

Studi Eksperimental Variasi Sudut Blade terhadap Kinerja Rotor Blade Turbin Angin Tipe Propeler Poros Horizontal Model *Contra Rotating*

⁽¹⁾ Verdy A. Koehuan, ⁽²⁾ Laurensius Nogur, ⁽³⁾ Jahirwan Ut Jasron
^{1,2,3)} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang NTT
Email: verdy_koehuan@yahoo.com

Abstrak

Turbin Angin *Contra Rotating* merupakan turbin sumbu horizontal memiliki dua poros yang berputar berlawanan arah pada sumbu yang sama saling memberi dan menerima daya sehingga dapat beroperasi dengan baik pada kecepatan angin rendah. Dalam penelitian ini dilakukan dengan menentukan variasi pada sudut blade, yaitu masing-masing sudut 0° , 5° , dan 10° pada dua rotor dengan diameter masing-masing 0,50 m dan 0,30 m dengan posisi rotor blade saling berseberangan. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh dari variasi sudut blade terhadap putaran turbin (rpm), Torsi (T) dan Koefisien Daya (Cp) serta Efisiensi turbin pada setiap variasi kecepatan angin. Kecepatan angin sangat berpengaruh pada daya *output* atau daya mekanik, putaran rotor dan pembebanan pada rotor, daya *output* terendah 7,396 watt pada kecepatan angin 4,03 m/s, daya *output* tertinggi 25,397 watt pada kecepatan angin 6,08 m/s, putaran rotor terendah dengan tanpa pembebanan 727 rpm pada kecepatan angin 4,03 m/s dengan sudut blade 0° , putaran rotor tertinggi 1153 rpm pada kecepatan angin 6,08 m/s dengan sudut blade 10° . Pembebanan pada rotor terendah 450 g pada kecepatan angin 4,03 m/s dengan sudut 0° , pembebanan pada rotor tertinggi 750 g pada kecepatan angin 6,08 m/s dengan sudut blade 10° . Dengan adanya perubahan sudut pada blade turbin angin poros horizontal model *Contra Rotating*, koefisien daya (Cp) yang dihasilkan dari kerja turbin meningkat seiring dengan bertambahnya sudut, Dengan $C_{p_{maks}} = 0,701$ pada $TSR = 4.275$ untuk sudut 10° .

Kata kunci: Turbin angin *Contra rotating*, Variasi sudut blade, Koefisien daya

Abstract

*Contra Rotating wind turbine is a horizontal axis turbine has two rotors rotating in opposite directions on the same axis giving and receiving power so that it can operate well at low wind speeds. In this study carried out by determining the variation in the angle of the blade, i.e. each angle of 0° , 5° , and 10° on the two rotors with a diameter of 0.50 m, respectively, and 0.30 m at a position opposing the rotor blade. The purpose of this study was to determine the effect of the variation of the rotation angle blade turbine (rpm), torque (T) and power coefficient (Cp) and the efficiency of the turbine at any wind speed variations. Wind speed influence on the output power or mechanical power, rotation of the rotor and the rotor thrust force, the lowest output power 7.396 watts at wind speed of 4.03 m/s, the highest Daya output of 25.397 watts at wind speeds of 6.08 m/s, Round lowest rotor to 727 rpm with no load on the wind speed of 4.03 m/s at an angle of 0° blade, rotor rotation 1153 rpm at the highest wind speed of 6.08 m/s at an angle blade 10° . Rotor thrust 450 g at the lowest wind speed of 4.03 m/s at an angle of 0° , the highest 750 g rotor thrust on wind speed of 6.08 m/s at an angle of blade 10° . The change in the angle of the wind turbine blade shaft *Contra rotating horizontal models*, the power coefficient (Cp) generated from the turbine work increases with the angle with $C_{p_{maks}} 0,701$ at $TSR 4.275$ for 10° angle.*

Keywords: *Contra Rotating Wind Turbine, Blade Angle Variation, Coefficient of Power*

PENDAHULUAN

Sistem pembangkit daya listrik dengan turbin angin sebagai penggerak alternator, telah mengalami perkembangan yang sangat pesat dari tahun ke tahun dan menunjukkan suatu kemajuan yang sangat positif dimana daya

terpasang terus ditingkatkan sementara biaya per kWh terus mengalami penurunan, Gates Robert, 2003. Jenis turbin angin dengan daya terpasang yang cukup besar yang telah banyak dipasang di berbagai belahan bumi adalah tipe turbin propeler tiga blade. Penelitian-penelitian tentang model dan geometri *blade* rotor turbin

angin ini, meliputi profil airfoil baru pun sangat gencar dilakukan oleh para peneliti untuk meningkatkan efisiensi aerodinamika rotor, sehingga dapat memaksimalkan daya yang dibangkitkan oleh turbin. Namun kendala utama dalam proses konversi energi angin dengan menggunakan turbin angin tipe propeler tiga blade sebagai pembangkit daya listrik adalah karakteristik blade rotor turbin angin yang kurang optimal terhadap perubahan kecepatan angin yang ekstrim. Rotor blade turbin angin secara aerodinamika harus menunjukkan efisiensi yang optimum untuk memaksimalkan daya mekanis yang dapat dikonversi dari energi kinetik aliran udara bebas yang melewati rotor menjadi energi mekanik, Ahlund Karin, 2004.

Sejak diperkenalkan pada tahun 1933, teori Betz untuk turbin angin jenis poros horisontal tipe propeler telah menjadi dasar dalam sejarah pengembangan turbin angin tiga blade dengan rotor tunggal. Teori ini menerapkan asumsi kondisi ideal pada aliran udara melalui suatu rotor sebagai disk yang berputar yang analisisnya terdiri dari penerapan persamaan momentum aksial dan persamaan kontinuitas massa, serta teori blade elemen momentum yang secara ideal menunjukkan bahwa daya angin yang dapat dikonversi menjadi daya mekanik yang didefinisikan sebagai koefisien daya atau C_p adalah sebesar 59,3 %. Dimana koefisien daya ini merupakan fungsi kecepatan aliran saat masuk rotor, $V = (2/3)V_a$ dan meninggalkan rotor, $V = (1/3)V_a$, dimana V_a adalah kecepatan udara bebas. Turbin angin rotor tunggal dengan diameter rotor berukuran besar menghasilkan daya output yang tinggi dalam kondisi kecepatan angin cukup kuat. Daya output dari rotor turbin angin yang berukuran kecil relatif rendah dan cocok untuk kondisi angin lemah. Artinya, ukuran rotor turbin angin harus tepat dipilih sesuai dengan kondisi angin potensial, Sterzinger G., 2004. Selain itu, pada umumnya turbin angin dilengkapi dengan mekanisme kontrol *pitch*, untuk mengontrol kecepatan akibat rotasi abnormal dan overload dihasilkan pada angin kuat, dan untuk menjaga perputaran alternator dan daya output tetap konstan, Hansen Morten, 2005. Turbin angin untuk pembangkit daya listrik skala besar selalu

dirancang pada kecepatan angin rata-rata 10 m/s hingga 12 m/s, Eggleston D., 1987, artinya operasional turbin tidak akan efisien pada kecepatan angin rendah. Selain itu, turbin angin rotor tunggal dengan daya besar, diameter rotornya juga besar, sehingga turbin akan membutuhkan torsi awal yang besar pula untuk bisa berputar.

Dalam waktu beberapa tahun terakhir, beberapa peneliti berhasil menyajikan penemuan yang menarik tentang suatu model pintar turbin angin tipe propeler tiga blade, yang dikenal dengan nama turbin angin dual rotor lawan arah (*double rotor contra rotating wind turbine*) yang dapat meningkatkan koefisien daya turbin angin lebih tinggi dari pada kondisi satu rotor yakni 59,3 %. Turbin angin pintar ini terdiri dari dua buah rotor yang diameternya berbeda, sama-sama menggerakkan satu alternator dengan arah putaran dari kedua rotor ini saling berlawanan arah. Rotor berukuran besar ditempatkan di depan, sedangkan yang berukuran kecil di belakangnya atau sebaliknya, kecepatan rotasi dari kedua rotor ini cukup sinkron bekerja sama dan saling suport untuk menggerakkan alternator. Peningkatan kecepatan angin membuat kecepatan rotasi kedua rotor meningkat, dan kecepatan rotasi dari rotor belakang menjadi lebih cepat dibandingkan dengan rotor depan karena ukurannya yang kecil. Bagian belakang rotor akan mencapai kecepatan rotasi maksimum pada kondisi kecepatan angin rancangan. Dengan lebih meningkatnya kecepatan angin, rotor belakang berkurang kecepatannya secara bertahap dan mulai berputar pada arah yang sama dari rotor depan sehingga bertepatan dengan torsi yang lebih besar diterima oleh alternator, Wei Yuan, 2013.

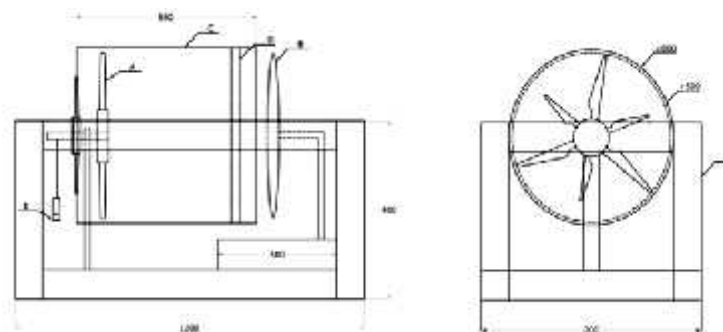
Ide pembuatan jenis turbin ini diadopsi dari teori Curtis untuk turbin uap multi tingkat melalui prinsip tingkat kecepatannya dimana energi terkonversi sepanjang tingkat rotor hingga mencapai 75%. Kari Appa, 2003, menerapkan prinsip ini, melalui eksperimennya pada turbin angin *double rotor contra rotating* menunjukkan peningkatan daya output hingga 40 % pada kecepatan angin rendah dan hingga 50 % pada kecepatan angin lebih tinggi. Newman, 1983 melalui teori aktuatur disknya

untuk menganalisa daya yang dikonversi pada dua buah rotor yang dipasang secara seri melalui asumsi rotor sebagai disk yang berputar. Kondisi koefisien daya maksimum dicapai pada kecepatan aliran masuk rotor pertama $0,8V_a$ dan $0,4V_a$ pada rotor kedua. Ushiyama et al., 1996, melakukan pengujian pada dua rotor turbin dengan prinsip contra rotating, rotor pertama berdiameter 0,6 m dan rotor kedua diameternya 1,2 m, berhasil melaporkan adanya peningkatan koefisien daya turbin dan torsi awal yang rendah. Jung et al., 2004, melaporkan hasil penelitiannya menunjukkan perbandingan diameter rotor utama dan rotor kedaunya adalah 1:2 untuk memperoleh peningkatan daya output sebesar 21 % ($C_p = 0,5$). Chantharasenawong C., 2008, dengan menerapkan teori momentum aksial pada turbin angin *dual rotor contra rotating*, asumsi pada kondisi ideal dan rotor bagian depan luasannya 58 % atau 76,2 % diameter dari rotor bagian belakang, melalui persamaan kekekalan massa diperoleh koefisien daya maksimum 0,814 dimana nilai ini lebih tinggi dari teori Betz limit untuk turbin angin rotor tunggal, yaitu 0,59. Studi secara eksperimen dilakukan oleh Shane Merchant, menguji beberapa model blade yang didesain untuk *double rotor contra rotating* menunjukkan peningkatan daya maksimum 101,4 % pada kecepatan angin 25 mph (variasi 15 mph – 40 mph). P. Santhana Kumar, melakukan variasi jarak rotor depan dan rotor belakang (rasio diameter 1:2) untuk optimasi daya terkonversi,

diperoleh pada jarak 0,65d (d adalah diameter rotor depan) peningkatan daya maksimum 9,67 %, jarak 0,5d daya maksimum 0,98 % sedangkan pada jarak 0,75d daya maksimum hanya 7,8 %. Telah diketahui bersama bahwa angin merupakan sumber energi alam yang dapat diperbaharui dan sangat bermanfaat bagi kehidupan manusia. Dalam rangka pengembangan pemanfaatan sumber energi angin sebagai pembangkit listrik sehingga perlu meningkatkan koefisien dan efisiensi dari turbin angin itu sendiri, dan untuk meningkatkan maka perlu untuk mengetahui kinerja atau performansi dari turbin angin dengan sudu profil *doble* rotor atau *Contra Rotating*

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 1. Skema pengujian Turbin Angin Contra Rotating.

Analisa data

- Daya angin dapat di hitung dengan menggunakan rumus :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot A \cdot V^2 \quad (1)$$

$$A = R^2 \quad (2)$$

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

$$T = F \cdot r \quad (3)$$

$$F = m \cdot g \quad (4)$$

- Daya turbin merupakan *output* dari turbin angin.

$$P_0 = T \cdot \quad (5)$$

$$= \frac{2 \cdot n}{60} \quad (6)$$

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

$$C_p = \frac{P_m}{P_i} \quad (7)$$

- Koefisien torsi:

$$C_q = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot A \cdot R} \quad (8)$$

- *Ratio* kecepatan ujung blade

$$= \frac{R \cdot \omega}{V} \quad (9)$$

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:

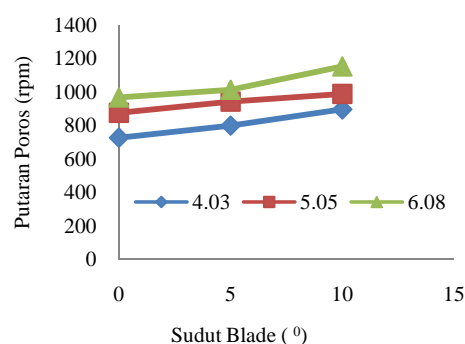
- Diameter (D_k) dual rotor masing-masing: 50 cm = 0,50 m dan 30 cm = 0,30 m
- Kecepatan angin (V) = 4,03 m/s, 5,05 m/s, dan 6,08 m/s
- Variasi sudut blade (θ) = 0° , 5° , dan 10°
- Jari-jari (R) = 25 cm = 0,25 m
- Jari-jari puli (r) = 0,17 cm = 0,017 m

Pengaruh variasi sudut blade terhadap daya mekanik turbin

Pengaruh variasi sudut blade terhadap putaran poros

Pada Gambar 2 dapat dilihat besarnya hubungan antara variasi sudut blade terhadap

putaran poros turbin dimana putaran poros cenderung 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 727 rpm, sedangkan untuk sudut 5° sebesar 799 rpm, untuk sudut 10° mencapai 896 rpm dan putaran turbin pada kecepatan angin 6,08 m/s untuk setiap perubahan sudut sebesar 998 rpm, 1031 rpm dan 1153 rpm untuk sudut 10° .



Gambar 2. Grafik hubungan sudut blade terhadap putaran poros.

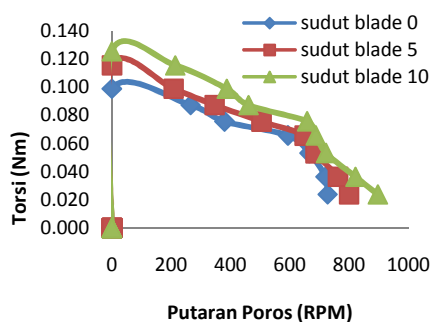
Penambahan besar sudut blade mempengaruhi peningkatan sudut serang yang secara teori dapat meningkatkan gaya lift. Akibat dari peningkatan gaya lift, maka kecepatan putaran poros turbin angin dan torsi poros akan naik pula. Perubahan sudut blade akan mempengaruhi putaran poros turbin karena adanya perubahan daya angin yang diterima oleh bilah yang dikonversi menjadi daya mekanik turbin. Dari tabel data pada hasil pengujian menunjukkan perubahan putaran poros akibat penambahan sudut blade pada keadaan tanpa pembebanan dimana putaran rotor naik.

Pengaruh variasi sudut blade terhadap putaran poros dan torsi

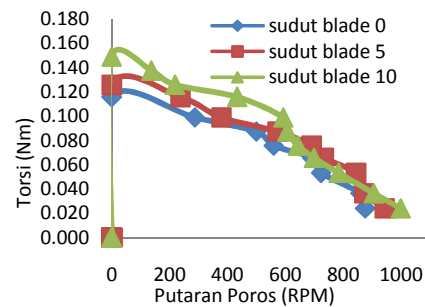
Pada saat turbin angin berputar diberikan pembebanan sehingga terjadi pengereman berupa gesekan antara puli dan tali nilon sehingga terjadi momen puntir pada poros yang dikenal dengan Torsi. Hubungan antara torsi

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 diatas putaran poros kecepatan angin sebelumnya, demikian pula sebaliknya.

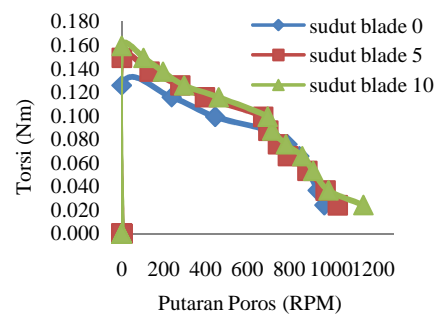
Penambahan besar sudut blade dan kecepatan angin sangat berpengaruh terhadap torsi yang terjadi. Torsi maksimum terjadi pada besar sudut blade 100 dengan kecepatan angin 4,03 m/s sebesar 0,075. Pada grafik Gambar 3 sampai 5 menunjukkan torsi berkurang terhadap bertambahnya putaran poros. Semakin cepat putaran poros maka torsi yang terjadi juga semakin rendah. Pada posisi sudut blade 0° dengan kecepatan angin 4,03 m/s, putaran poros sebesar 727 rpm tanpa diberi beban, kemudian putaran poros berkurang seiring dengan bertambahnya beban yang diberikan, untuk pembebanan 75 gram putaran poros berkurang menjadi 719 rpm, kemudian untuk pembebanan 380 gram putaran poros 265 rpm, sedangkan pada sudut blade 5° putaran poros dengan tanpa pembebanan sebesar 799 rpm dan pada saat diberi beban 75 gram putaran poros berkurang menjadi 762 rpm, kemudian untuk pembebanan 380 rpm putaran poros menjadi 346 rpm.



Gambar 3. Grafik hubungan putaran poros terhadap torsi untuk kecepatan angin 4,03 m/s



Gambar 4. Grafik hubungan putaran poros terhadap torsi untuk kecepatan angin 5,05 m/s



Gambar 5. Grafik hubungan putaran poros terhadap torsi untuk kecepatan angin 6,08 m/s

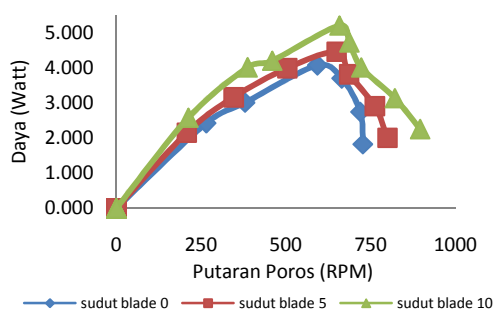
Dalam pengujian ini, daya turbin angin didapat dari hasil kali antara torsi dan kecepatan sudut sehingga besarnya pembebanan dan putaran poros turbin mempengaruhi daya yang dihasilkan turbin angin. Turbin yang diam tidak menghasilkan daya sama sekali demikian pula bila turbin angin tersebut berputar 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

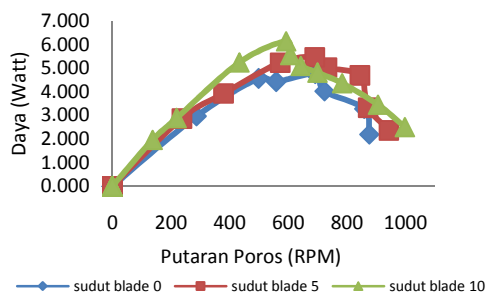
Dari hasil pengujian penambahan sudut pada blade dapat menambah torsi awal rotor turbin angin sehingga rotor menjadi lebih mudah berputar pada kecepatan angin yang rendah sekalipun. Kenaikan sudut blade maka daya yang dihasilkan juga bertambah.

Gambar 6 sampai 8 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

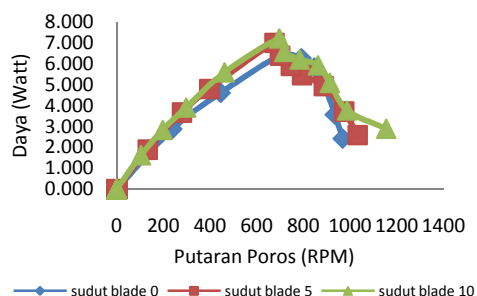
penambahan sudut blade dan kecepatan angin maka semakin besar daya yang dihasilkan. Untuk sudut blade 0° pada kecepatan angin 4,03 m/s daya yang dihasilkan sebesar 4,048 watt, sedangkan pada kecepatan angin 5,05 m/s sebesar 4,724 watt, dan pada kecepatan angin 6,08 m/s daya yang dihasilkan naik sebesar 6,350 watt, kenaikan daya ini cenderung naik seiring dengan perubahan sudut blade, dan untuk sudut blade 10° daya yang dihasilkan sebesar 7,183 watt pada kecepatan angin 6,08 m/s.



Gambar 6. Grafik hubungan putaran poros terhadap daya untuk kecepatan angin 4,03 m/s



Gambar 7. Grafik hubungan putaran poros terhadap daya untuk kecepatan angin 5,05 m/s



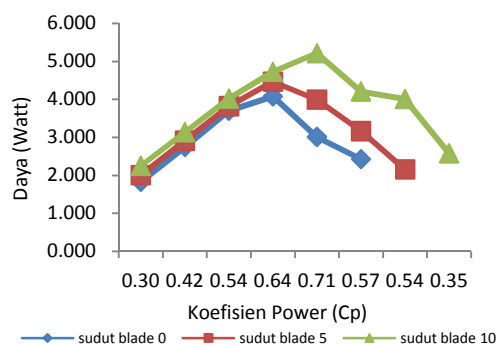
Gambar 8. Grafik hubungan putaran poros terhadap daya untuk kecepatan angin 6,08 m/s

Kinerja Turbin Angin Terhadap Daya Maksimum dan Efisiensi

Berdasarkan hasil pengujian kinerja dari turbin angin poros horizontal model *contra rotating*, dan melakukan perhitungan dengan beberapa data yang telah diambil pada saat pengujian. Data-data yang dijadikan acuan adalah putaran poros (rpm), besarnya pembebanan (gr) pada poros dengan variasi sudut blade (0° , 5° , 10°), dan kecepatan angin yang berbeda (4,03 m/s, 5,05 m/s). Dari data tersebut maka dapat dibahas hubungan antara variasi sudut blade terhadap daya maksimum serta efisiensi yang dihasilkan turbin.

Hubungan Koefisien Power terhadap Daya yang dihasilkan

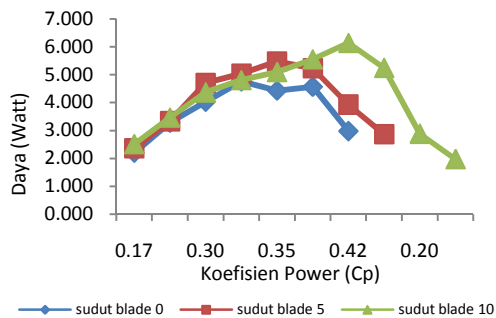
Hubungan antara kinerja terhadap daya maksimum untuk tiga variasi sudut blade turbin angin poros horizontal model *contra rotating* (0° , 5° , 10°), untuk berbagai kecepatan angin (4,03 m/s, 5,05 m/s, dan 6,08 m/s) dapat dilihat pada Gambar 9 sampai 11, data yang dijadikan acuan adalah nilai koefisien Power (C_p) terhadap Daya (Watt) yang dihasilkan turbin. Berdasarkan Gambar 9 sampai 11, daya maksimum turbin angin diperoleh pada putaran poros dibawah maksimal dari setiap kecepatan angin dan besar sudut. Sehingga grafik yang terbentuk merupakan hubungan polinomial antara daya dan putaran poros turbin angin.



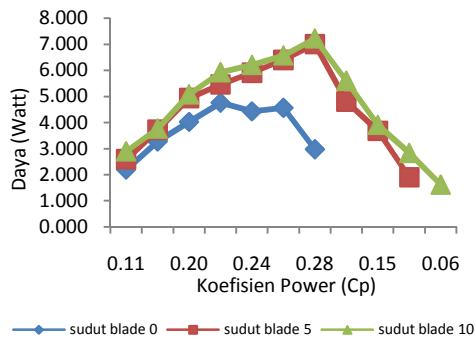
Gambar 9. Hubungan Koefisien power terhadap Daya yang dihasilkan turbin untuk kecepatan angin 4,03 m/s

Gambar 9 sampai 11 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 6,35 watt pada nilai Koefisien Power (Cp) 0,250, sedangkan untuk sudut blade 5° daya maksimum yang dihasilkan 6,96 watt pada nilai Koefisien Power (Cp) 0,274, sedangkan daya maksimum terbesar terjadi pada sudut blade 10° dengan kecepatan angin 6,08 m/s menghasilkan daya sebesar 7,183 watt pada nilai Koefisien Power (Cp) 0,283.



Gambar 10. Hubungan Koefisien power terhadap Daya yang dihasilkan turbin untuk kecepatan angin 5,05 m/s

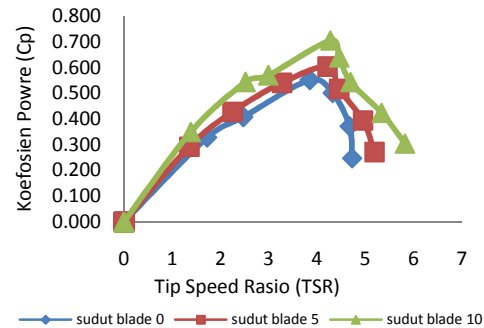


Gambar 11. Hubungan Koefisien power terhadap Daya yang dihasilkan turbin untuk kecepatan angin 6,08 m/s

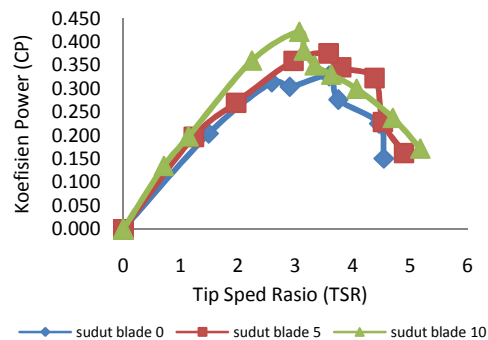
Hubungan Tip Speed Rasio (TSR) terhadap Koefisien Daya (Cp)

Energi kinetik yang dimiliki angin tidak seluruhnya dapat dikonversikan menjadi daya turbin angin. Dengan demikian terjadi kerugian daya dan perbandingan antara daya yang dihasilkan dengan daya yang dimiliki angin yang disebut koefisien daya (Cp). *Tip speed ratio (TSR)* adalah perbandingan antara kecepatan linier rotor turbin angin dengan kecepatan angin. Hubungan antara Koefisien Daya (CP) dan *tip speed ratio* dapat dilihat

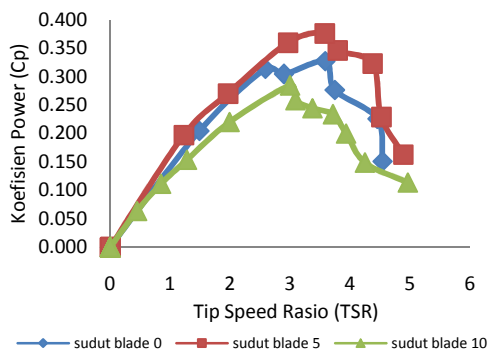
pada Gambar 12 sampai 14.



Gambar 12. Grafik hubungan TSR terhadap Cp untuk kecepatan angin 4,03 m/s



Gambar 13. Grafik hubungan TSR terhadap Cp untuk kecepatan angin 5,05 m/s



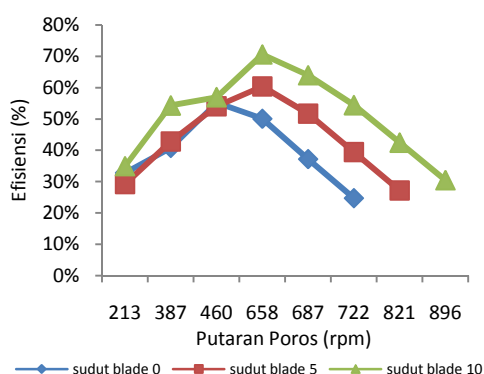
Gambar 14. Grafik hubungan TSR terhadap Cp untuk kecepatan angin 6,08 m/s

Gambar 12 sampai 14 menunjukkan nilai Koefisien Daya semakin meningkat pada penambahan sudut blade tetapi nilai tersebut menurun pada penambahan kecepatan angin. Untuk sudut blade 0° Koefisien Daya yang dihasilkan sebesar 0,547 pada kecepatan angin 4,03 m/s, sedangkan untuk sudut blade 5°

sebesar 0,599 pada kecepatan angin 4,03 m/s, kemudian nilai Koefisien Daya berkurang seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, tetapi akan naik bila penambahan besar sudut blade bertambah. Hal ini disebabkan karena daya potensial angin merupakan bentuk pangkat tiga dari kecepatan angin sehingga nilai Koefisien Daya pada kecepatan angin 4,03 m/s lebih besar dari nilai Koefisien Daya pada kecepatan angin 5,05 m/s dan 6,08 m/s. Nilai Koefisien Daya (C_p) maksimal terjadi pada sudut blade 10^0 dan kecepatan angin 4,03 m/s Koefisien Daya (C_p) yang dihasilkan mencapai 0,71.

Hubungan putaran poros turbin angin terhadap efisiensi ()

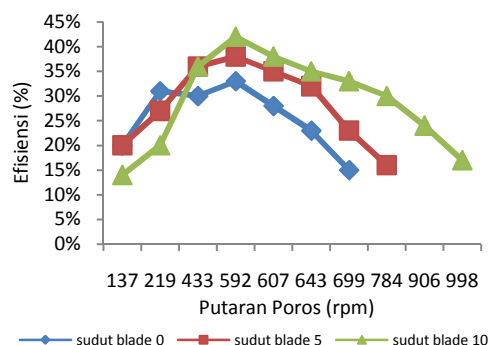
Efisiensi maksimum atau efisiensi teoritis, dari sebuah turbin angin adalah perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan terhadap daya input angin yang masuk turbin, secara ideal untuk turbin angin rotor tunggal hanya sekitar 59 % dari energi angin yang melewati turbin.



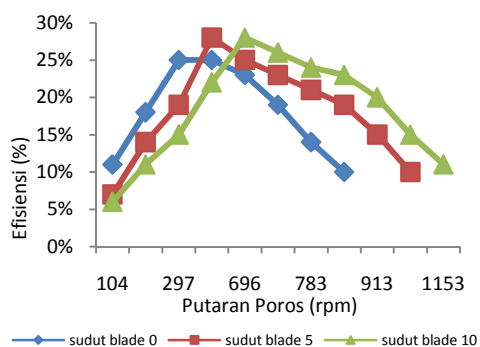
Gambar 15. Hubungan putaran poros terhadap efisiensi () untuk kecepatan angin 4,03 m/s

Pada Gambar 15 sampai 17 menunjukkan penambahan besar sudut pada blade mempengaruhi efisiensi maksimum atau efisiensi teoritis dari turbin angin contra rotating. Pada sudut blade 0^0 untuk kecepatan angin 4,03 m/s efisiensi maksimum sebesar 55%, sedangkan untuk kecepatan angin 5,05 dan 6,08 m/s efisiensi yang dihasilkan masing-masing sebesar 33% dan 25%. Pada sudut blade 5^0 untuk kecepatan angin 4,03 m/s sebesar 60%, sedangkan untuk kecepatan angin

5,05 m/s dan 6,08 m/s efisiensi yang dihasilkan masing-masing sebesar 37% dan 27%. Pada sudut blade 10^0 untuk kecepatan angin 4,03 m/s efisiensi yang dihasilkan sebesar 70%, sedangkan untuk kecepatan angin 5,05 m/s dan 6,08 m/s efisiensi yang dihasilkan masing-masing sebesar 42% dan 28%.



Gambar 16. Hubungan putaran poros terhadap efisiensi () untuk kecepatan angin 5,05 m/s



Gambar 17. Hubungan putaran poros terhadap efisiensi () untuk kecepatan angin 6,08 m/s

Dengan demikian pengaruh variasi sudut pada blade 0^0 , 5^0 dan 10^0 dengan berbagai kecepatan angin 4,03 m/s, 5,05 m/s, dan 6,08 m/s mendapatkan hasil Efisiensi () terbesar dari turbin angin poros horizontal model *contra rotating* terjadi pada sudut blade 10^0 dengan kecepatan angin 4,03 m/s efisiensi maksimum yang dihasilkan mencapai 70%. Nilai ini ternyata lebih tinggi dari nilai koefisien daya ideal untuk turbin rotor tunggal (59 %), artinya turbin angin dengan dual rotor mampu mengkonversi energi lebih banyak dari pada rotor tunggal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari data hasil pengujian dan data hasil perhitungan pengaruh variasi sudut blade terhadap daya mekanik dan efisiensi pada turbin angin poros horizontal model *contra rotating*, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Perubahan sudut pada blade turbin angin poros horizontal model *contra rotating* dengan posisi rotor blade saling berseberangan, daya mekanik yang dihasilkan turbin meningkat. Koefisien daya (C_p) yang dihasilkan dari kerja turbin meningkat seiring dengan bertambahnya sudut blade, dengan $C_{p_{maks}} = 0.701$ pada TSR 4.275 untuk sudut 10^0 . Kecepatan angin sangat berpengaruh pada Daya *output* atau daya mekanik, putaran rotor dan pembebanan pada rotor, Daya *output* terendah 7,396 watt pada kecepatan angin 4,03 m/s, Daya *output* tertinggi 25,397 watt pada kecepatan angin 6,08 m/s, Putaran rotor terendah dengan tanpa pembebanan 727 rpm pada kecepatan angin 4,03 m/s dengan sudut blade 0^0 , putaran rotor tertinggi 1153 rpm pada kecepatan angin 6,08 m/s dengan sudut blade 10^0 .
- Kinerja atau performansi turbin angin dengan variasi sudut blade sangat mempengaruhi daya maksimum dan efisiensi maksimum yang dihasilkan turbin angin poros horizontal model *contra rotating* dimana penambahan besar sudut blade maka efisiensi yang dihasilkan bertambah, pada sudut blade 0^0 untuk kecepatan angin 4,03 m/s efisiensi maksimum sebesar 54,7%, pada sudut blade 5^0 sebesar 59,9%, dan pada sudut blade 5^0 efisiensi maksimum yang dihasilkan meningkat menjadi 70,1%, 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 32,5% dan 25 % 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 .

Saran

- Bagi ilmu pengetahuan dan teknologi dalam memanfaatkan energi terbarukan yang tersedia dengan mudah dan lebih ramah lingkungan, maka penulis menyarankan agar adanya pengembangan dan penelitian lebih lanjut pada turbin angin poros horizontal model *contra rotating*.
- Bagi peneliti berikutnya, pada pembuatan dan perancangan turbin angin poros horizontal model *contra rotating* agar merancang sedetail mungkin terutama memperhatikan mekanisme sistem transmisi hal ini berguna untuk mengurangi adanya kehilangan daya agar koefisien daya dan efisiensi yang dihasilkan lebih besar.
- Dengan melihat hasil dari penelitian ini maka diharapkan bagi peneliti berikutnya dapat merancang turbin angin model *contra rotating* dalam skala besar agar mampu menghasilkan energi yang besar dan dapat diterapkan pada masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahlund Karin, (2004). **Investigation of the NREL NASA/Ames Wind Turbine Aerodynamics Database**, *Aeronautics, FFA SE-172 90* Stockholm.
- [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: Technologies and Strategies Vision 2050: (SDSE2008) 11-13 December 2008, Bangkok, Thailand*
- [3] Eggleston, D. M. & Stoddard, F. S., (1987). **Wind Turbine Engineering Design**, *Van Nostrand Reinhold, New York*.
- [4] Gates Robert, (2003). **The Economics of Wind and the Impact of Technological Advances in Megawatt Class Turbines**, *California Wind Energy Collaborative Forum Davis*.

- [5] Hansen Morten, Larsen T., Sorensen P., (2005). **Control Design for a Pitch – regulated, Variable Speed Wind Turbine**, *Riso National Laboratory Denmark*.
- [6] Jung, S. N., No, T. S., and Ryu, K. W. (2004) Aerodynamics Performance Prediction of a 30 kW Counter-rotating Wind Turbine System, *Renewable Energy*, **30**, pp. 631-644.
- [7] Kari Appa, (2003). **Counter Rotating Wind Turbine System**, *Energy Innovations Small Grant (EISG) Program, California Energy Commission, July 2003 P500-03-055F*
- [8] Newman, B. G. (1983) Actuator-Disc Theory for Vertical-axis Wind Turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **15**, pp. 347-355.
- [9] P. Santhana Kumar, A. Abraham, (2013). **Computational and Experimental Analysis of a Couter Rotating Wind Turbine System**, *Journal of Scientific and Industrial Research, Vol. 72, May 2013, pp. 300-306*
- [10] Priyono Sutikno, Deny B. Saepudin, (2012). **Design and Blade Optimization of Contra Rotation Double Rotor Wind Turbine**, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol: 11 No: 01, 16-25*
- [11] Seungmin Lee, Hogeon Kim, Soogab Lee, (2010). **Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine**, *Current Applied Physics 10, S339–S342*
- [12] Shane Merchant, Jason Gregg, (2009). **Wind Tunnel Analysis Of A Counter-Rotating Wind Turbine**, *Proceedings of the 2009 ASEE Gulf-Southwest Annual Conference Baylor University, Copyright © 2009, American Society for Engineering Education*
- [13] Shen, W. Z. , Zakkam, V. A. K. , Sorensen, J. N. and Appa, K. (2007) Analysis of Counter-Rotating Wind Turbines, The Science of Making Torque from Wind, *Journal of Physics: Conference Series 75 (2007)012003*, 9 pages.
- [14] Sterzinger G., Svreck Matt, (2004). **Wind Turbine Development: Location of Manufacturing Activity**, *Renewable Energy Policy Project. Department of Energy US.*
- [15] Tangler J. L., (1995). **NREL Airfoil Families for HAWTs**, *National Renewable Energy Laboratory.*
- [16] 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.
- [17] W Z Shen, V A K Zakkam, J N Sørensen and K Appa, (2007). **Analysis of Counter-Rotating Wind Turbines**, *Journal of Physics: Conference Series 75 (2007) 012003.*
- [18] Wei Yuan, Ahmet Ozbay, Wei Tian and Hui Hu, (2013). **An Experimental Investigation on the Effects of Turbine Rotation Directions on the Wake Interference of Wind Turbines**, *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 07 - 10 January 2013, Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas*