

Pengujian Skala Laboratorium Performa Rotor Turbin Angin Ganda Kontra-Rotasi Melalui Variasi Rasio Geometri

Kostan Pae¹, Verdy A. Koehuan^{2*}, Gusnawati³

¹⁻³Program Studi Teknik Mesin Fakultas Sains Dan Teknik Universitas Nusa Cendana
Penfui, kota Kupang NTT 85228, Indonesia

*Corresponding author: verdy.koehuan@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui performa turbin angin rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) terhadap konfigurasi rasio geometri rotor CRWT. Pengujian dilakukan pada skala laboratorium dengan model blade rotor turbin menggunakan seri airfoil S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), dimana diameter rotor pada skala lapangan (*full scale*) adalah 0,944 m. Blade dibuat melalui proses 3D printing menggunakan material PLA (*polylactic acid*) dengan profil airfoil S826. Pengujian skala laboratorium menggunakan terowongan angin dengan dimensi seksi uji panjang 0,6 m, lebar 0,3 m dan tinggi 0,3 m serta kecepatan angin dianggap seragam yang divariasikan mulai dari kecepatan 3 m/s hingga 5 m/s. peforma CRWT dengan rasio geometri rotor $D_1/D_2 < 1$ lebih baik dari CRWT dengan rasio geometri rotor $D_1/D_2 > 1$ pada jarak rotor $Z/D_1 = 0,4$. Variasi rasio geometri turbin dengan diameter rotor depan lebih kecil, koefisien daya turbin rotor depannya lebih tinggi dari turbin dengan diameter rotor depan lebih besar.

ABSTRACT

The aim of this research is to determine the performance of a double rotor counter-rotation wind turbine on the geometric configuration of the CRWT rotor ratio. Tests were carried out on a laboratory scale with a turbine rotor blade model using the S826 airfoil series issued by NREL (National Renewable Energy Laboratory), where the rotor diameter at field scale (full scale) was 0.944 m. The blade is made through a 3D printing process using PLA (polylactic acid) material with an S826 airfoil profile. Laboratory scale testing uses a wind tunnel with test section dimensions of 0.6 m long, 0.3 m wide and 0.3 m high and the wind speed is considered uniform, varying from 3 m/s to 5 m/s. The performance of CRWT with rotor geometry ratio $D_1/D_2 < 1$ is better than CRWT with rotor geometry ratio $D_1/D_2 > 1$ at rotor distance $Z/D_1 = 0.4$. Varying the turbine geometry ratio with a smaller front rotor diameter, the power coefficient of the front rotor turbine is higher than the turbine with a larger front rotor diameter.

Keywords: turbine wind, double rotor, cons rotation, coefficient power, ratio geometry

PENDAHULUAN

Dewasa ini banyak dikembangkan sumber energi terbarukan, seperti sumber energi angin, panas matahari, biogas, biomassa, gelombang air laut, panas bumi dan sebagainya. Turbin angin merupakan salah satu sistem konversi energi angin yang sudah sejak lama dikembangkan. Perkembangan teknologi turbin angin ini, khususnya turbin angin sumbu horisontal atau *horizontal axis wind turbine* (HAWT) tipe propeler tiga *blade* dewasa ini menunjukkan suatu kemajuan sangat pesat. Hal ini ditandai dengan adanya

peningkatan efisiensi turbin dan penurunan biaya per kWh yang cukup baik. Rotor turbin angin merupakan kunci utama dalam proses perubahan energi kinetik angin menjadi energi mekanik, sehingga rancangan geometri blade yang aerodinamis dengan efisiensi optimum mutlak dibutuhkan agar dapat memaksimalkan energi yang dapat dikonversi tersebut (Vermeer et al., 2003).

Turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga *blade* dengan rotor ganda (*double rotor*) yang dikenal dengan *double rotor wind turbine* (DRWT) memiliki dua rotor yang ditempatkan pada satu sumbu putar. DRWT dengan arah putaran saling

berlawanan atau *counter-rotating* yang lebih dikenal dengan *counter-rotating wind turbine* (CRWT) dapat membangkitkan daya listrik dengan atau tanpa menggunakan sistem transmisi. Turbin angin ini memiliki dua buah rotor yang diameternya sama atau berbeda, sama-sama menggerakkan satu alternator dengan arah putaran saling berlawanan arah. Secara aerodinamika dapat meningkatkan koefisien daya turbin angin dua rotor lebih tinggi dari pada kondisi rotor tunggal. Rotor berukuran besar ditempatkan di depan rotor yang berukuran kecil atau sebaliknya, kecepatan rotasi dari kedua rotor ini cukup sinkron bekerja sama dan saling dukung dalam menggerakkan alternator (Kanemoto & Galal, 2006) Parameter aerodinamika rotor turbin CRWT seperti rasio diameter rotor, rasio jarak rotor, dan *tip speed ratio* (TSR) (Verdy A Koehuan & Mandala, 2020) dan (V A. Koehuan et al., 2019) sangat mempengaruhi performa turbin. Performa CRWT dengan konfigurasi rasio diameter maupun rasio jarak yang untuk suatu jenis blade tertentu berdasarkan beberapa hasil kajian tersebut menunjukkan bahwa turbin angin rotor ganda lebih baik performanya dari turbin angin rotor tunggal. Parameter penelitian seperti rasio diameter turbin angin *counter-rotating*, yakni D_1/D_2 dimana D_1 adalah diameter rotor depan dan D_2 adalah diameter rotor belakang. Rasio diameter ini meliputi D_1/D_2 kurang dari satu, D_1/D_2 sama dengan satu dan D_1/D_2 lebih besar

satu terhadap rasio jarak aksial rotor Z/D_1 dalam aplikasinya masing-masing menunjukkan performa terbaik (V. Koehuan et al., 2017). Akan tetapi, penelitian-penelitian yang telah dilakukan masih dikaji secara parsial, cenderung pada salah satu kategori rasio diameter dan atau rasio jarak tertentu saja. Sehingga dalam aplikasinya masing-masing CRWT ini menunjukkan performa yang belum kompetitif dengan turbin angin rotor tunggal. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan pengujian skala laboratorium terhadap performa rotor turbin angin counter-rotating melalui variasi rasio diameter rotor.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah besi hollow baja ringan (2x4 cm), kalsiboard dan mata gurinda. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Blower, baterai, generator dan lampu LED, baut dril, bor, gurinda, meter, dan spidol.

Alat ukur dan sensor yang digunakan dalam pengujian performansi CRWT ini terdiri dari alat ukur kecepatan angin, alat ukur putaran, dan timbangan digital (Gambar 1). Tabel 1 berikut menjelaskan tentang fungsi dan spesifikasi dari alat ukur maupun sensor yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Fungsi dan spesifikasi alat ukur dan sensor yang digunakan dalam penelitian.

Nama Alat	Rentang	Resolusi	Akurasi	Fungsi
1. <i>Hot wire anemometer</i>	0,1–25 m/s	0,01 m/s	±5%, ±0,1 m/s	Mengukur kecepatan angin
2. <i>Digital tachometer</i>	2 - 99,999 rpm	0,1 rpm	±0,05% + 1 digit	Mengukur putaran rotor (acuan)
3. Timbangan digital	0–100 gram	0,01 gram	±0,01%,	Mengukur beban pada pengukuran torsi rotor
4. <i>Capacitive proximity sensor</i>				Mengukur putaran rotor

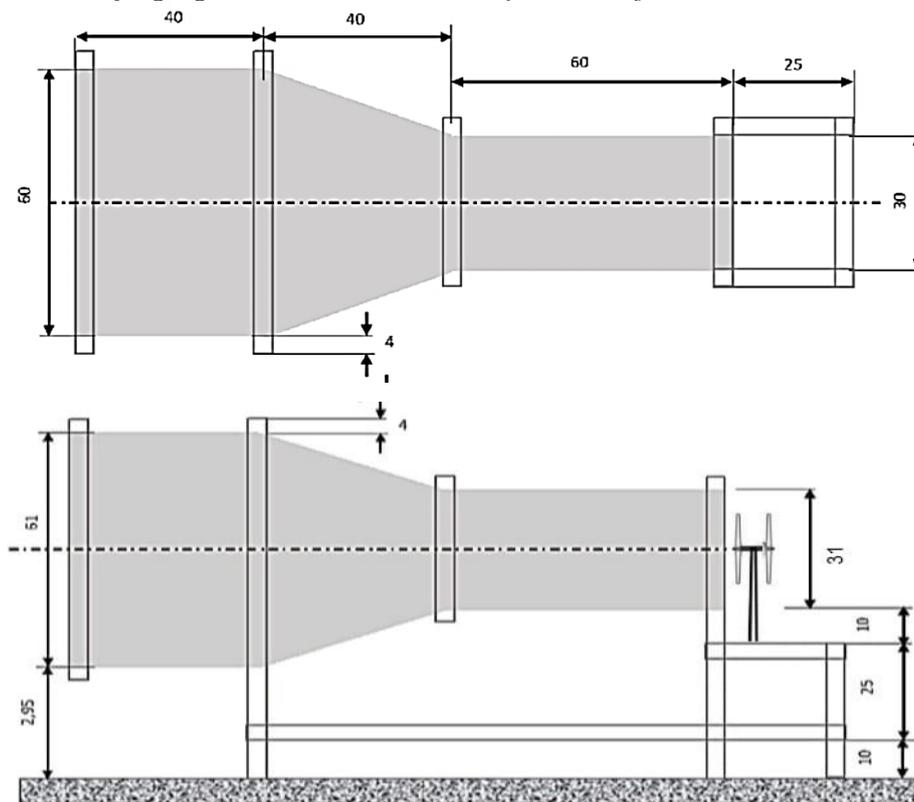
Tahapan Eksperimen

Terowongan angin

Jalan penelitian ini diawali dengan proses persiapan dan pembuatan serta pemasangan

komponen utama penelitian, yaitu: benda uji, terowongan angin, seksi uji, alat-alat ukur termasuk kalibrasi, sistem sensor dan kontrol, rotor turbin, rumah turbin, menara, dan sistem transmisi kemudian dilanjutkan dengan uji coba fungsional tiap komponen. Terowongan angin yang digunakan (Gambar 1) memiliki seksi uji dengan ukuran panjang 60 cm, lebar 30 cm dan tinggi 30 cm serta kecepatan angin maksimum 7 m/s yang digerakan oleh sebuah

fan. Karakteristik aliran pada seksi uji sangat penting pada saat pengujian model pada terowongan angin, oleh karena itu diperlukan pengujian karakteristik aliran. Angin yang dihasilkan oleh fan aksial memiliki profil kecepatan yang tidak seragam dan untuk membandingkan dengan profil kecepatan pada seksi uji dilakukan pengujian distribusi kecepatan angin keluar dari fan aksial dan pada seksi uji.



Gambar 1. Terowongan Angin, satuan dalam cm

Model CRWT

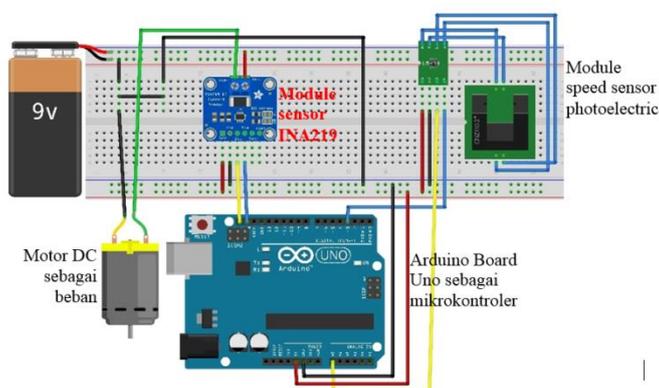
Model CRWT ditunjukkan pada Gambar 4 merupakan model turbin skala laboratorium yang akan diuji performanya pada skala geometri 1:4 dengan variasi rasio diameter D_1/D_2 pada rasio jarak rotor L/D_1 serta tinggi menara 225 mm. Pengujian performa rotor turbin mengukur pembebanan

yang diberikan pada generator mini DC pada masing-masing poros rotor depan maupun belakang.

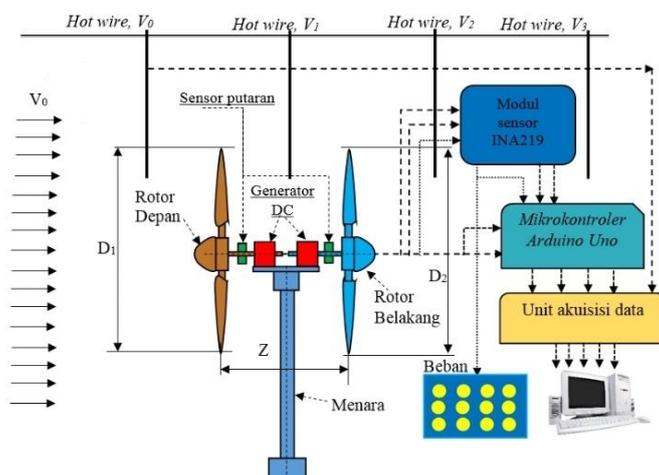
Model *blade* yang digunakan dalam penelitian ini yang selanjutnya disebut sebagai prototipe blade adalah *bladeturbin* angin sumbu horisontal tipe propeler tiga yang diadopsi dari model *blade* yang

dikembangkan oleh NORCOWE (*Norwegian Centre for Offshore Wind Energy*) dan *Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology NTNU, Trondheim, Norway*. Blade rotor turbin ini menggunakan

seri airfoil S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), dimana diameter rotor 0,944 m (Krogstad & Eriksen, 2013).



Gambar 2. Diagram Blok pengujian fungsional komponen pada sistem mikrokontroler dan sensor serta dan kalibrasi alat ukur

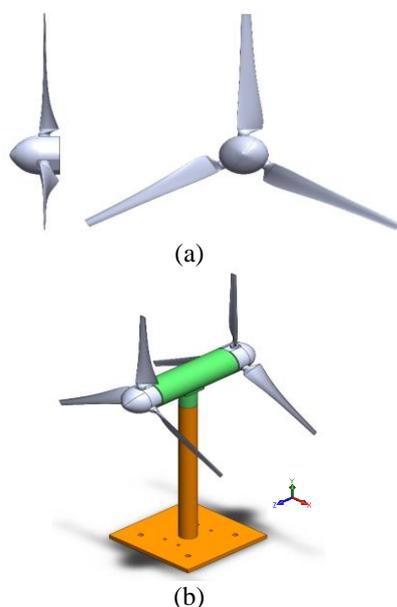


Gambar 3. Skema pengujian turbin angin sumbu horisontal *counter-rotating*

Pengambilan sampel

Metode pengambilan sampel dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dan sistem data logger terkoneksi ke unit komputer, sehingga data hasil pengujian secara langsung ditampilkan di layar komputer dalam bentuk tabel dan grafik. Sementara proses konversi data analog

menjadi data digital melalui module sensor INA219 untuk mengukur kuat arus dan tegangan, module *photoelectric speed sensor* untuk mengukur putaran rotor yang terhubung ke Arduino (Gambar 2) Sedangkan data kecepatan angin diukur dengan menggunakan sensor *hotwire* yang sistem data logger-nya terpisah dari mikrokontroler Arduino Uno.



Gambar 4. a) Geometri rotor, b) Model CRWT

Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan dengan pengamatan langsung terhadap pembacaan alat-alat ukur dari setiap sensor yang digunakan dengan jumlah data 200 sampel per titik pengukuran setiap menit, yang selanjutnya diproses secara digital ke unit data akuisisi dan komputer. Data kecepatan angin dihasilkan oleh *hot wire* yang terpasang pada beberapa titik untuk posisi horizontal dan aksial di depan rotor maupun di belakang rotor pada terowongan angin (Gambar 3).

Data-data yang dihasilkan oleh pembacaan alat-alat ukur dianalisis menggunakan metode statistik sederhana dengan menghitung nilai simpangan baku (*standard deviation*) dan simpangan kesalahan baku (*standard error deviation*) dari nilai rata-rata ukur setiap sampel. Simpangan Baku digunakan untuk menilai tingkat penyebaran data ukur terhadap rata-rata ukur, sementara simpangan kesalahan baku digunakan untuk menilai tingkat ketepatan nilai rata-rata ukur terhadap nilai rata-rata dari alat ukur standar.

Variable penelitian

- Variable penelitian terdiri atas :
- Variabel bebas adalah variasi kecepatan angin (3 m/s hingga 5 m/s), rasio diameter rotor depan (D_1) terhadap rasio diameter rotor belakang (D_1/D_2), dan rasio jarak kedua rotor (Z/D_1) dengan Z adalah jarak rotor seperti pada Tabel 2.
 - Variabel terikat yaitu kecepatan bladet poros, torsi poros dan daya poros yang dihasilkan dari rotor depan dan rotor belakang.
 - Variabel terkontrol terdiri atas solidity, bladet pitch, dan jumlah blade tiga buah untuk rotor depan dan rotor belakang

Tabel 2. Variabel rasio diameter rotor CRWT.

Nama Variabel	D_1 (m)	D_2 (m)	D_1/D_2	Z/D_1	Z (m)
DD1Z1	0.283	0.250	1.132	0.4	0.1415
DD2Z1	0.250	0.283	0.883	0.4	0.10

Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk menentukan besar koefisien daya turbin angin sumbu horizontal rotor ganda *counter-rotating* seperti pada penjelasan di bawah ini. Sedangkan dalam pengujian skala laboratorium, untuk menghitung Error Pengukuran digunakan metode RMSE(i) (*Root Mean Square Error*).

$$\text{RMSE}(i) \text{ (Root Mean Square Error)} = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2}$$

x_i = data hasil pengukuran index (i) menunjukkan jumlah data

\bar{x} = rata-rata hasil pengukuran

$$\text{error} = \frac{\overline{\text{RMSE}}}{\bar{x}}$$

Keterangan:

RMSE(i) adalah RMSE data ke-(i)

$\overline{\text{RMSE}}$ = rata-rata nilai RMSE

Performa turbin angin dinyatakan sebagai koefisien daya turbin angin menurut Eggleston & Stoddard, (1987) sebagai berikut:

Menghitung daya Turbin angin

Daya input (P_{1in}) adalah daya angin (Watt) yang diterima oleh rotor turbin depan

$$P_{1in} = 0,5 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot V^3 \quad \dots\dots\dots 1)$$

Keterangan:

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

A_1 = luas sapuan rotor depan (m^2)

V = kecepatan angin (m/dt)

Daya output rotor depan, P_{1out}

P_{1out} = Daya output rotor depan (Watt)

$$P_{1out} = \frac{I \cdot V}{1000} \quad \dots\dots\dots 2)$$

Keterangan:

I = kuat arus DC (mA)

V = tegangan DC (Volt)

Kecepatan Bladet rotor depan (ω_1) dan kecepatan Bladet rotor belakang (ω_2)

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} \quad \dots\dots\dots 3)$$

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60} \quad \dots\dots\dots 4)$$

Keterangan,

n_1 = putaran rotor depan (rpm)

n_2 = putaran rotor belakang (rpm)

Kecepatan linear atau kecepatan Keliling rotor depan (U_1) kecepatan Keliling belakang (U_2)

$$U_1 = \omega_1 \cdot R_1 \quad \dots\dots\dots 5)$$

$$U_2 = \omega_2 \cdot R_2 \quad \dots\dots\dots 6)$$

Keterangan

R_1 = jari-jari rotor depan (m)

R_2 = jari-jari rotor belakang (m)

Tip Speed Rasio rotor depan (TSR1) dan Tip Speed Rasio rotor belakang (TSR2)

$$TSR_1 = \frac{U_1}{V} \quad \dots\dots\dots 7)$$

$$TSR_2 = \frac{U_2}{V} \quad \dots\dots\dots 8)$$

Keofisien daya depan (C_{p1}) dan koefisien daya rotor belakang (C_{p2})

$$C_{p1} = \frac{P_{1out}}{P_{1in}} \quad \dots\dots\dots 9)$$

$$C_{p2} = \frac{P_{2out}}{P_{2in}} \quad \dots\dots\dots 10)$$

Kecepatan keliling CRWT gabungan rotor depan dan rotor belakang:

$$U = U_1 + U_2 \quad \dots\dots\dots 11)$$

Keterangan

U_1 = Kecepatan keliling rotor depan

U_2 = Kecepatan keliling rotor belakang

TSR Gabungan rotor depan dan rotor belakang

$$TSR = \frac{U}{V} \quad \dots\dots\dots 12)$$

Daya output gabungan rotor depan dan rotor belakang

$$P_{out} = P_{1out} + P_{2out} \quad \dots\dots\dots 13)$$

Koefisien daya gabungan rotor depan dan rotor belakang

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{1in}}, \text{ untuk } P_{1in} > P_{2in} \quad \dots\dots 14)$$

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{2in}}, \text{ untuk } P_{1in} < P_{2in} \quad \dots\dots 15)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

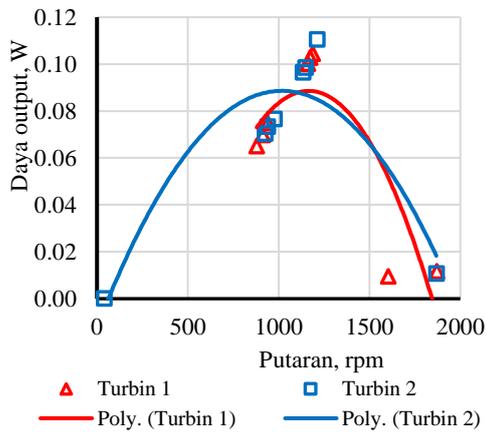
Hasil Analisis Peforma CRWT

Pengujian peforma turbin angin sumbu horizontal rotor ganda pada penelitian ini dilakukan variasi rasio geometri rotor dengan variasi diameter rotor depan dan rotor belakang. Konfigurasi yang pertama dilakukan pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1). Sedangkan Konfigurasi yang turbin kedua adalah dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak yang sama yaitu, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD2Z1 (turbin 2). Kecepatan angin yang digunakan dengan tiga variasi kecepatan mulai dari 4 m/s hingga 5 m/s sedangkan pembebanan rotor terdiri atas empat variasi pembebanan mulai dari tanpa beban lampu, satu lampu, hingga tiga buah lampu LED dengan masing-masing 1,5 volt DC yang pengukurannya menggunakan modul sensor INA219. Pengukuran kecepatan angin dalam pengujian ini digunakan *anemometer*, sedangkan untuk mengukur putaran rotor digunakan alat ukur *capacitive proximity sensor*. Hasil pengukuran dilakukan pada

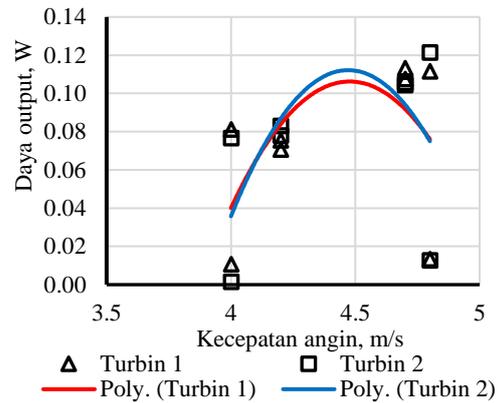
pengujian masing-masing turbin dengan variasi kecepatan angin, dan pembebanan rotor. Selanjutnya dari hasil pengujian ini, dihitung nilai rata-rata masing-masing parameter dengan variasi beban dan kecepatan angin (V1, V2, dan V3).

Rotor depan

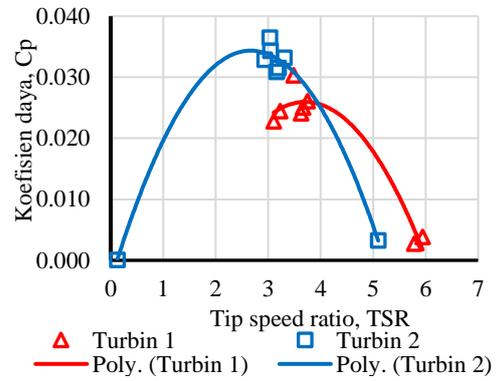
Gambar 5 dan Gambar 6 masing-masing menunjukkan grafik hubungan daya output rotor depan terhadap putaran dan kecepatan angin pada konfigurasi kedua turbin, yakni pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1) dan sebaliknya DD2Z1 (turbin 2) dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$. Dari gambar ini dapat diketahui dari hubungan daya output terhadap putaran rotor bahwa untuk turbin 1 cenderung terjadi daya maksimum pada putaran rendah sebaliknya turbin 2 pada putaran yang lebih tinggi. Sementara dari hubungan daya output terhadap kecepatan angin, kedua turbin dengan daya maksimum pada kecepatan angin 4,5 m/detik dimana daya output rotor depan turbin 2 cenderung lebih tinggi dari turbin 1.



Gambar 5. Hubungan daya output rotor depan terhadap putaran, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1.



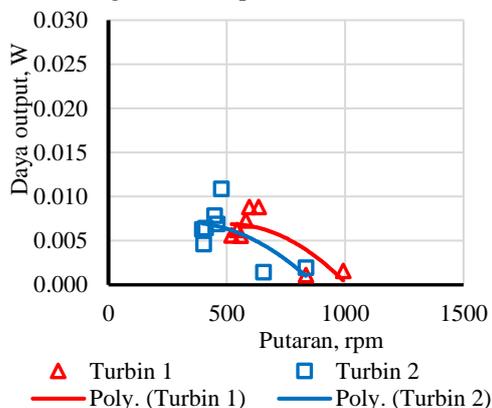
Gambar 6. Hubungan daya output rotor depan terhadap kecepatan angin, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1



Gambar 7. Hubungan koefisien daya rotor depan terhadap tip speed ratio, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1

Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan koefisien daya rotor depan terhadap tip speed ratio (TSR) pada kedua turbin, yakni pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1) dan sebaliknya DD2Z1 (turbin 2) dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa koefisien daya rotor depan terhadap tip speed ratio tertinggi pada turbin

pertama dengan nilai maksimum pada $TSR=2,6$. Sedangkan untuk turbin kedua, koefisien dayanya cenderung lebih rendah dengan nilai maksimum pada $TSR=3,7$. Hal ini menunjukkan variasi geometri dengan diameter turbin rotor depan lebih kecil, koefisien daya turbannya lebih tinggi dari turbin dengan rotor depan lebih besar.



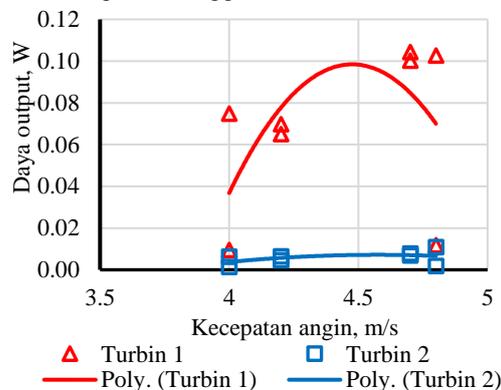
Gambar 8. Hubungan daya output rotor belakang terhadap putaran, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1.

Rotor belakang

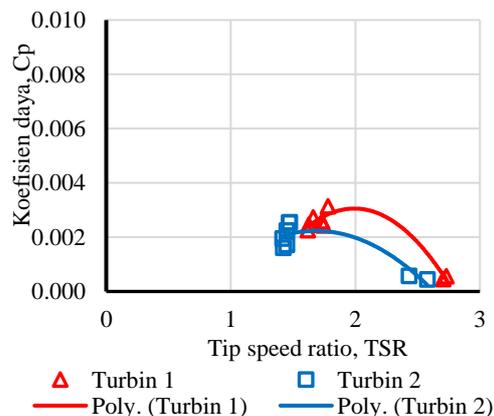
Gambar 8 dan Gambar 9 masing-masing menunjukkan grafik hubungan daya output rotor belakang terhadap putaran dan kecepatan angin pada kedua turbin, yakni pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1) dan sebaliknya DD2Z1 (turbin 2) dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa daya output rotor belakang turbin 1 lebih tinggi dari turbin 2.

Gambar 10 menunjukkan grafik hubungan koefisien daya rotor belakang terhadap *tip speed ratio* (TSR) pada kedua turbin, yakni pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1) dan sebaliknya DD2Z1 (turbin 2) dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor

belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa koefisien daya rotor belakang terhadap *tip speed ratio* untuk turbin pertama cenderung lebih tinggi dari turbin kedua.



Gambar 9. Hubungan daya output rotor belakang terhadap kecepatan angin, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1

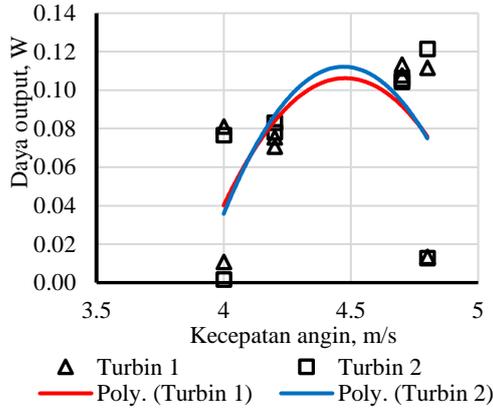


Gambar 10. Hubungan koefisien daya rotor belakang terhadap *tip speed ratio*, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1

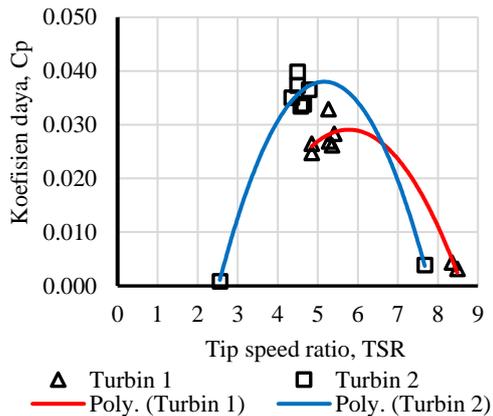
Gabungan (CRWT)

Gambar 11 menunjukkan grafik hubungan daya output rotor gabungan (CRWT) kecepatan angin pada kedua turbin, yakni pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1) dan sebaliknya DD2Z1 (turbin 2)

dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa daya output rotor gabungan kedua rotor (CRWT), dimana turbin 2 cenderung lebih tinggi dari turbin 1 dengan kecepatan angin pada daya maksimum pada 4,5 m/s.



Gambar 11. Hubungan daya output CRWT terhadap kecepatan angin, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1



Gambar 12. Hubungan koefisien daya CRWT terhadap tip speed ratio, masing-masing pada model turbin DD1Z1, dan DD2Z1

Gambar 12 menunjukkan grafik hubungan koefisien daya rotor gabungan (CRWT) terhadap tip speed ratio (TSR) pada ketiga turbin, yakni pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang

($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1) dan sebaliknya DD2Z1 (turbin 2) dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa koefisien daya rotor gabungan (CRWT) terhadap tip speed ratio dari turbin 2 cenderung lebih tinggi dan pada rentang TSR yang lebih lebar dari pada turbin 1. Hal ini terlihat bahwa pada turbin dengan diameter rotor depan yang lebih kecil (turbin 2) dapat bekerja optimal dengan koefisien daya lebih tinggi dari turbin dengan diameter rotor depan yang lebih besar.

Pembahasan

Peforma turbin angin sumbu horizontal rotor ganda terhadap variasi rasio geometri rotor, dengan rasio jarak tetap, yakni $Z/D_1 = 0,4$ (Z adalah jarak rotor depan dan rotor belakang). Konfigurasi yang pertama dilakukan pada diameter rotor depan ($D_1=0,283$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,25$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$ untuk turbin DD1Z1 (turbin 1) dan sebaliknya DD2Z1 (turbin 2) dengan diameter rotor depan ($D_1=0,25$ m) dan diameter rotor belakang ($D_2=0,283$ m) pada rasio jarak, $Z/D_1=0,4$. Kecepatan angin yang digunakan dengan tiga variasi kecepatan mulai dari 4 m/s hingga 5 m/s sedangkan pembebanan rotor terdiri atas empat variasi pembebanan mulai dari tanpa beban lampu, satu lampu, hingga tiga buah lampu LED dengan masing-masing 1,5 volt DC.

Hasil analisis menunjukkan hubungan daya output rotor depan terhadap putaran dan kecepatan angin pada konfigurasi rasio geometri kedua turbin, yakni untuk turbin 1 cenderung terjadi daya maksimum pada putaran rendah sebaliknya turbin 2 pada putaran yang lebih tinggi. Sementara dari hubungan daya output terhadap kecepatan angin, kedua turbin dengan daya maksimum pada kecepatan angin 4,5 m/detik dimana daya output rotor depan turbin 2 cenderung lebih tinggi dari turbin 1. Sementara dari hubungan koefisien daya rotor depan terhadap tip speed

ratio (TSR) pada kedua turbin, diketahui bahwa koefisien daya rotor depan terhadap *tip speed ratio* tertinggi pada turbin pertama dengan nilai maksimum pada $TSR=2,6$. Sedangkan untuk turbin kedua, koefisien dayanya cenderung lebih rendah dengan nilai maksimum pada $TSR=3,7$.

Hal ini menunjukkan variasi rasio geometri turbin dengan diameter rotor depan lebih kecil (turbin 2), koefisien daya turbin rotor depannya lebih tinggi dari turbin dengan diameter rotor depan lebih besar (turbin 1). Sebaliknya pada turbin dengan diameter rotor depan yang besar (turbin 1), daya turbin rotor belakang mengalami peningkatan, dibandingkan dengan turbin yang diameter rotor depannya lebih kecil (turbin 2). Hal yang sama juga pada turbin dengan diameter rotor depan yang lebih besar (turbin 1), koefisien daya rotor belakang cenderung lebih tinggi dari turbin 2. Namun daya output turbin gabungan kedua rotor (CRWT), dimana turbin 2 (diameter rotor depannya lebih kecil) cenderung lebih tinggi dari turbin 1 (diameter rotor depannya lebih besar) dengan daya maksimum terjadi pada kecepatan angin 4,5 m/s dan $TSR = 5,1$. Koefisien daya rotor gabungan (CRWT) terhadap *tip speed ratio* dari turbin 2 cenderung lebih tinggi dan pada rentang TSR yang lebih lebar dari pada turbin 1. Hal ini terlihat bahwa pada turbin dengan diameter rotor depan yang lebih kecil (turbin 2) dapat bekerja optimal dengan koefisien daya lebih tinggi dari turbin dengan diameter rotor depan yang lebih besar.

Secara keseluruhan pada kedua konfigurasi turbin ini menunjukkan karakter peningkatan maupun penurunan koefisien daya yang berbeda terhadap variasi geometri rotor. Ketika diameter rotor depan lebih besar dari rotor belakang (konfigurasi yang pertama), aliran yang melewati rotor depan mengalami perlambatan akibat adanya gerak lawan arah (*contra-rotasi*) dari turbin rotor belakang. Hal ini sangat merugikan rotor depan karena penurunan kecepatan aliran yang tertahan oleh rotor belakang, menyebabkan rotor depan kehilangan konversi energy kinetiknya sebagai akibat tertahannya kecepatan aliran ke arah *downstream*.

Sebaliknya ketika diameter rotor depan lebih kecil dari rotor belakang (konfigurasi yang kedua), aliran yang melewati rotor depan mengalami percepatan oleh rotor belakang yang mempercepat laju penurunan kecepatan sekaligus meningkatkan konversi energy kinetiknya.

Sebaliknya ketika diameter rotor belakang lebih besar dari rotor depan (konfigurasi yang kedua), aliran melewati rotor belakang dengan kecepatan maupun energy kinetik yang cukup rendah, sehingga performa rotor belakang mengalami penurunan. Sebaliknya ketika diameter rotor belakang lebih kecil dari rotor depan (konfigurasi yang pertama), aliran yang melewati rotor belakang dengan kecepatan dan energy kinetik yang cukup tinggi, sehingga dapat meningkatkan performa rotor belakang. Namun secara keseluruhan, performa gabungan antara rotor depan dan rotor belakang untuk kedua konfigurasi rasio geometri ini menunjukkan turbin 2 dengan performa total atau gabungan yang lebih baik dari turbin 1. Sehingga dalam aplikasinya, sebaiknya digunakan konfigurasi yang ke-2, yakni turbin dengan diameter rotor depan yang lebih kecil dari rotor belakang untuk rasio jarak $Z/D_1 = 0,4$. Hal ini dapat disimpulkan bahwa performa CRWT dengan rasio geometri rotor $D_1/D_2 < 1$ lebih baik dari CRWT dengan rasio geometri rotor $D_1/D_2 > 1$ pada jarak rotor $Z/D_1 = 0,4$.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa performa CRWT dengan rasio geometri rotor $D_1/D_2 < 1$ lebih baik dari CRWT dengan rasio geometri rotor $D_1/D_2 > 1$ pada jarak rotor $Z/D_1 = 0,4$. Variasi rasio geometri turbin dengan diameter rotor depan lebih kecil, koefisien daya turbin rotor depannya lebih tinggi dari turbin dengan diameter rotor depan lebih besar. Sebaliknya pada turbin dengan diameter rotor depan yang besar, koefisien daya turbin rotor belakang lebih tinggi dari

turbin dengan diameter rotor depan yang lebih kecil

Saran

Pengujian performa CRWT perlu dilakukan pada skala pengujian lapangan untuk mengetahui performa turbin pada kondisi angin alamiah. Perlu adanya kalibrasi alat ukur dan kondisi lokasi pengujian seperti terowongan angin yang standar agar akurasi maupun ketelitian hasil pengujian dapat lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, and A. Crespo, "Wind turbine wake aerodynamics," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 39, pp. 467–510, 2003, Accessed: Jun. 16, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042103000782>.
- [2]. T. Kanemoto and A. M. Galal, "Development of intelligent wind turbine generator with tandem wind rotors and double rotational armatures (1st report, superior operation of tandem wind rotors)," *JSME Int. J. Ser. B Fluids Therm. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 450–457, 2006.
- [3]. V. A. Koehuan, V. A. Koehuan, and J. F. Mandala, "Simulasi CFD Performa Aerodinamika Rotor Turbin Angin Counter-Rotating melalui Variasi Rasio Kecepatan Tip Blade dengan Solidity Konstan," 2020, doi: 10.1234/ljtmu.v9i02.3342.
- [4]. V. A. Koehuan, Sugiyono, and S. Kamal, "Numerical Analysis on Aerodynamic Performance of Counter-rotating Wind Turbine through Rear Rotor Configuration," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 140–257, 2019.
- [5]. V. Koehuan, Sugiyono, and S. Kamal, "Investigation of Counter-Rotating Wind Turbine Performance using Computational Fluid Dynamics Simulation," *iopscience.iop.org*, vol. IOP Conf., no. 267 012034, 2017, Accessed: Jun. 10, 2018. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/267/1/012034/meta>.
- [6]. P.-Å. Krogstad and P. E. Eriksen, "'Blind test' calculations of the performance and wake development for a model wind turbine," *Renew. energy*, vol. 50, pp. 325–333, 2013.
- [7]. I. Ushiyama, T. Shimota, and Y. Miura, "An experimental study of the two-staged wind turbines," *Renew. Energy*, vol. 9, no. 1–4, pp. 909–912, 1996, Accessed: Jun. 16, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148196884278>.
- [8]. S. N. Jung, T. S. No, and K. W. Ryu, "Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 631–644, 2005, doi: 10.1016/j.renene.2004.07.005.
- [9]. V. A. Koehuan, L. Nogur, and J. U. Jasron, "Studi Eksperimental Variasi Bladet Blade terhadap Kinerja Rotor Blade Turbin Angin Tipe Propeler Poros Horizontal Model Contra Rotating," *LONTAR J. Tek. Mesin Undana*, vol. 1, no. 2, pp. 72–81, 2014.
- [10]. A. MAULANA, "STUDI EKSPERIMENTAL PERFORMA COUNTER ROTATING WIND TURBINE

- BERDIAMETER 3 M.”
Universitas Gadjah Mada, 2019.
- [11]. P. S. Kumar, R. J. Bensingh, and A. Abraham, “Computational analysis of 30 Kw contra rotor wind turbine,” *ISRN Renew. Energy*, vol. 2012, 2012.
- [12]. P. S. Kumar, A. Abraham, R. J. Bensingh, and S. Ilangovan, “Computational and experimental analysis of a counter-rotating wind turbine system,” 2013.
- [13]. S. N. Jung, T.-S. No, and K.-W. Ryu, “Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system,” *Renew. Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 631–644, 2005.
- [14]. S. Lee, H. Kim, and S. Lee, “Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 2, pp. S339–S342, 2010.
- [15]. D. M. Eggleston and F. Stoddard, “Wind turbine engineering design,” 1987.