

Pengaruh Penempatan Silinder Sirkular di Depan *Returning Blade* pada $S/D=1,8$ untuk Meningkatkan Performa Turbin Angin Savonius

Elza Lisdarina dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Pada eksperimen ini, digunakan silinder sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius pada eksperimen ini memiliki ukuran diameter sudu (D) 167 mm, tinggi (H) 298 mm, diameter *endplate* (D_0) 321 mm, dan digunakan poros turbin dengan diameter (b) 19 mm. Turbin angin Savonius dioperasikan pada kecepatan angin 3,8 – 9 m/s atau bilangan Reynold $7,4 \times 10^4$ – $17,5 \times 10^4$. Silinder sirkular yang digunakan memiliki ukuran diameter $0,5D$ yang diletakkan pada jarak $1,8D$ di depan *returning blade*. Peletakan silinder sirkular ini terbukti mampu menurunkan gaya drag yang terjadi pada *returning blade*, sehingga performa turbin angin Savonius meningkat. Peningkatan tertinggi didapatkan pada kecepatan 3,8 m/s, yaitu meningkatkan *Coefficient of Power* (CoP) sebesar 168,1% dan *Coefficient of Moment* (C_M) sebesar 89%. Sedangkan untuk nilai *Coefficient of Static Torque*, didapatkan hasil dengan silinder pengganggu memiliki *self starting* pada kecepatan 5-9 m/s.

Kata Kunci—Turbin Angin Savonius, Silinder Sirkular, Performa Turbin.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA memiliki potensi energi angin yang cukup besar, yaitu 950 MW menurut data ditjen Energi Baru dan Terbarukan. Akan tetapi potensi ini masih belum dimanfaatkan secara optimal. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu yang ada di Indonesia hanya 0,03% dari total kapasitas pembangkit yang terpasang. Salah satu faktor penting dalam pengoptimalan energi angin ini adalah dari pemilihan jenis turbin angin yang digunakan. Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin yang sesuai digunakan di Indonesia karena dapat dioperasikan pada kecepatan angin rendah, dimana Indonesia memiliki kecepatan angin rata-rata 3-6 m/s. Kelebihan dari turbin angin Savonius ini diantaranya adalah dapat dioperasikan pada kecepatan angin rendah dan memiliki konstruksi yang sederhana. Akan tetapi, turbin angin ini memiliki kekurangan, yaitu performa yang dihasilkan masih rendah apabila dibandingkan dengan performa turbin angin tipe horizontal.

Turbin angin Savonius merupakan turbin angin tipe vertikal yang pertama kali dikenalkan pada tahun 1922 oleh insinyur Finlandia bernama Sigurd Johannes Savonius. Pada dasarnya, turbin angin Savonius terdiri dari 2 sudu turbin yang disusun berbentuk S apabila dilihat dari penampang atas. Sudu yang berbentuk cekung meghadap arah keadatangan angin disebut *advancing blade* dan yang membelakangi arah kedatangan angin disebut *returning blade*.

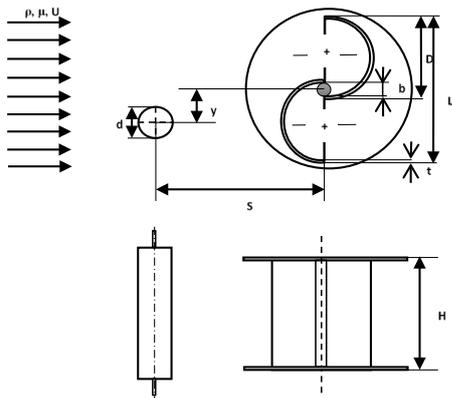
Cara kerja turbin angin Savonius adalah dengan memanfaatkan gaya *drag* dari angin. Adanya selisih gaya *drag* yang terjadi antara *returning blade* dan *advancing blade* menyebabkan turbin angin dapat berputar. Kemudian, putaran poros utama turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Performa turbin angin Savonius dapat ditingkatkan dengan mencari geometri terbaik untuk menghasilkan performa maksimal [1]. Variasi geometri yang digunakan adalah jumlah sudu yang digunakan (2,3 dan 4), jumlah *stages* (1 dan 2), *overlap ratio* ($\beta = 0 - 0,35$), *aspect ratio* ($\alpha = 0,5 - 5$) dan keberadaan *endplates*. Turbin angin Savonius yang dioperasikan pada kecepatan 0-13 m/s dan didapatkan performa maksimal pada penggunaan geometri 2 sudu, *double stages*, *overlap ratio* = 0, *aspect ratio* = 5, dan dengan penggunaan *endplates*.

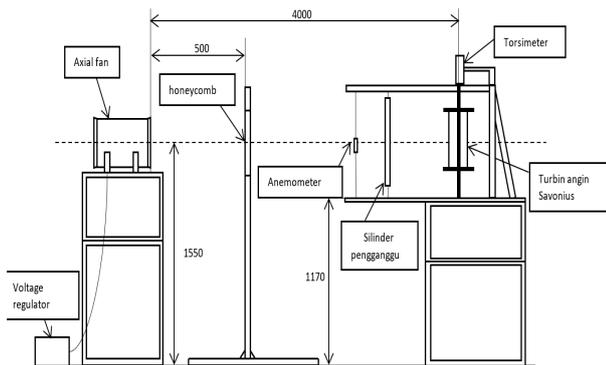
Selain menggunakan geometri terbaik, peningkatan performa turbin angin Savonius dapat dilakukan dengan memberikan *curtain* atau plat pengarah angin di depan turbin angin Savonius [2]. Variasi yang digunakan adalah panjang dari *curtain* yang digunakan dan sudut kemiringan *curtain* terhadap bidang horizontal. Ada 2 plat pengarah yang digunakan, yaitu 1 diletakkan di depan *returning blade* (11) dan 1 di sisi samping *advancing blade* (12). Kecepatan angin yang digunakan untuk memutar turbin angin Savonius adalah 7 m/s atau dalam bilangan Reynold $1,5 \times 10^5$. Performa maksimum didapatkan dengan menambahkan plat pengarah ukuran terpanjang pada variasi yang digunakan, yaitu mencapai peningkatan nilai *Coefficient of Power* sebesar 38,5%.

Penelitian dengan memberikan plat di depan *returning blade* telah dianalisa menggunakan metode simulasi [3]. Turbin angin Savonius yang diberikan plat datar pengarah aliran di depan *returning blade* disimulasikan pada kecepatan angin 10m/s. Simulasi dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan posisi dan kemiringan optimum dari peletakan plat pengarah. Variasi lain yang digunakan pada simulasi ini adalah jumlah sudu yang digunaka, yaitu 2 dan 3. Hasil dari simulasi didapatkan bahwa performa turbin angin Savonius dengan parameter nilai *Coefficient of Power* maksimum didapatkan pada penggunaan 2 sudu yang meningkat sebesar 27,3% dengan penambahan plat pengarah di depan *returning blade*.

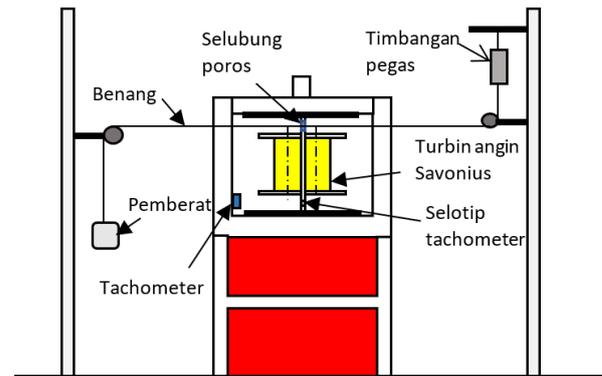
Cara lain untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius adalah dengan megurangi gaya *drag* pada *returning blade* dengan memberikan silinder pengganggu tipe I-65° pada jarak $S/D = 1,4$ [4]. Dengan metode analisa numerik dan eksperimen, turbin angin dioperasikan pada kecepatan 5 m/s



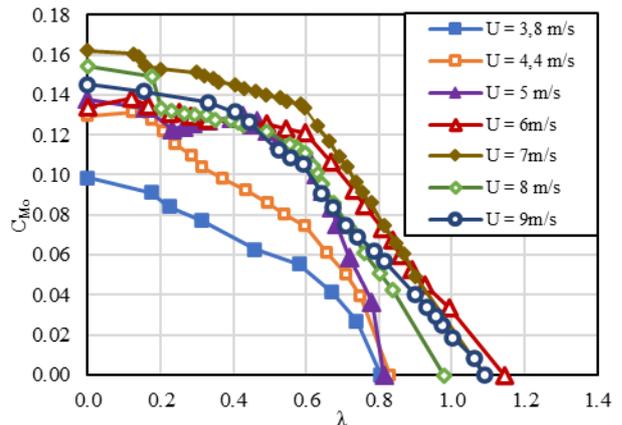
Gambar 1. Penampang turbin angin Savonius dan peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade*



Gambar 2. Instalasi Peralatan



Gambar 3. Brake dynamometer systems.



Gambar 4. Grafik nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* turbin angin tanpa pengganggu

atau dalam bilangan Reynold $9,9 \times 10^4$. Peningkatan nilai *Coefficient of Power* dengan metode eksperimen dengan menambahkan silinder pengganggu tipe I-65° di depan *returning blade* sebesar 23,61%, sedangkan dengan metode simulasi didapatkan peningkatan sebesar 25,32%.

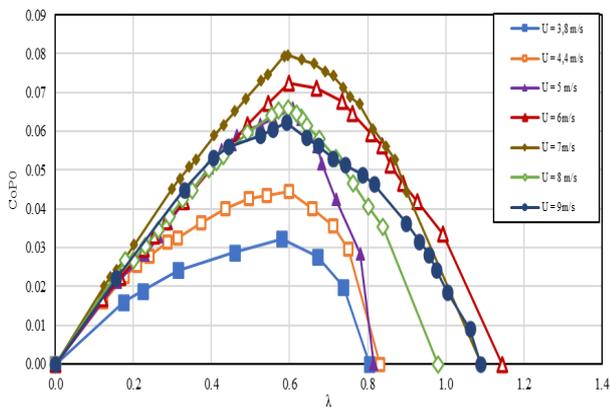
Pada penelitian yang dilakukan saat ini, optimasi performa turbin angin Savonius dilakukan dengan cara silinder sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius. Pemilihan silinder sirkular sebagai pengganggu ini didasari oleh penelitian untuk mengurangi gaya *drag* pada sebuah silinder sirkular utama dengan cara meletakkan silinder sirkular pengganggu di depannya [5]. Variasi yang digunakan adalah rasio diameter silinder pengganggu dengan silinder utama ($d/D = 0,025 - 0,25$), jarak kedua pusat silinder terhadap diameter silinder utama ($L/D = 1,25 - 3$), dan kecepatan angin ($V = 4 - 24$ m/s atau pada $Re = 1,5 \times 10^4 - 6,2 \times 10^4$).

Hasil yang didapatkan adalah penambahan silinder pengganggu di depan silinder utama terbukti dapat menurunkan *Coefficient of drag* pada silinder utama yang nilainya semakin kecil dengan kenaikan Re dan d/D serta penurunan L/D . Penurunan nilai *Coefficient of drag* optimum didapatkan pada penggunaan silinder sirkular pengganggu ukuran $d/D=0,25$ yang diletakkan pada $L/D=2,0$ untuk $Re < 4,1 \times 10^4$ dan $L/D=1,75$ untuk $Re \geq 4,1 \times 10^4$. Penurunan nilai *Coefficient of drag* maksimum sebesar 73% dan penurunan *total drag coefficient* maksimal sebesar 63%.

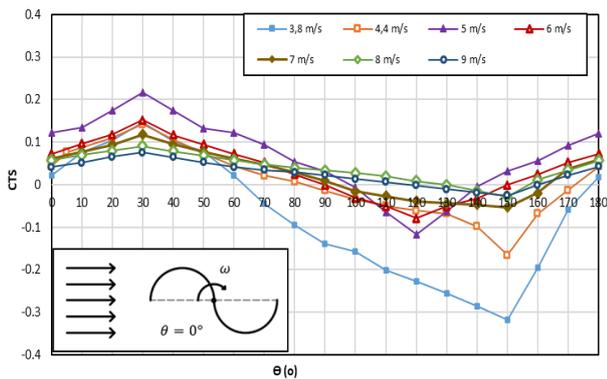
Eksperimen penggunaan silinder sirkular sebagai silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius sudah pernah dilakukan sebelumnya [6]–[10]. Pada eksperimen [6], silinder pengganggu diletakkan pada jarak

$S/D = 1,5-2,4$ dengan bilangan Reynold 6×10^4 ; $7,5 \times 10^4$; dan 9×10^4 . Kesimpulan yang didapatkan adalah adanya kenaikan yang sangat signifikan dengan peletakan silinder sirkular pengganggu, yaitu dengan kenaikan nilai *Coefficient of Power* tertinggi sebesar 821% pada $Re=6 \times 10^4$ dan $S/D=1,7$. Eksperimen berikutnya dilakukan pada variasi $S/D=1,5-2,4$ dan bilangan Reynold 3×10^4 ; 6×10^4 ; dan 9×10^4 [7]. Hasil yang didapatkan pada eksperimen ini juga membuktikan adanya kenaikan nilai *Coefficient of Power* yang signifikan dengan penambahan silinder sirkular sebagai silinder pengganggu, yaitu kenaikan maksimal sebesar 430% pada $Re=6 \times 10^4$ dan $S/D=1,7$. Eksperimen [8] menggunakan variasi jarak pusat silinder pengganggu terhadap pusat turbin dalam sumbu y ($y/D=0; 0,25; \text{ dan } 0,5$ serta variasi bilangan Reynold 9×10^4 ; $13,8 \times 10^4$; $16,8 \times 10^4$. Dari variasi yang digunakan, didapatkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* maksimal sebesar 6% pada $y/D=0,5$ dengan bilangan Reynold 9×10^4 . Eksperimen [9] menggunakan variasi jarak peletakan silinder pengganggu $S/D=1,4-1,8$ dan bilangan Reynold $9,6 \times 10^4$; $13,4 \times 10^4$; dan $17,3 \times 10^4$.

Hasil eksperimen yang didapatkan adalah performa optimum pada penggunaan silinder pengganggu, yaitu dengan kenaikan nilai *Coefficient of Power* maksimal 60,2% pada $S/D=1,4$ bilangan Reynold $9,6 \times 10^4$. Kemudian pada eksperimen [10] digunakan variasi rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu ($d/D=0,1-1$ dan variasi bilangan Reynold $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Hasil eksperimen ini adalah silinder pengganggu efektif diletakkan di depan *returning blade* pada jarak $S/D=1,8$ dengan ukuran $d/D=0,5$ dan bilangan Reynold $9,7 \times 10^4$, yaitu dengan kenaikan nilai *Coefficient of Power* 42%.



Gambar 5. Grafik nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi *Tip speed ratio*.



Gambar 6. Grafik *Coefficient of Static Torque* turbin angin Savonius tanpa pengganggu ($CoTS_0$) fungsi sudut sudu turbin(θ)

Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Selain itu, eksperimen ini digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan yang diberikan pada turbin angin Savonius dan mendapatkan nilai kecepatan optimum untuk desain turbin yang digunakan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Peralatan

Gambar penampang turbin angin Savonius dan peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat dilihat pada Gambar 1. Turbin angin Savonius yang digunakan memiliki ukuran diameter sudu (D) = 167 mm, tebal sudu turbin (t) = 3 mm, tinggi (H) = 298 mm, diameter poros turbin (b) = 19 mm, dan diameter *endplate* (D_o) = 320 mm. Material yang digunakan untuk pembuatan sudu turbin adalah pipa PVC, sedangkan *endplate* dibuat dari aluminium cladding 2024. Silinder sirkular pada eksperimen ini memiliki ukuran diameter d = 83 mm dan tinggi (h) = 500 mm.

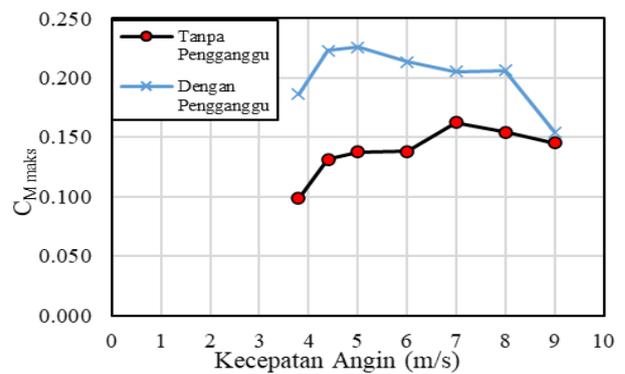
Peralatan pendukung yang digunakan pada eksperimen ini, diantaranya adalah :

1) Axial fan

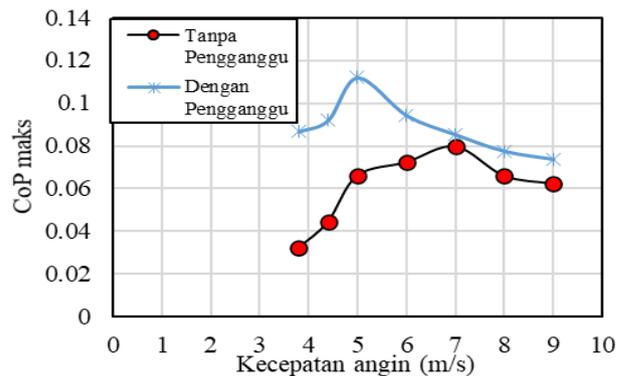
Axial fan digunakan sebagai sumber aliran udara pada eksperimen ini. *Axial fan* yang digunakan memiliki tipe CKE SPV-18.

2) Honeycomb

Honeycomb memiliki fungsi untuk membuat aliran udara dari *axial fan* menjadi aliran yang *uniform*.



Gambar 7. Grafik nilai *Coefficient of Moment* maksimal sebagai fungsi kecepatan pada turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu.



Gambar 8. Grafik nilai *Coefficient of Power* maksimal sebagai fungsi kecepatan pada turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu

3) Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur digital untuk mengukur kecepatan putar poros turbin dalam sistem *brake dynamometer* pengukuran torsi dinamis. Pada eksperimen ini digunakan *tachometer* dengan tipe Economical Non-Contact Pocket Optical *Tachometer* OMEGA seri HHT12.

4) Anemometer

Anemometer merupakan alat ukur kecepatan angin. *Anemometer* yang digunakan memiliki tipe Omega HHF141.

5) Torquemeter

Torquemeter digunakan sebagai alat ukur torsi statis dari poros turbin angin Savonius pada eksperimen ini. *Torquemeter* yang digunakan adalah *Torquemeter* LUTRON model TQ-8800 dengan high-resolution 0,1 N-cm.

6) Voltage Regulator

Voltage regulator berfungsi untuk mengatur besar keluaran tegangan dari *axial fan* pada eksperimen ini sehingga didapatkan kecepatan angin yang sesuai dengan kebutuhan.

7) Neraca Pegas

Neraca pegas merupakan alat ukur massa, dimana pada eksperimen ini digunakan neraca pegas dengan merk Nagata kapasitas 3 kg dan ketelitian 10 gram.

8) Pemberat

Peralatan berikutnya adalah pemberat pada *brake dynamometer systems* dalam pengukuran torsi dinamis turbin. Pemberat yang digunakan memiliki massa yang bervariasi, yaitu 3 – 20 gram.

B. Metode Pengukuran

Gambar 2 menunjukkan skema dan instalasi peralatan pada eksperimen ini. Turbin angin Savonius di letakkan di depan *axial fan* dengan jarak 4m. Pengukuran kecepatan angin menggunakan anemometer dilakukan pada jarak 4D di depan turbin angin Savonius. Hal ini dilakukan untuk menghindari efek putaran balik dari sudu turbin angin Savonius.

Hasil ukur yang didapatkan pada eksperimen ini adalah nilai torsi statis dan torsi dinamis yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai *Coefficient of Static Torque*, *Coefficient of Moment*, dan *Coefficient of Power*. Torsi statis diukur dengan menggunakan dengan alat ukur *torquemeter*. Sedangkan untuk torsi dinamis diukur dengan menggunakan *brake dynamometer systems*. Gambar 3 menunjukkan pemasangan peralatan ukur torsi dinamis dalam *brake dynamometer systems*.

C. Perhitungan Performa Turbin

Turbin angin Savonius pada eksperimen ini dioperasikan pada kecepatan angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9m/s atau dalam bilangan Reynold $7,4 \times 10^4 - 17,5 \times 10^4$. Adapun perhitungan untuk mendapatkan nilai bilangan Reynold adalah sebagai berikut.

$$Re_L = \frac{\rho UL}{\mu} \tag{1}$$

dimana :

Re_L : Bilangan Reynolds

ρ : massa jenis fluida (kg/m³)

U : kecepatan fluida (m/s)

L : Panjang karakteristik (m)

μ : viskositas dinamik (Ns/m)

Panjang karakteristik yang digunakan dalam perhitungan bilangan Reynold adalah diameter turbin angin Savonius(L), yaitu $L = 2D-b-2t$.

Daya yang didapatkan turbin dari energi angin disebut dengan daya teoritis yang dihitung dengan persamaan:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3 \tag{2}$$

P_w merupakan daya teoritis turbin dalam satuan Watt dan A menyatakan luasan penampang yang dikenai angin (m²). Luasan penampang ini dapat dihitung dengan persamaan:

$$A = (2D-b-2t) H = L.H \tag{3}$$

L adalah diameter turbin angin Savonius dalam satuan m dan H adalah ketinggian dari turbin angin Savonius.

Selanjutnya untuk mendapatkan nilai daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$P_T = T_D \cdot \omega \tag{4}$$

P_T adalah daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dalam satuan Watt, T_D adalah nilai torsi dinamis (Nm) dan ω adalah kecepatan putar turbin angin Savonius (rad/s). Nilai torsi dinamis didapatkan dari *brake dynamometer systems*. Sistem pengukuran torsi dinamis ini dilakukan dengan mengukur selisih beban yang diberikan pada sistem dan dinyatakan dalam persamaan:

$$T_D = |m-s| g \cdot r \tag{5}$$

dimana m menyatakan massa pemberat(kg), s massa yang terbaca pada timbangan pegas(kg), g percepatan gravitasi (m/s²), dan r adalah jari-jari poros turbin yang menerima beban(m).

Tip speed ratio (λ) adalah perbandingan antara kecepatan tangensial dari turbin terhadap kecepatan angin. Berdasarkan pengertian tersebut, nilai dari *tip speed ratio* (λ) dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \tag{6}$$

dimana nilai R adalah panjang jari-jari turbin (m).

Performa turbin angin Savonius ditentukan dengan menghitung nilai *Coefficient of Moment* (C_M), *Coefficient of Power* (CoP), dan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}). Nilai *Coefficient of Moment* didapatkan dari perbandingan torsi dinamis terhadap nilai torsi teoritis dan dituliskan dalam persamaan :

$$C_M = \frac{T_d}{T_t} \tag{7}$$

dimana T_t merupakan nilai torsi teoritis dalam satuan Nm yang nilainya didapatkan dari persamaan :

$$T_t = \frac{P_w}{\omega} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R \tag{8}$$

sehingga, nilai C_M dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$C_M = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R} \tag{9}$$

Nilai CoP didapatkan dari perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh rotor turbin terhadap daya yang didapatkan dari angin atau dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut.

$$CoP = \frac{P_T}{P_w} \tag{10}$$

$$CoP = \frac{|m-s| g \cdot r \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3} \tag{11}$$

Parameter terakhir, yaitu nilai *Coefficient of Static Torque* didapatkan dari perbandingan torsi statis terhadap torsi teoritis, atau dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$C_{TS} = \frac{T_s}{T_t} \tag{12}$$

$$C_{TS} = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R} \tag{13}$$

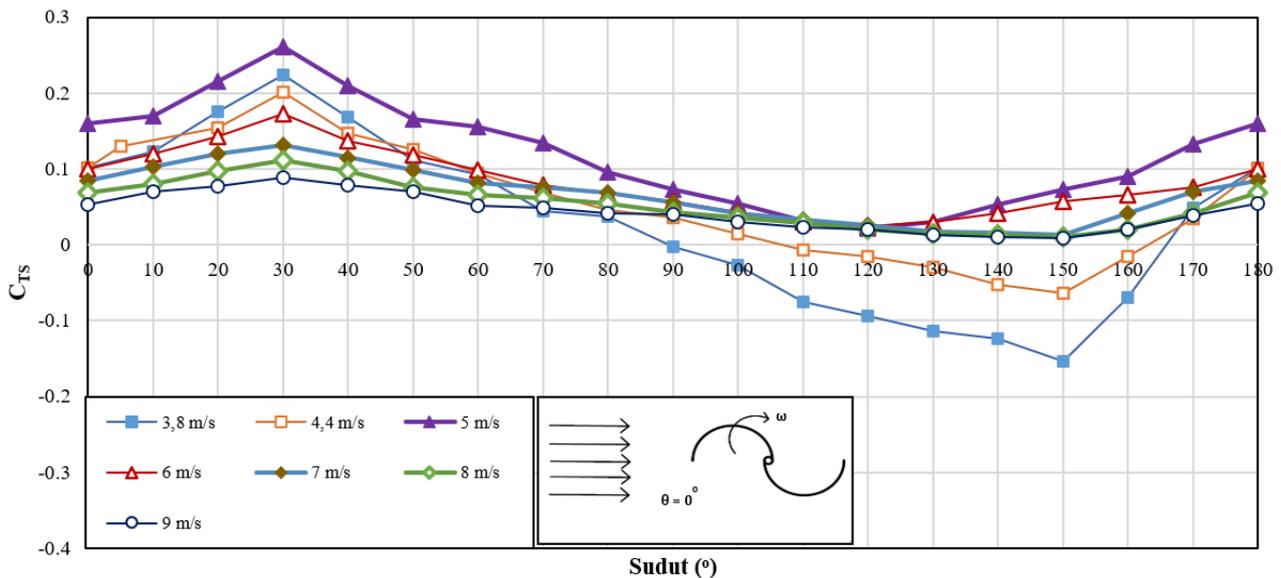
III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

Analisa ini digunakan untuk mengetahui kondisi awal dari turbin angin Savonius yang kemudian dijadikan pembanding dengan performa setelah diberikan silinder pengganggu. Adapun hasil analisa yang didapatkan adalah :

1) Analisa Nilai Coefficient of Moment Tanpa Pengganggu (C_{M0}) Fungsi Tip speed ratio (λ)

Analisa pertama pada performa turbin angin tanpa pengganggu adalah nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* mengalami penurunan seiring dengan kenaikan nilai



Gambar 9. Grafik *Coefficient of Static Torque* turbin angin Savonius dengan pengganggu fungsi sudut

tip speed ratio. Nilai C_{M0} maksimum didapatkan pada *tip speed ratio* bernilai 0, yaitu ketika pembebanan maksimum sehingga turbin angin Savonius berhenti. Sedangkan nilai C_{M0} minimum didapatkan pada saat nilai *tip speed ratio* maksimum, yaitu ketika turbin angin Savonius belum diberikan beban pada *brake dynamometer systems*.

Selain dipengaruhi oleh pembebanan yang diberikan, nilai C_{M0} juga dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin yang digunakan. Dari variasi kecepatan angin yang digunakan pada eksperimen ini, didapatkan nilai kecepatan optimum, yaitu pada 7m/s. Nilai kecepatan terlalu kecil akan menyebabkan putaran poros turbin kecil, sehingga nilai torsi dinamis kecil dan C_{M0} akan kecil. Akan tetapi, kecepatan angin yang terlalu tinggi akan menyebabkan kerugian mekanis pada turbin angin Savonius semakin meningkat dan nilai C_{M0} turun setelah melewati kecepatan optimum.

2) *Analisa Coefficient of Power Tanpa Silinder Pengganggu (CoP0) Sebagai Fungsi Tip speed ratio (λ)*

Analisa berikutnya adalah analisa nilai *Coefficient of Power* terhadap nilai dari *tip speed ratio* yang ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai *Coefficient of Power* pada semua kecepatan berbentuk parabolik terbuka ke bawah, dimana nilai CoP meningkat sampai pada titik tertentu dan kemudian akan turun kembali. Nilai CoP maksimal didapatkan pada saat nilai *tip speed ratio* optimum yang berada di sekitar nilai 0,6. Pada eksperimen ini, variasi nilai *tip speed ratio* ditentukan dengan pemberian beban pemberat pada sistem *brake dynamometer*. Pembebanan yang terlalu kecil menyebabkan nilai torsi dinamis kecil dan nilai CoP rendah. Akan tetapi, pembebanan terlalu tinggi akan menyebabkan kerugian mekanis yang semakin besar, sehingga performa turbin angin Savonius turun.

Nilai CoP_0 juga dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin. *Trendline* nilai CoP_0 paling tinggi didapatkan pada kecepatan optimum, yaitu 7 m/s untuk hasil eksperimen ini. Peningkatan kecepatan angin yang diberikan hanya akan meningkatkan nilai performa turbin angin Savonius sampai pada kecepatan optimum. Hal ini disebabkan peningkatan kecepatan angin akan menyebabkan turbin angin bersifat *solid wall*, sehingga fluida tidak sempurna mencapai sudu-sudu turbin.

3) *Analisa nilai Coefficient of Statis Torque Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CTS0) Fungsi Sudu Turbin (θ)*

Gambar 6 menunjukkan adanya daerah dengan *Coefficient of Static Torque* negatif yang merupakan daerah turbin angin Savonius tidak memiliki *self starting*, maka untuk memutar turbin pada sudut tersebut membutuhkan gaya tambahan dari luar.

Berdasarkan data hasil pengukuran dan perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque* pada variasi kecepatan 3,8-9m/s, *trendline* tertinggi terjadi pada kecepatan 5m/s. Adanya nilai kecepatan optimum ini karena kecepatan angin yang terlalu rendah menyebabkan gaya *drag* angin kecil, sehingga nilai torsi statis angin kecil dan *Coefficient of Static Torque* kecil. Akan tetapi kecepatan angin yang terlalu tinggi menyebabkan *torquemeter*, yaitu alat ukur torsi statis kesulitan untuk mengunci poros turbin hingga benar-benar diam dan menyebabkan hasil pembacaan alat ukur kurang stabil.

B. *Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu*

1) *Analisa Nilai Coefficient of Moment maksimal dengan Pengganggu (CM) Fungsi Kecepatan Angin (U)*

Gambar 7 menunjukkan bahwa nilai *Coefficient of Moment* pada turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu memiliki nilai maksimum pada kecepatan yang optimum. Nilai kecepatan optimum untuk turbin tanpa pengganggu adalah 7m/s, sementara untuk turbin dengan pengganggu pada kecepatan 5m/s.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D=1,8 di depan *returning blade* ini terbukti efektif menaikkan nilai *Coefficient of Moment* pada semua variasi kecepatan yang digunakan. Perbedaan nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa silinder pengganggu paling besar terjadi pada kecepatan 3,8 m/s dan selisih paling kecil pada kecepatan 9m/s. Pada kecepatan 3,8 m/s, nilai $C_{M0} = 0,0985$ dan $C_M = 1,8905$ dengan kenaikan nilai maksimal tertinggi yang didapatkan sebesar 89,05%. Sedangkan kenaikan nilai pada kecepatan 9m/s sebesar 6%.

2) Analisa Nilai Coefficient of Power maksimal dengan Pengganggu (CoP) Fungsi Kecepatan Angin (U)

Analisa performa yang kedua adalah analisa nilai *Coefficient of Power* maksimal dengan dan tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi kecepatan. Hasil analisa ini ditunjukkan pada Gambar 8, dimana *trendline* keduanya memiliki bentuk parabolik. Titik puncak CoP untuk turbin angin tanpa pengganggu berada pada nilai kecepatan 7m/s, sedangkan untuk turbin angin dengan pengganggu pada kecepatan 5/s. Penggunaan silinder pengganggu ini juga terlihat dapat menaikkan nilai *Coefficient of Power* maksimal dari turbin angin Savonius untuk semua variasi kecepatan, sehingga penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D=1,8 ini efektif diberikan di depan *returning blade*.

Pada kecepatan 3,8 m/s terlihat perbedaan paling jauh untuk nilai *Coefficient of Power* dengan dan tanpa penggunaan silinder pengganggu pada variasi kecepatan yang digunakan. Nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu pada kecepatan 3,8 m/s bernilai 0,032, sementara setelah diberikan silinder pengganggu menjadi 0,087 atau terdapat kenaikan nilai CoP maksimal yang tertinggi sebesar 168,1%. Sedangkan kenaikan nilai CoP_{maks} terendah terjadi pada kecepatan 7m/s, yaitu dengan kenaikan 7%.

3) Analisa Nilai Coefficient of Static Torque dengan Pengganggu (CTS) Fungsi Kecepatan Angin (U)

Gambar 9 menunjukkan grafik nilai *Coefficient of Static Torque* sebagai fungsi sudut pada variasi kecepatan 3,8 – 9m/s turbin dengan memberikan silinder pengganggu. Apabila dibandingkan dengan grafik tanpa penggunaan silinder pada Gambar 6, nilai C_{TS} dengan pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi. Kenaikan nilai ini membuktikan bahwa adanya silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak S/D=1,8 efektif diberikan.

Pada variasi kecepatan 5-9 m/s terlihat bahwa tidak adanya daerah dengan nilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan silinder pengganggu mampu menjadikan turbin angin Savonius memiliki *self starting* di setiap sudut pada kecepatan lebih dari 5m/s.

IV. KESIMPULAN

Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti mampu menaikkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai C_{Mmax} pada semua variasi kecepatan. Peningkatan nilai C_{Mmax} tertinggi didapatkan pada kecepatan 3,8 m/s, yaitu dengan kenaikan 89,05%. Sedangkan untuk peningkatan C_{Mmax} terendah didapatkan pada kecepatan 9 m/s, yaitu dengan kenaikan 6%.

Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti mampu menaikkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai CoP_{max} pada semua variasi kecepatan. Kenaikan CoP_{max} paling tinggi pada

kecepatan 3,8 m/s, yaitu dengan kenaikan 168,1%. Sedangkan kenaikan CoP_{max} terendah pada kecepatan 7 m/s, yaitu dengan kenaikan 7%.

Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti mampu menaikkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai *Coefficient of Static Torque* pada semua variasi kecepatan. Pada kecepatan 5-9 m/s, penggunaan silinder pengganggu menjadikan *Coefficient of Static Torque* bernilai positif di semua sudut, sehingga memiliki kemampuan *self starting* di semua posisi sudu.

Turbin angin Savonius yang digunakan ini memiliki karakteristik menghasilkan performa paling tinggi pada kecepatan 5 m/s untuk pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* jarak S/D = 1,8 dan y/D = 0,5.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, and M. H. Nasef, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance," *Alexandria Eng. J.*, vol. 51, no. 1, pp. 19–25, 2012, doi: 10.1016/j.aej.2012.07.003.
- [2] B. D. Altan, M. Atilgan, and A. Özdamar, "An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 32, no. 8, pp. 1673–1678, 2008, doi: 10.1016/j.expthermfluidsci.2008.06.006.
- [3] M. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, and D. Thévenin, "Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 2618–2626, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2010.04.007.
- [4] G. Sakti, T. Yuwono, and W. A. Widodo, "Experimental and numerical investigation of I-65⁰ type cylinder effect on the Savonius wind turbine performance," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 19, no. 5, pp. 115–125, 2019.
- [5] T. Tsutsui and T. Igarashi, "Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 90, no. 4–5, pp. 527–541, 2002, doi: 10.1016/S0167-6105(01)00199-4.
- [6] R. D. Pamungkas and T. Yuwono, "Studi eksperimen pengaruh silinder pengganggu di depan returning blade turbin angin Savonius terhadap performa turbin " Studi kasus untuk rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D) = 0,75 ";," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. B599–B603, 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.20156.
- [7] A. A. Pradhito, "Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu di depan Returning Blade Turbin Angin Savonius terhadap Performa Turbin. Studi Kasus d/D=0,5; Jarak S/D = 1,5 – 2,4; dengan Bilangan Reynolds = 3,0×10⁴; 6,0×10⁴; dan 9,0×10⁴," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [8] J. A. Rustam, "Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius "Studi Kasus d/D = 0,5; S/D = 2,0; dengan Bilangan Reynolds = 9,7 x 10⁴; 14,5 x 10⁴; 17,8 x 10⁴; y/D = 0,0; 0,25; 0,5," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [9] G. Bagas, "Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular di depan Returning Blade. Studi Kasus d/D=0,5; y/D=0,5; S/D = 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; dengan Bilangan Reynolds= 96000, 134000, dan 173000," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.
- [10] M. Sarsanto, "Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu di depan Returning Blade. Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu S/D=1,8; y/D=0,5; d/D=0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0; pada Bilangan Reynolds= 9,7×10⁴," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2020.