard, F. S., (1987). Wind Turbine Engineering Design, *Van Nostrand Reinhold, New York*.
- [7] Hansen Morten, Larsen T., Sorensen P., (2005). Control Design for a Pitch – regulated, Variable Speed Wind Turbine, *Riso National Laboratory Denmark*.
- [8] Handayani, Sri Utami.2007. Tesis Karakteristik Daya dan Pola Aliran Turbin Angin Kecepatan Rendah dengan Winglet. UGM: Yogyakarta.
- [9] Himran, Syukri, 2006. Energi Angin, CV Bintang Lamumpatue, Makassar.
- [10] Johnson, Gary L. 2006. Wind Energy System. Manhattan : KS, 2006.
- [11] Musyafa A., A.Harika, I.M.Y.Negara, I. Robndi, Pitch Angle Control of Variable Low Rated Speed Wind Turbine Using sFuzzy Logic Control, *International Journal Of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol:10 No:05, October 2010*.
- [12] Sterzinger G., Svreck Matt, (2004). Wind Turbine Development: Location of Manufacturing Activity, *Renewable Energy Policy Project. Department of Energy US*.
- [13] Ushiyama, I., Shimota, T. and Miura, Y. (1996), An Experimental Study of the Two-staged Wind Turbines, *Renewable Energy*, 9, (1-4), pp. 909-912.
- [14] www.mst.gadjamada.edu/dl/Kincir_Angin.pdf (02 Maret 2013, pukul 18:29).
- [15] <http://www.scribd.com/doc/21369754/Teori-Momentum-Untuk-Turbin-Angin-Ideal> (14 Maret 2013, Pukul 16:37)