

Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular di Depan *Returning Blade* Turbin Pada Jarak $S/D = 2,4$

Michael Lawrence Budihartono dan Tri Yogi Yuwono
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Turbin Savonius adalah salah satu turbin yang dapat memanfaatkan potensi energi angin di Indonesia dengan mengubah gaya dari hembusan angin menjadi energi listrik. Karena efisiensinya rendah maka diperlukan penelitian untuk meningkatkan kinerja Turbin Savonius. Studi eksperimen Turbin Savonius dengan pemasangan silinder penghalang di depan *returning blade* dilakukan sebagai salah satu cara untuk meningkatkan performa turbin. Studi eksperimen ini menggunakan instalasi Turbin Savonius yang memiliki 2 sudu dengan panjang karakteristik efektif sapuan angin (L) sebesar 309 mm. Pengganggu yang digunakan berbentuk silinder dengan rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin $d/D = 0,5$ Angin berasal dari *axial fan* yang kecepatannya diatur oleh *voltage regulator*; serta dibantu oleh *honeycomb* di depannya untuk menciptakan aliran *uniform*. Variasi pada rasio jarak dari titik pusat pengganggu sampai titik pusat turbin terhadap diameter sudu turbin $S/D = 2,4$, dan variasi kecepatan angin sebesar 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 m/s. Untuk mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer, untuk mengukur putaran turbin menggunakan *tachometer*, dan untuk mengukur torsi statis menggunakan *torquemeter*. Digunakan instalasi *brake dynamometer* untuk mengukur torsi dinamis turbin dengan menggunakan beban pemberat. Hasilnya didapatkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan jarak $S/D = 2,4$ pada turbin mampu menghasilkan peningkatan performa turbin Savonius pada seluruh variasi kecepatan angin. CoP tertinggi yang dihasilkan pada kecepatan angin 6 m/s, dengan kenaikan CoP sebesar 11,65% dari 0,0724 menjadi 0,0808 pada TSR 0,78; dan C_M yang dihasilkan naik sebesar 21,7 % dari 0,1381 menjadi 0,168 pada TSR 0. Selain itu pemberian silinder pengganggu juga meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* (C_t) turbin pada seluruh variasi kecepatan meskipun masih terdapat beberapa nilai C_t yang negatif pada sudut turbin tertentu.

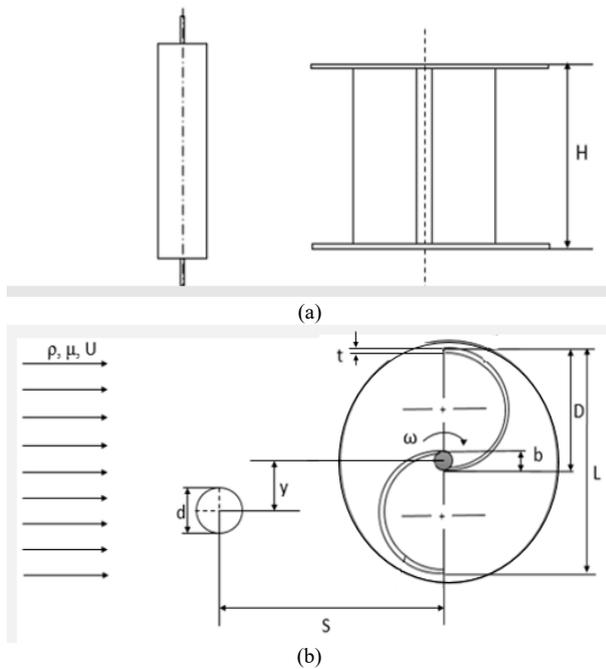
Kata Kunci—*Coefficient of Power, Coefficient of Moment, Silinder Pengganggu, Static Torque Coefficient.*

I. PENDAHULUAN

MENIPISNYA pasokan batu bara di dunia mengharuskan kita mencari sumber energi alternatif lain. Energi terbarukan dapat menjadi alternatif, dan salah satunya adalah energi angin. Turbin Savonius merupakan salah satu mesin konversi energi yang dapat memanfaatkan energi angin. Turbin Savonius ini memiliki bentuk sudu yang menyerupai huruf “S” yang memungkinkan turbin ini menerima energi angin dari segala arah dan dengan kecepatan yang rendah. Cara kerja turbin jenis ini adalah dengan

menggunakan prinsip perbedaan gaya *drag* yang dihasilkan pada masing-masing sudu turbin yang berbentuk cembung (*advancing blade*) dan cekung (*returning blade*) dari aliran angin yang selanjutnya menghasilkan perbedaan torsi dan membuat rotor turbin berputar. Putaran rotor turbin ini kemudian diubah oleh generator menjadi energi listrik. Kelemahan dari Turbin Savonius ini adalah memiliki efisiensi paling rendah (di kisaran 10-20% saja), oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan efisiensi dari turbin angin tipe Savonius ini. Pada penelitian kali ini akan digunakan silinder penghalang sebagai variasi penelitian untuk meningkatkan performa turbin.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh [1], penelitian dilakukan untuk membandingkan performa turbin Savonius tanpa dan menggunakan silinder pengganggu. Digunakan variasi jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 2,4 dan variasi bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$, dengan variasi rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,1 – 1,0. Hasil eksperimen tersebut menunjukkan bahwa dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berukuran (d/D) = 0,5 di depan *returning blade* pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ adalah yang paling efektif meningkatkan performa turbin. Kemudian penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh [2] dimana untuk meningkatkan performa turbin, digunakan variasi pada jumlah sudu (2,3, dan 4 sudu), *stage* turbin (*single* dan *double stage*), *overlap ratio* (β) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35, *aspect ratio* (α) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5, dan ada tidaknya *end plate*. Hasil penelitian tersebut adalah bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 2 lebih efisien dibandingkan dengan sudu 3 atau 4; turbin angin dengan *double stages* lebih efisien dibandingkan dengan *single stage*, kemudian turbin dengan *end plates* lebih efisien dibandingkan tanpa *end plates*. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh [3] penelitian secara studi eksperimen dan simulasi numerik ini dilakukan untuk membandingkan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan menggunakan silinder pengganggu tipe I-65°. Digunakan variabel jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 1,4 dan variasi bilangan Reynolds = $9,9 \times 10^4$. Hasil eksperimen tersebut menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu tipe I-65° efektif meningkatkan performa turbin. Turbin Savonius dengan silinder pengganggu tipe I-65° memiliki performa yang lebih baik

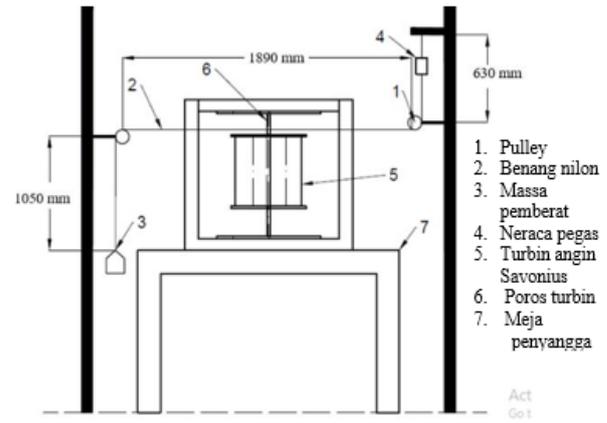


Gambar 1. Turbin Savonius (a) Tampak Samping (b) Tampak Atas.

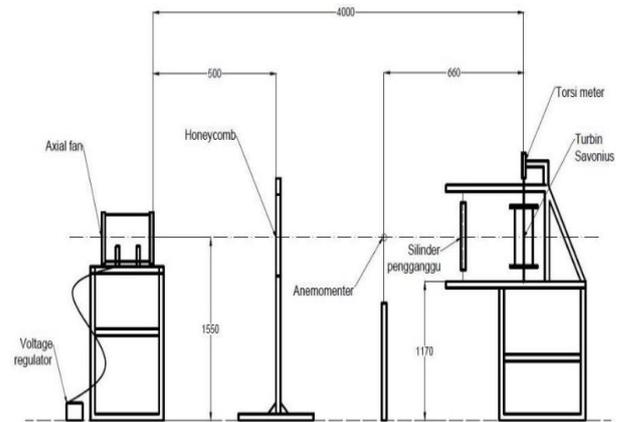
Tabel 1.
Hasil Perhitungan *Uncertainty* Pengukuran

Parameter	<i>Uncertainty</i> (%)
Tip Speed Ratio (λ)	0,68%
Coefficient of Moment (C_M)	5,53%
Coefficient of Power (CoP)	5,57%
Reynolds Number (Re)	1,436%

dimana *Power Coefficient* turbin mengalami kenaikan sebesar 23,61 % (secara eksperimen) dan 25,32 % (secara simulasi numerik) dibanding saat sebelum diberi silinder pengganggu. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh [4], mengenai aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder sirkular lain. Variasi yang digunakan adalah variasi jarak antara kedua pusat silinder (L/D), diameter silinder pengganggu dan harga bilangan Reynolds pada rentang $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$. Hasil penelitian ini adalah bahwa penambahan silinder pengganggu dengan variasi bilangan Reynolds (Re) serta variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar *wake* di belakang silinder sirkular utama semakin menyempit. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh [5], menggunakan penghalang berupa silinder yang diletakkan di depan silinder sirkular utama yang berdiameter $D = 60$ mm dan mengamati pengaruhnya terhadap pengurangan gaya drag pada bagian *advancing blade* sehingga torsi yang dihasilkan meningkat. Rasio jarak antara titik pusat silinder penghalang dengan titik pusat silinder sirkular terhadap diameter silinder utama (L/D) yang digunakan pada percobaan ini bervariasi antara 1.5-4, dan variasi rasio silinder penghalang dibanding silinder utama yaitu (d/D) 0,1-0,5. Selain itu divariasikan juga posisi sudut silinder pengganggu terhadap sumbu horizontal yaitu $\alpha = 0^\circ - 45^\circ$. Penelitian dilakukan pada *open circuit wind tunnel* dengan bilangan Reynolds 82000. Hasil dari penelitian tersebut yaitu didapatkan nilai optimum pengurangan drag yang terjadi pada $d/D = 0,5$ dengan susunan tandem $\alpha=0^\circ$. Pengurangan nilai drag dengan menggunakan silinder penghalang tersebut sebesar 2,34% dibandingkan dengan



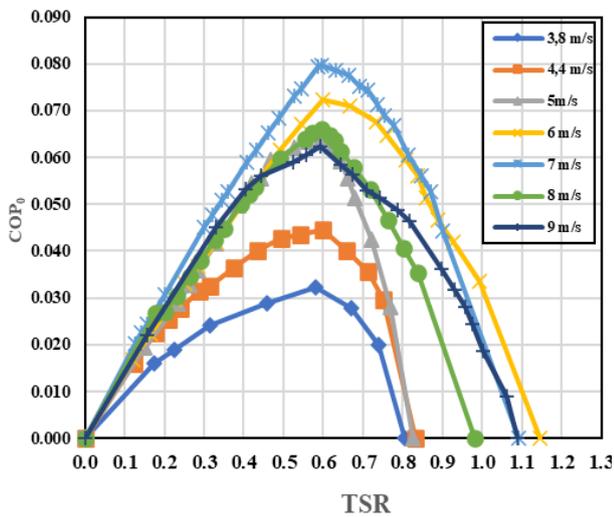
Gambar 2. Skema Brake Dynamometer



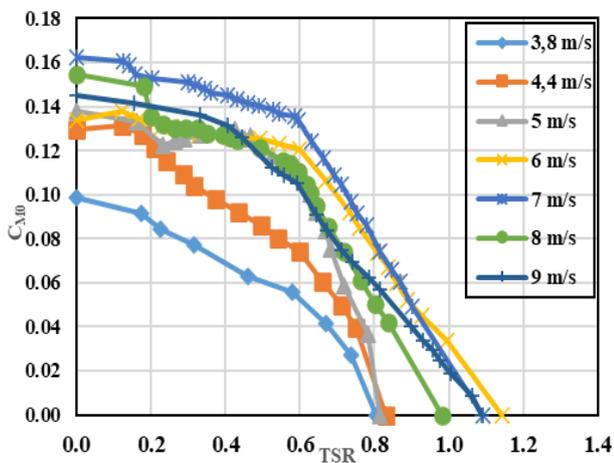
Gambar 3. Skema Penelitian

tanpa silinder penghalang. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh [6], untuk meneliti pengaruh pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius terhadap performa turbin tersebut. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D) = 0,5 ; dan nilai $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$. dan dengan rasio jarak posisi pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 2,0. Penelitian dilakukan pada *open circuit wind tunnel* dengan variasi Bilangan Reynolds $Re = 9,7 \times 10^4; 14,5 \times 10^4; 17,8 \times 10^4$. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemberian pengganggu efektif meningkatkan performa turbin, dimana performa terbaiknya didapatkan pada (y/D) = 0,5 pada $Re = 9,7 \times 10^4$, dengan *Coefficient of Power* (CoP) yang meningkat 1,062 kali dan *Coefficient of Moment* (C_M) meningkat 1,041 kali dibandingkan dari tanpa silinder pengganggu

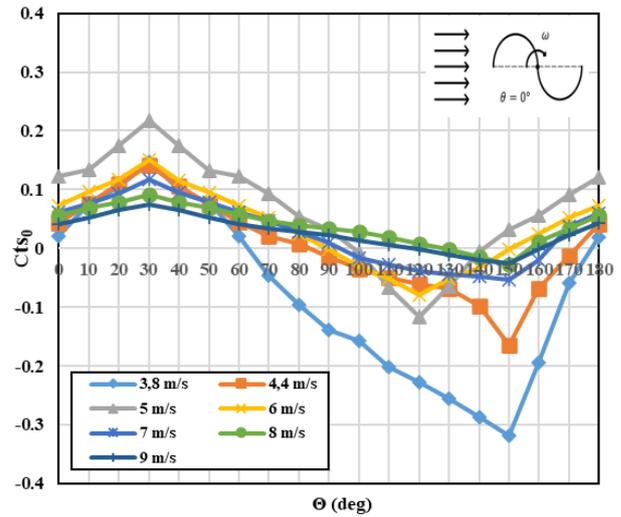
Secara umum tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemberian silinder pengganggu dengan jarak $S/D = 2,4$ terhadap peningkatan performa Turbin Savonius pada variasi kecepatan angin yang diberikan. Secara teori diduga ketika silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* maka saat dialiri angin akan terbentuk *shear layer* pada silinder pengganggu tersebut. *Shear layer* ini kemudian jatuh di permukaan *returning blade* sehingga mempengaruhi bentuk *boundary layer* aliran angin pada permukaan *returning blade*, dimana lebih cepat terbentuk *turbulent boundary layer* pada *returning blade* sehingga titik separasi mundur dan menyebabkan *wake* yang terbentuk menyempit. Hal ini akan menghasilkan gaya drag pada



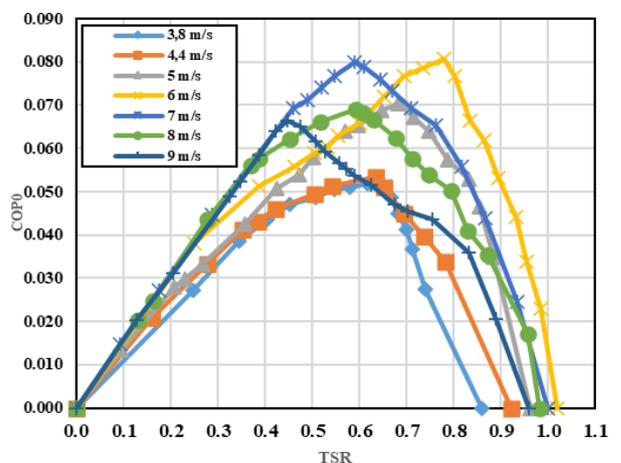
Gambar 4. Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*.



Gambar 5. Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*



Gambar 6. Grafik *Static Torque Coefficient* Turbin Angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*



Gambar 7. Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius dengan pengganggu sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*

returning blade akan lebih kecil sehingga meningkatkan selisih torsi antara kedua sudu dan menghasilkan peningkatan performa turbin.

II. METODOLOGI PENELITIAN

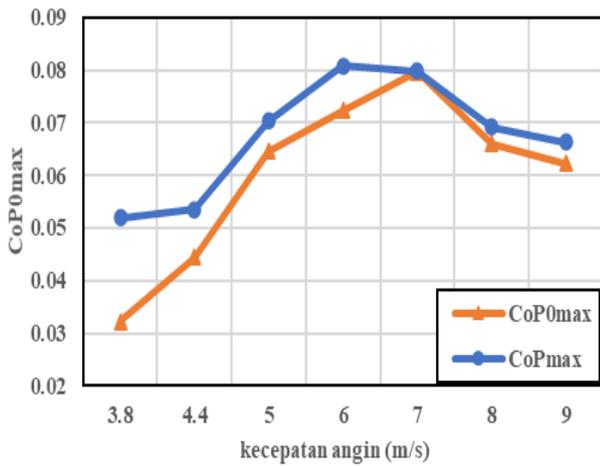
A. Skema Penelitian, Benda Uji, dan Alat Pengukuran

Geometri Turbin Savonius yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1. Turbin Savonius yang digunakan pada penelitian ini dibuat dari pipa *polyvinyl chloride* (PVC). Turbin Savonius ini memiliki Diameter sudu (D) 167,1 mm; Tinggi (H) 298 mm, diameter poros (b) 19,56 mm; diameter *endplate* 321 mm, tebal sudu turbin (t) 2,95 mm; panjang karakteristik ($L = 2D - b - 2t$) 309 mm. Silinder pengganggu yang digunakan juga terbuat dari PVC serta memiliki diameter (d) 88,8 mm dan tinggi 500 mm sehingga rasio d/D didapatkan 0,53 dan dibulatkan menjadi 0,5. Rasio d/D = 0,5 dipilih karena berdasarkan penelitian Prabasworo Drestanto [1], turbin dengan dimensi yang sama menghasilkan performa terbaik pada rasio d/D = 0,5. Rasio y/D = 0,5 dipilih karena berdasarkan penelitian Rustam [6], turbin dengan dimensi yang sama menghasilkan performa terbaik juga pada rasio y/D = 0,5. Kemudian turbin diletakkan pada rasio jarak pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin S/D = 2,4.

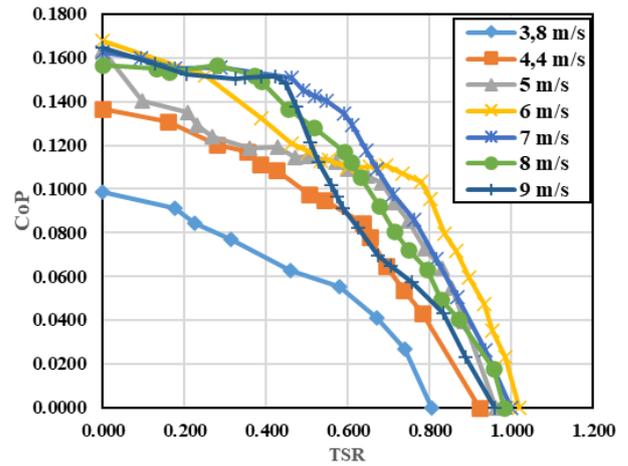
Selain itu juga digunakan skema *brake dynamometer* yang ditunjukkan oleh Gambar 2, yang terdiri dari komponen-komponen seperti : neraca pegas dan beban pemberat yang dihubungkan dengan benang nilon dengan diameter 0,3 mm yang juga diselubungkan pada poros turbin ,dan instalasi katrol untuk memudahkan pergerakan benang nilon tersebut.

Skema penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3. Digunakan *axial fan CKE SPV-18* sebagai sumber aliran angin yang diletakkan sejauh 4000 mm dari turbin. Di antara turbin dan *axial fan* terdapat *honeycomb* dengan *meshing size* sebesar 0,0248 lubang/mm² untuk menguniformkan aliran angin. Anemometer diletakkan pada posisi 4D atau sekitar 660 mm dari turbin.

Alat-alat ukur yang digunakan antara lain Anemometer tipe **Omega HHF141** untuk mengukur kecepatan angin. Lalu Tachometer yang digunakan untuk mengukur kecepatan putar turbin yakni **Tachometer Omega HHT12** dengan akurasi pembacaan 0.01% dan range pengukuran antara 5 sampai 999.99 rpm. Torsi statis turbin diukur dengan **Torquemeter LUTRON model TQ-8800** dengan akurasi hingga 0,01 Ncm. Lalu **Voltage Regulator Model TDGC 2J-3** untuk mengatur tegangan dan mengatur kecepatan putar *axial fan*. Kemudian Neraca Pegas yang digunakan pada penelitian ini adalah merk **Nagata** dengan beban maksimal 3 kg dan dengan ketelitian 10 gram. Kemudian massa pemberat



Gambar 8. Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* maksimum Turbin Savonius Tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai fungsi kecepatan angin



Gambar 9. Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius dengan pengganggu sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*

yang digunakan pada penelitian ini bervariasi antara 3-20 gram.

B. Metode Pengukuran dan Pengambilan Data

Pada penelitian ini dilakukan dua macam pengukuran yaitu pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan turbin Savonius menggunakan skema *Brake dynamometer* dan pengukuran torsi statis dengan *torquemeter*. Ketika turbin berputar dengan kecepatan angin dan kecepatan putar tertentu dan diberi pembebanan dengan massa pemberat maka akan terbaca beban pada neraca pegas sehingga didapatkan selisih keduanya. Kemudian data-data tersebut diolah sehingga mendapatkan torsi dinamis turbin, yang kemudian dapat dihitung pula *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment*. Massa variasi beban pemberat ditambah hingga turbin berhenti berputar. Kemudian dengan menggunakan *Torquemeter*, dilakukan pengukuran torsi statis turbin dengan mencengkeramkan *torquemeter* pada poros turbin sembari dialiri angin, maka akan terbaca nilai torsi statisnya yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient*. Daya Aktual turbin dapat dirumuskan sebagai:

$$P_T = T_D \cdot \omega \tag{1}$$

Dimana T_D adalah torsi dinamis yang dihasilkan turbin (N.m) dan ω adalah kecepatan angular turbin (rad/s). Torsi dinamis sendiri didapatkan dengan persamaan berikut

$$T_D = F \cdot r \tag{2}$$

$$= |m - s| \cdot g \cdot r \tag{3}$$

Dimana r adalah radius *pulley*, m adalah massa beban pemberat (gr), dan s adalah beban pada neraca pegas (gr). Nilai m dan s selanjutnya dikonversi ke satuan kilogram. Daya Teoritis turbin dapat dirumuskan sebagai :

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A U^3 \tag{4}$$

Dimana U adalah kecepatan angin (m/s). Lalu *swept area* turbin dirumuskan sebagai berikut:

$$A = L \cdot H \tag{5}$$

Selanjutnya dapat dihitung *Coefficient of Power* sebagai rasio daya *output*/daya actual terhadap daya *input*/daya teoritis

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} \tag{6}$$

$$= \frac{|m-s| \cdot g \cdot r \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \tag{7}$$

Coefficient of Moment adalah rasio Torsi dinamis turbin terhadap torsi teoritis turbin yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$C_M = \frac{T_D}{T_t} \tag{8}$$

$$= \frac{T_D}{\frac{1}{4} \rho A U^2 L} \tag{9}$$

Coefficient of Static Torque adalah rasio torsi statis turbin terhadap torsi teoritis yang dihasilkan angin, yang dirumuskan :

$$C_{ts} = \frac{T_s}{T_t} \tag{10}$$

$$= \frac{T_D}{\frac{1}{4} \rho A U^2 L} \tag{11}$$

Saat melakukan penelitian, alat ukur memiliki ketelitian sehingga hasil yang ditunjukkan memiliki ketidakpastian (*uncertainty*). Perhitungan *uncertainty* yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui ukuran ketidakpastian pada suatu pengukuran dalam eksperimen. Dalam penelitian ini, setiap parameter yang dilakukan analisis perhitungan *uncertainty*, diambil dari data CoP maksimum Turbin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 5 m/s, yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

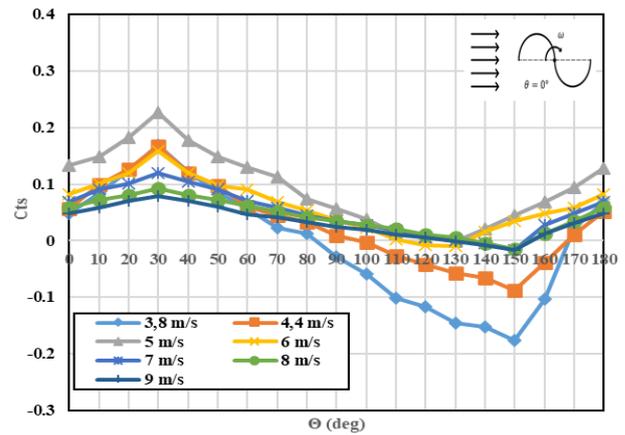
A. Performa Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4 menunjukkan grafik CoP turbin tanpa pengganggu pada 7 variasi kecepatan angin. Dapat dilihat bahwa performa turbin angin Savonius akan meningkat hingga pada nilai CoP maksimumnya pada TSR tertentu lalu kemudian akan turun. Selain itu nilai CoPmaks akan naik seiring meningkatnya kecepatan angin sampai nilai maksimumnya dan kemudian akan turun akan turun setelah melewati kecepatan angin optimumnya.

Hal ini terjadi karena secara matematis nilai CoP berbanding lurus terhadap peningkatan torsi dinamis dan berbanding terbalik dengan kecepatan angin fungsi pangkat

Tabel 2.
Perbandingan *Coefficient of Moment* maksimum Turbin Savonius Tanpa dan dengan Silinder Pengganggu

U (m/s)	C_M maks tanpa pengganggu	TSR	C_M maks dengan pengganggu	TSR	%naik
3,8	0.0985	0.175	0.1172	0	19.0
4,4	0.1313	0.123	0.1367	0	5.6
5	0.1379	0	0.1636	0	22.7
6	0.1381	0.121	0.168	0	21.7
7	0.1622	0	0.1625	0	1.1
8	0.1546	0	0.1565	0	4.9
9	0.1452	0	0.1645	0	16.1



Gambar 10. Grafik *Static Torque Coefficient* Turbin Angin Savonius dengan pengganggu sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*

tiga, sehingga ketika perubahan nilai kecepatan angin lebih signifikan maka CoP_{maks} nya akan turun. Selain itu juga terdapat factor *losses* yang turun hingga titik minimumnya pada saat CoP maksimum lalu kemudian *losses* yang terjadi bertambah sehingga menyebabkan CoP turbin turun. CoP maksimum turbin didapatkan pada kecepatan angin sebesar 7 m/s dengan nilai CoP maks sebesar 0,0797 pada $TSR = 0,591$.

Gambar 5 menunjukkan grafik C_M turbin tanpa pengganggu pada 7 variasi kecepatan angin. Bila ditinjau dari *trendline*, C_M turbin cenderung turun seiring bertambahnya nilai TSR ; dan nilai C_M maks akan naik seiring meningkatnya kecepatan angin sampai nilai maksimumnya dan kemudian akan turun akan turun setelah melewati kecepatan angin optimumnya. Hal ini terjadi karena secara matematis nilai C_M berbanding lurus terhadap peningkatan torsi dinamis dan berbanding terbalik dengan kecepatan angin fungsi kuadrat, sehingga ketika perubahan nilai kecepatan angin lebih signifikan maka C_M maksnya akan turun. Nilai C_M maks terbesar didapatkan pada kecepatan angin 7 m/s sebesar 0,1622 pada $TSR = 0$.

Gambar 6 menunjukkan grafik *Static Torque Coefficient* (Cts) turbin tanpa pengganggu pada 7 variasi kecepatan angin. Dapat dilihat bahwa *trendline* grafik berbentuk sinusoidal, dan dapat dilihat bahwa nilai koefisien torsi statis meningkat hingga sudut 30° kemudian turun hingga sudut 120° untuk kecepatan angin 5 dan 6 m/s, dan 150° pada kecepatan angin lainnya; kemudian kembali naik hingga sudut 180° . Nilai Cts maks yang diperoleh mengalami kenaikan seiring meningkatnya kecepatan angin sampai pada nilai maksimumnya pada kecepatan angin 5 m/s dan kemudian turun. Hal ini terjadi karena sebenarnya secara teori sudah sesuai dimana ketika kecepatan angin meningkat maka torsi statis yang dihasilkan juga meningkat, namun setelah kecepatan angin 5 m/s, peningkatan nilai torsi statis yang dihasilkan tidak sebanding dengan peningkatan kecepatan angin kuadrat sesuai rumus matematisnya sehingga menyebabkan nilai Cts nya turun. Nilai Cts tertinggi terdapat pada kecepatan angin 5 m/s dengan nilai maksimum pada sudut 30° sebesar 0,2174. Hal ini terjadi dikarenakan pada sudut tersebut gaya *drag* pada sisi *advancing blade* yang dihasilkan paling besar daripada sisi *returning blade*, sehingga menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang dihasilkan paling besar sehingga torsi statis dan Cts yang dihasilkan paling besar pula.

Gambar 7 dan 8 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) turbin setelah diberi pengganggu dan grafik perbandingan nilai CoP maks turbin tanpa dan dengan pengganggu pada 7 variasi kecepatan angin. Dapat disimpulkan bahwa setelah diberi silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin pada jarak $S/D = 2,4$; maka terjadi peningkatan *Coefficient of Power* pada semua variasi kecepatan angin sesuai teori dimana silinder pengganggu mampu mempercepat transisi *boundary layer* aliran angin yang melewati turbin menjadi *turbulent* sehingga mengecilkan bentuk *wake* yang timbul di *returning blade* turbin, dan menyebabkan peningkatan selisih torsi pada sudu-sudu turbin sehingga performanya meningkat. *Trendline* grafik yang dihasilkan juga berbentuk parabolik.

B. Performa Turbin Savonius dengan Silinder Pengganggu

Peningkatan CoP_{maks} Turbin Savonius terbesar terjadi pada kecepatan angin 3,8 m/s; dimana CoP maks turbin mengalami peningkatan sebesar 60,7% dari 0,0323 (3,23%) menjadi 0,0519 (5,19%) dan peningkatan CoP maks terkecil pada kecepatan angin 7 m/s sebesar 0,1% dari 0,0797 (7,97%) menjadi 0,0798 (7,98%). CoP maks turbin dengan pengganggu paling tinggi didapatkan pada kecepatan angin optimum 6 m/s sebesar 0,0808 (8,08%) pada $TSR = 0,78$.

Gambar 9 dan Tabel 2 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) turbin setelah diberi pengganggu dan tabel perbandingan nilai C_M maks turbin tanpa dan dengan pengganggu pada 7 variasi kecepatan angin.. Dapat disimpulkan bahwa setelah diberi silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin, maka terjadi peningkatan *Coefficient of Moment* pada semua variasi kecepatan angin sesuai teori dimana silinder pengganggu mampu mempercepat transisi *boundary layer* aliran angin yang melewati turbin menjadi *turbulen* sehingga mengecilkan bentuk *wake* yang timbul di *returning blade* turbin, dan menyebabkan peningkatan selisih torsi pada sudu-sudu turbin sehingga C_M turbin yang dihasilkan juga akan meningkat.

Trendline grafik yang dihasilkan juga turun seiring bertambahnya TSR . Peningkatan C_{Mmaks} Turbin Savonius terbesar terjadi pada kecepatan angin 5 m/s; dimana C_{Mmaks} turbin mengalami peningkatan sebesar 22,7% dari 0,1379 menjadi 0,1636 pada $TSR = 0$, dan peningkatan CoP maks terkecil pada kecepatan angin 7 m/s sebesar 1,1% dari 0,1622 menjadi 0,1625 pada $TSR = 0$. CoP maks turbin dengan

pengganggu paling tinggi didapatkan pada kecepatan angin optimum 6 m/s sebesar 0,168 TSR = 0.

Berdasarkan gambar 10 dapat disimpulkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius mampu meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient*. Seperti pada grafik Cts tanpa silinder pengganggu, grafik yang didapatkan berbentuk sinusoidal. Nilai Cts tertinggi tetap didapatkan pada kecepatan angin 5 m/s pada sudut 30°, dimana Cts nya mengalami kenaikan sebesar 4,42% dari 0,2174 menjadi 0,227. Secara keseluruhan pemberian silinder pengganggu pada jarak S/D = 2,4 relatif dapat meningkatkan nilai Cts turbin pada kecepatan angin yang relatif tinggi yaitu dari kecepatan 5 hingga 9 m/s karena hampir pada semua sudut memiliki nilai Cts positif yang menandakan bahwa turbin memiliki kemampuan *self starting*.

Sedangkan pada kecepatan angin 3,8 dan 4,4 m/s masih terdapat nilai Cts yang bernilai negatif pada *range* sudut turbin yang cukup signifikan yang menandakan bahwa turbin membutuhkan torsi di awal untuk dapat mulai berputar. Namun peningkatan nilai Cts turbin dengan jarak pengganggu S/D = 2,4 ini dapat dianggap tidak begitu signifikan karena jarak pengganggu yang dianggap terlalu jauh sehingga efek turbulensi tidak signifikan.

IV. KESIMPULAN

Turbin Savonius merupakan turbin yang cocok digunakan pada kondisi angin di Indonesia, dan bentuknya sederhana memudahkan dalam konstruksi meskipun efisiesinya rendah. Pada penelitian ini telah digunakan silinder pengganggu untuk meningkatkan performa turbin. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius dengan jarak S/D = 2,4 mampu meningkatkan nilai CoP maksimum turbin pada seluruh variasi kecepatan angin. CoP maksimum tertinggi turbin dengan pengganggu didapatkan pada kecepatan angin 6 m/s sebesar 0,0808 (8,08%) pada TSR = 0,78. *Coefficient of Moment* (C_M)

maksimum turbin juga meningkat pada seluruh variasi kecepatan angin dimana C_M maksimum tertinggi turbin dengan pengganggu didapatkan pada kecepatan angin 6 m/s sebesar 0,168 pada TSR = 0. Selain itu pemberian pengganggu juga meningkatkan *Static Torque Coefficient* turbin pada semua variasi kecepatan angin meskipun masih terdapat nilai torsi dan Cts yang negatif pada *range* sudut tertentu.

Ada baiknya menggunakan neraca pegas yang lebih teliti agar pembacaan beban lebih akurat sehingga hasil perhitungan yang didapatkan lebih tepat. Disarankan juga menggunakan komponen *bearing* yang tepat dan berkualitas tinggi agar dapat mengurangi beban putara turbin sehingga mengurangi *losses* yang terjadi pada turbin; serta diharapkan rutin melumasi *bearing* secara berkala.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Drestanto, "Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu di depan Sisi Returning Blade Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius "Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu S/D = 2,4; y/D = 0.5; d/D = 0,1;0,2;0,3;0,4;0,5;0,6;0,7;0,8;0," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J. J. Wang, P. F. Zhang, S. F. Lu, and K. Wu, "Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod," *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 76, no. 1, pp. 83–101, 2006, doi: 10.1007/s10494-005-9008-0.
- [6] 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.