

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

Dionisius Jeremia dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

Abstrak—Turbin angin Savonius dapat bergerak pada kecepatan angin rendah sehingga cocok dengan kondisi iklim di Indonesia, namun memiliki efisiensi terendah dibanding turbin jenis lainnya sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dari turbin ini. Eksperimen ini menggunakan turbin angin Savonius bersudu dua dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 167 mm, tinggi (H) sebesar 298 mm, diameter poros (b) sebesar 19 mm, dan diameter *end plate* (D_0) sebesar 320 mm. Penelitian ini menggunakan silinder pengganggu dengan diameter (d) sebesar 63 mm yang diletakkan di depan *returning blade* untuk mengurangi gaya *drag* pada *returning blade*. Angin berasal dari *axial fan* yang melewati *honeycomb* agar aliran udara menjadi *uniform*. *Voltage regulator* digunakan untuk mengatur kecepatan *axial fan*. Rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) adalah 0,5 dengan rasio jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (S/D) sebesar 2,2 dengan variasi kecepatan angin sebesar 3,8 m/s; 4,4 m/s; 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, 9 m/s. Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer, torsi dinamis diukur menggunakan *brake dynamometer*, *Coefficient of Static Torque* diukur menggunakan *torque meter* dan putaran turbin diukur menggunakan *tachometer*. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin pada posisi $S/D = 2,2$ efektif meningkatkan *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment*, dan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius pada kecepatan angin 3,8 m/s hingga 9 m/s.

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

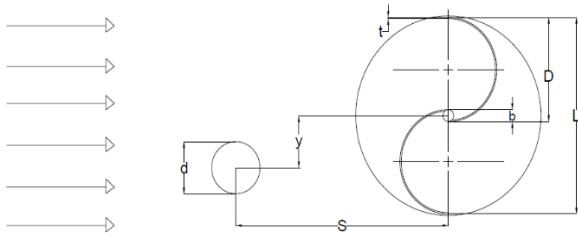
I. PENDAHULUAN

BERDASARKAN laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) pada tahun 2018 tentang pemanasan global, ketersediaan karbon dioksida dunia yang berhubungan dengan energi akan habis selambat-lambatnya pada 2030. Untuk mengembalikan dunia ke jalan yang sudah ditetapkan pada Persetujuan Paris (Persetujuan Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang perubahan iklim), emisi tahunan dunia harus berkurang sebesar 3.5% setiap tahunnya dari sekarang hingga tahun 2050 dan seterusnya. Energi terbarukan mampu memberikan 75% reduksi emisi tersebut. Indonesia memiliki kapasitas energi angin sebesar 9.29 GW, namun kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Bayu yang ada di Indonesia masih sangat rendah, yaitu 3,1 MW. Kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 4 m/s hingga 6 m/s. Turbin angin Savonius, turbin yang termasuk kategori *Vertical Axis*

Wind Turbine, bergerak tidak bergantung pada arah angin serta dapat bergerak pada kecepatan angin rendah. Karakteristik ini cocok dengan kondisi iklim di Indonesia. *Coefficient of Power* (C_{op}) turbin angin Savonius relatif rendah ($C_{op} \approx 15\%$). Walau demikian, turbin angin Savonius dapat digunakan sebagai penggerak turbin angin tipe lain yang memiliki torsi awal penggerak turbin yang rendah.

N.H. Mahmoud, et al (2010) melakukan penelitian menggunakan turbin angin Savonius dengan geometri yang berbeda untuk menentukan parameter operasional yang paling efektif. Parameter yang dipelajari pada penelitian ini adalah banyak sudu yaitu 2; 3; 4; banyak *stages* pada turbin yaitu *single stage* dan *double stages*, *overlap ratio* sebesar 0 hingga 0,35, *aspect ratio* sebesar 0,5 hingga 5, dan keberadaan dari *end plates*. Penelitian ini memberikan hasil yaitu turbin dengan sudu sebanyak dua lebih efisien dibandingkan turbin dengan sudu tiga dan sudu empat. Turbin dengan *end plates* memiliki efisiensi lebih tinggi dibanding turbin tanpa *end plates*. Performa turbin *double stages* lebih tinggi dibanding turbin *single stage*. Turbin tanpa *overlap ratios* beroperasi lebih baik daripada turbin dengan *overlap ratio*. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa *power coefficient* meningkat seiring dengan meningkatnya *aspect ratio* [1].

Burçin Deda Altan, et al (2008) melakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan menggunakan penghalang. Penghalang diletakkan di depan turbin untuk mencegah torsi negatif pada arah berlawanan dari rotasi turbin. Parameter yang dipelajari pada penelitian ini adalah panjang dari penghalang (l_1 dan l_2) dan sudut penghalang (α dan β). Parameter – parameter tersebut dipelajari pengaruhnya terhadap torsi, daya, dan *power coefficient* turbin. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis konfigurasi penghalang, yaitu penghalang 1 dengan l_1 sepanjang 45 cm dan l_2 sepanjang 52 cm, penghalang 2 dengan l_1 sepanjang 34 cm dan l_2 sepanjang 39 cm, dan penghalang 3 dengan l_1 sepanjang 22 cm dan l_2 sepanjang 26 cm. Variasi sudut penghalang α adalah 30° hingga 60° dengan kenaikan sebesar 5° dan variasi sudut penghalang β adalah 0° hingga 30° . Penelitian ini memberikan hasil yaitu sudut optimum penghalang adalah $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. *Power coefficient* tertinggi didapatkan pada konfigurasi penghalang 1, yaitu penghalang dengan l_1 sepanjang 45 cm dan l_2 sepanjang 52 cm. Walaupun penghalang 2 dan 3 tidak menghasilkan *power coefficient* sebesar penghalang 1, penghalang – penghalang tersebut memberikan *power*



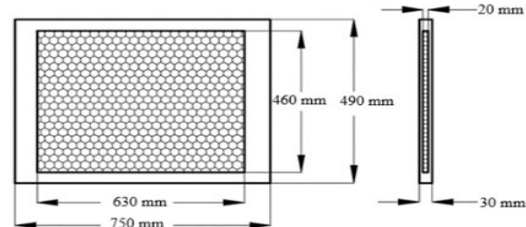
Gambar 1. Skema Penelitian Tampak Atas



Gambar 2. Turbin Angin Savonius



Gambar 3. Silinder pengganggu



Gambar 4. Honeycomb

coefficient C_t lebih besar dibandingkan turbin angin Savonius tanpa penghalang ($C_p = 16\%$) [2].

Fikri Amrul Alimin Mudjahidin (2019), melakukan penelitian untuk meningkatkan kinerja turbin angin Savonius dengan penempatan silinder sirkular di depan *returning blade* turbin. Penelitian dilakukan menggunakan turbin angin Savonius dengan dua sudu dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 165,2 mm, tinggi (H) sebesar 213 mm, diameter poros (b) sebesar 19 mm, dan diameter *end plate* (D_0) sebesar 321 mm. Penelitian ini menggunakan pengganggu berbentuk silinder dengan diameter (d) sebesar 82,6 mm dan tinggi (t) sebesar 500 mm. Pengganggu tersebut diletakkan di depan *returning blade* untuk mengurangi gaya *drag* pada sisi *returning blade* turbin angin Savonius. Rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin d/D yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 0,5 dan variasi jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin S/D sebesar 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8 dengan variasi bilangan Reynolds sebesar 96.000, 134.000, dan 173.000. Penelitian ini memberikan hasil yaitu turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berukuran d/D sebesar 0,5 di depan *returning blade* pada posisi S/D sebesar 2,0 pada bilangan Reynolds $9,6 \times 10^4$ memiliki performa lebih tinggi dibanding turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. *Coefficient of Power* (CoP) meningkat dari 13,23 % menjadi 0,777 dan *Coefficient of Moment* (Cm) meningkat dari 33,33% menjadi 0,164. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada posisi S/D sebesar 2,0 pada bilangan Reynolds $9,6 \times 10^4$, $13,4 \times 10^4$, dan $17,3 \times 10^4$ mampu meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius di semua posisi angular sudu turbin, dibuktikan dengan nilai *Coefficient of Static Torque* pada ketiga bilangan Reynolds tersebut meningkat dan tidak terdapat *Coefficient of Static Torque* yang bernilai negatif [3].

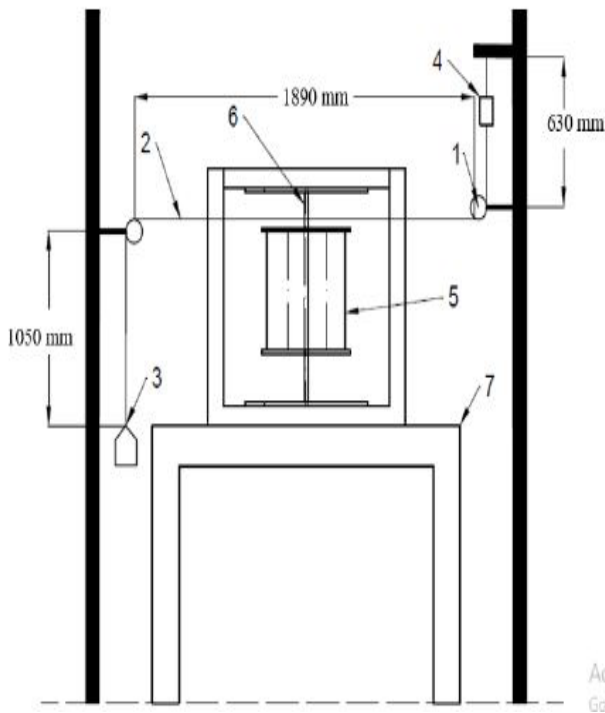
Gunawan Sakti, et al. (2019) melakukan penelitian eksperimen dan numerik untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di depan *Returning Blade* menggunakan software ANSYS-fluent

19.1. Penelitian dilakukan menggunakan dan tanpa menggunakan silinder pengganggu I-65° pada bilangan Reynolds sebesar $9,9 \times 10^4$, rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5, peletakkan turbin pada sudut 30°, 90°, 150°, dan peletakkan silinder pengganggu pada jarak 1,4D. Penelitian ini memberikan hasil yaitu peletakkan silinder pengganggu I-65° di depan turbin angin Savonius mampu meningkatkan *power coefficient* turbin dan kemampuan *self starting* turbin. Kemampuan *self starting* turbin yang dipasang silinder pengganggu memiliki nilai terendah pada sudut 150°. Hasil ini dibuktikan dengan visualisasi kontur tekanan dan kontur kecepatan, di mana kontur tekanan mendeskripsikan reduksi *pressure drag* dan kontur kecepatan mendeskripsikan penyempitan daerah *wake* akibat dari separasi aliran yang tertunda [4].

Masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan lagi performa dari turbin Savonius. Pada penelitian ini digunakan penghalang di depan *returning blade* turbin angin Savonius untuk meningkatkan performa turbin. Variabel yang membedakan penelitian ini dengan penelitian – penelitian sebelumnya adalah kecepatan angin. Variabel kecepatan angin digunakan untuk mendapatkan nilai optimum *tip speed ratio* yang menghasilkan *Coefficient of Power* terbesar.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Parameter – parameter yang terdapat pada penelitian ini antara lain kecepatan fluida (V), densitas fluida (ρ), diameter turbin Savonius (D), viskositas fluida (π), diameter silinder pengganggu (d), diameter poros (b), jarak titik pusat silinder penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius (y), kecepatan putar sudu turbin angin Savonius (ω), jarak antara proyeksi titik pusat turbin Savonius sejajar terhadap proyeksi titik pusat silinder penghalang, dan jarak titik pusat silinder penghalang terhadap sisi tengah *returning blade* turbin Savonius (S). Parameter – parameter pengujian dan skema penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 5. Susunan sitem Brakedynamometer

Keterangan

- | | |
|-------------------|---|
| 1. Pulley | 5. Turbin angin Savonius |
| 2. Benang nilon | 6. Poros turbin angin Savonius |
| 3. Massa pemberat | 7. Meja penyangga turbin angin Savonius |
| 4. Neraca pegas | |

A. Benda Uji

Turbin angin Savonius dapat dilihat pada Gambar 2. sebagai berikut, Diameter (D): 167 mm; Tinggi (H) 298 mm; Overlap (b): 19 mm; Diameter end plate (D₀): 320 mm; sudu turbin (t): 3 mm

Silinder Pengganggu dapat dilihat pada gambar 3 sebagai berikut, Diameter: 83,5 mm; d/D: 0,5; y/D: 0,5; S/D: 2,2

1) Honeycomb

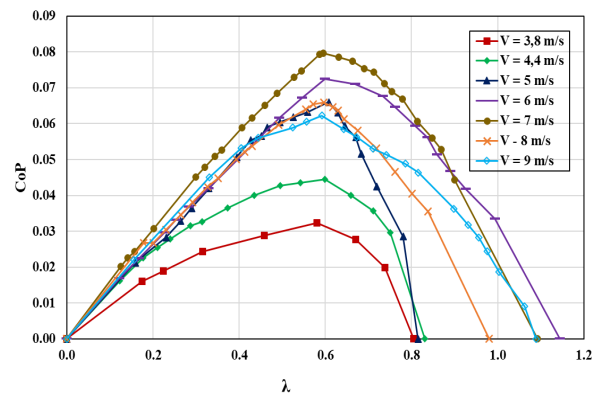
Honeycomb berfungsi untuk membuat aliran angin yang dihasilkan axial fan menuju benda uji menjadi uniform. Skema honeycomb dapat dilihat pada gambar 4 sebagai berikut,

- Panjang sisi frame : 750 mm
- Panjang sisi honeycomb : 630 mm
- Tinggi honeycomb : 460 mm
- Tinggi frame : 490 mm
- Tebal frame : 30 mm
- Tebal honeycomb : 20 mm
- Ukuran meshing : 0,0248 lubang/mm²

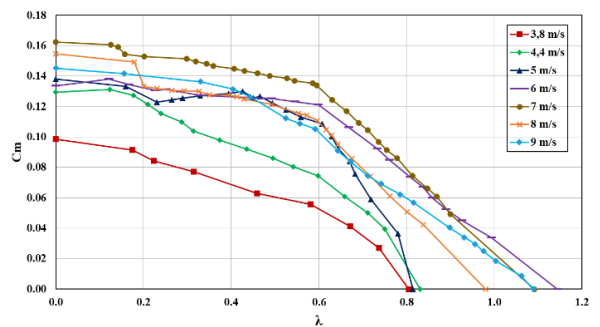
2) Axial Fan

Axial fan pada penelitian ini digunakan sebagai sumber aliran udara yang akan digunakan untuk pengujian performa turbin angin Savonius. Axial fan yang digunakan adalah tipe CKE SPV-18. Spesifikasi axial fan dapat dilihat sebagai berikut,

- Diameter : 18 inch/450mm
- Speed : 2850 RPM
- Air Flow : 4413 CFM
- Power : 1700 Watt
- Static Press : 520 Pa
- Phase : 1



Gambar 6. Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada masing – masing kecepatan angin.



Gambar 7. Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada masing – masing kecepatan angin

- Voltage : 220 - 240 V

3) Alat Ukur

- Tachometer

Tachometer yang digunakan adalah tipe **Economical non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT12** dengan akurasi pembacaan 0.01% dan rentang pengukuran antara 5 hingga 99.999 rpm.

- Anemometer

Anemometer yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe **Omega HHH141**

- Torquemeter

Torquemeter yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe **LUTRON model TQ-8800** dengan resolusi 0,1 N-cm.

- Voltage Regulator

Voltage regulator yang digunakan pada penelitian ini adalah **Model TDGC 2J-3**.

- Neraca Pegas

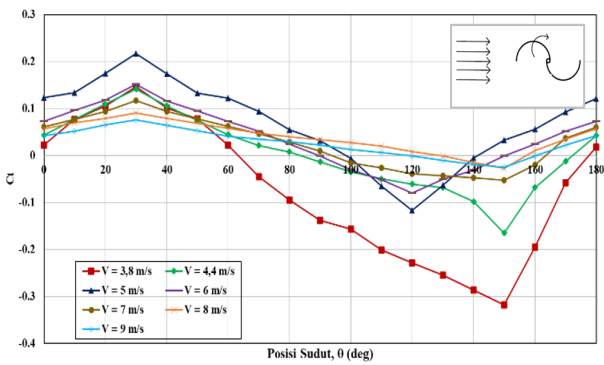
Neraca pegas yang digunakan pada penelitian ini adalah **Model Nagata** dengan kapasitas maksimal 3 kg serta ketelitian 10 gram.

- Massa Pemberat

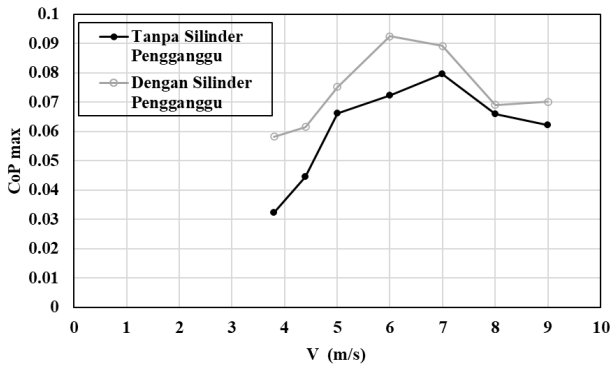
Nilai massa pemberat yang digunakan pada penelitian ini bervariasi dari tiga hingga dua puluh gram.

B. Metode Pengukuran Daya

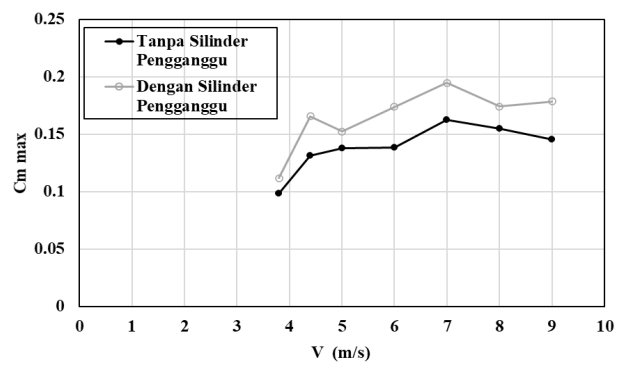
Pada penelitian ini torsi dinamis turbin angin Savonius diukur menggunakan *Brake dynamometer*. *Brake dynamometer* adalah alat ukur yang terdiri dari sistem katrol, massa pemberat dan pegas yang dihubungkan oleh benang nilon dengan merk Optimum yang dililitkan pada poros turbin. Torsi dinamis yang diukur oleh *brake dynamometer*



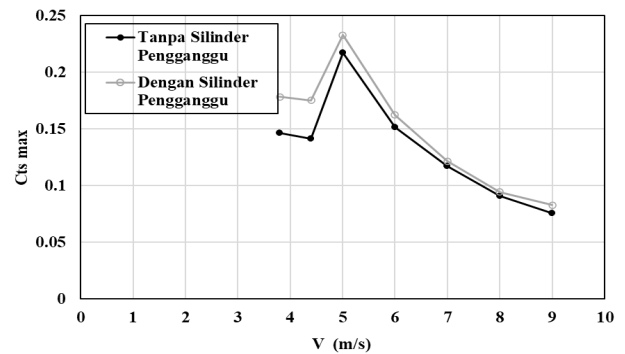
Gambar 8. Grafik *Coefficient of Static Torque* (Ct) Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Sudut Blade (θ).



Gambar 9. Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) maksimum turbin angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Kecepatan Angin



Gambar 10. Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum turbin angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Kecepatan Angin.



Gambar 11. Grafik Perbandingan *Coefficient of Static Torque* (Cts) maksimum turbin angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Kecepatan Angin

dapat digunakan untuk menghitung daya dan *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Torsi dinamis diukur ketika turbin berputar dan massa pemberat ditambahkan hingga turbin berhenti berputar.

C. Perhitungan Daya

Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Bilangan Reynolds didapatkan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \tag{1}$$

ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3); V adalah kecepatan angin; L adalah panjang karakteristik turbin angin Savonius (m); μ adalah viskositas udara (kg/m.s).

Turbin angin Savonius mengubah energi kinetik dari aliran angin menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang didapatkan membuat turbin dapat berputar dan memiliki daya. Besarnya daya teoritis angin dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut,

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 \tag{2}$$

P_t adalah daya teoritis angin (watt); ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3); A adalah luas permukaan turbin tegak lurus datangnya angin (m^2); V adalah kecepatan angin (m/s). Luas permukaan turbin yang tegak lurus datangnya angin didapatkan dari persamaan sebagai berikut,

$$A = L.H \tag{3}$$

L adalah panjang karakteristik turbin (m); H adalah tinggi turbin (m).

Panjang karakteristik turbin didapatkan dari persamaan sebagai berikut,

$$L = 2D - b - 2t \tag{4}$$

D adalah diameter sudu turbin (m); b adalah diameter poros turbin (m); t adalah tebal sudu turbin (m)

Dari pengukuran nilai torsi dinamis dan kecepatan putar turbin, daya mekanis turbin dapat diestimasi menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$P_m = \omega T \tag{5}$$

P_m adalah daya mekanis turbin (watt); ω adalah kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s); T adalah torsi dinamis turbin (N-m);.

Besarnya torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$T = F \cdot r \tag{6}$$

F adalah gaya yang bekerja pada poros turbin (N); r adalah jari – jari poros turbin (m).

Gaya yang bekerja pada poros turbin dapat diukur menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$F = (m - s) \cdot g \tag{7}$$

m adalah massa pemberat (kg); s adalah bacaan keseimbangan pegas (kg); g adalah percepatan gravitasi (m/s^2).

Kecepatan putar turbin angin Savonius dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \tag{8}$$

N adalah kecepatan putar turbin (rpm)

Coefficient of Moment (C_M) merupakan perbandingan antara torsi mekanis yang dimiliki turbin dengan torsi teoritis yang didapatkan dari persamaan sebagai berikut,

$$C_M = \frac{4.T_D}{\rho.A.V^2.L} \quad (9)$$

Tip Speed Ratio (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan pada ujung sudu turbin dengan kecepatan angin yang mengalir melalui sudu turbin. *Tip Speed Ratio* didapatkan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$\lambda = \frac{\omega.R}{V} \quad (10)$$

λ adalah *tip speed ratio*; ω adalah kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s); R adalah jari-jari turbin (m); V adalah kecepatan angin (m/s)

Performa turbin angin Savonius ditentukan oleh *coefficient of power* (CoP). CoP secara teoritis didefinisikan sebagai perbandingan daya yang dihasilkan turbin dengan daya yang dimiliki oleh udara yang mengalir menuju permukaan turbin. *Coefficient of Power* dapat didefinisikan sebagai persamaan berikut,

$$C_{op} = \frac{P_m}{P_t} \quad (11)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan persamaan (5) pada persamaan (11), didapatkan persamaan CoP sebagai berikut,

$$C_{op} = \frac{g r \pi n |m-s|}{15 \rho A V^3} \quad (12)$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Performa Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu

Ketujuh grafik CoP pada Gambar 6 menunjukkan bahwa performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu akan meningkat hingga TSR optimal kemudian akan turun setelah melewati TSR optimalnya. Turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bekerja paling optimal pada kecepatan angin 7 m/s.

Dapat dilihat pada gambar 6 bahwa pada kecepatan angin 3,8 m/s; 4,4 m/s; 5 m/s; 6 m/s, 8 m/s, 9 m/s turbin memiliki CoP yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin pada kecepatan angin 7 m/s. Gambar 6 juga menunjukkan bahwa ketika turbin dialiri angin dengan kecepatan yang berbeda, turbin memiliki nilai *Tip Speed Ratio* maksimal yang berbeda pula. Hal ini dapat terjadi karena turbin pada masing – masing kecepatan angin yang berbeda, memiliki nilai putaran turbin (ω) yang berbeda – beda ketika beban pada *brakedynamometer* belum diletakkan. Turbin yang dialiri kecepatan angin tinggi cenderung memiliki nilai TSR maksimal yang lebih tinggi dibanding turbin yang dialiri angin berkecepatan rendah.

Hal ini dapat terjadi karena pada turbin yang dialiri kecepatan angin yang tinggi, lebih banyak aliran fluida yang mengalir menuju *upstream advancing blade* turbin, sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* semakin besar dan selisih gaya *drag* kedua sudu turbin lebih besar. Selisih yang lebih besar ini membuat turbin mampu berputar lebih cepat (ω) dan nilai TSR maksimal cenderung lebih besar.

Dapat dilihat pada Gambar 7 bahwa nilai C_m mengalami penurunan seiring meningkatnya nilai TSR. Hal tersebut dapat terjadi karena nilai torsi dinamis berbanding lurus dengan selisih dari nilai yang terbaca pada neraca pegas (s) dan massa pemberat(m) dengan rumus $T_d = \{m-s\}g\}r$ dan nilai torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai C_m , sehingga ketika TSR meningkat, selisih s dan m menurun, nilai torsi dinamis menurun, dan nilai C_m menurun. Nilai C_m maksimum tertinggi turbin terdapat pada kecepatan angin 7 m/s dan nilai C_m maksimum terendah turbin terdapat pada kecepatan angin 3,8 m/s. C_m maksimum terbesar turbin tanpa silinder pengganggu terdapat pada kecepatan 7 m/s karena kerugian yang dialami paling kecil dibandingkan dengan turbin tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin lainnya.

Dapat dilihat pada Gambar 8 bahwa *Coefficient of Static Torque* maksimum paling tinggi turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu yang didapatkan pada penelitian ini adalah pada kecepatan angin 5 m/s. Hal ini dapat terjadi karena semakin besar kecepatan angin, semakin banyak aliran udara yang menabrak sudu turbin sehingga dibutuhkan gaya yang lebih besar untuk menahan turbin, sehingga nilai *Coefficient of Static Torque* semakin tinggi. Dapat dilihat pada ketujuh grafik bahwa nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum berada pada posisi sudut turbin 30°. Hal ini menunjukkan bahwa pada sudut 30°, turbin memiliki kemampuan *self starting* tertinggi dibandingkan dengan posisi sudut turbin lainnya karena *advancing blade* menerima gaya *drag* paling besar. Dapat dilihat pada grafik *Coefficient of Static Torque* turbin untuk kecepatan 5 m/s dan 6 m/s bahwa nilai *Coefficient of Static Torque* minimum berada pada posisi sudut turbin 120°, di mana *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif. Torsi statis bernilai negatif menunjukkan bahwa *advancing blade* menerima gaya *drag* lebih kecil dibandingkan *returning blade* turbin, sehingga turbin perlu diberi gaya dari luar agar dapat mulai berputar dari keadaan diam. Pada kondisi tersebut, turbin dikatakan tidak mempunyai kemampuan *self starting*. Dapat dilihat pada grafik *Coefficient of Static Torque* turbin untuk kecepatan 3,8 m/s, 4,4 m/s, 7 m/s hingga 9 m/s bahwa nilai *Coefficient of Static Torque* minimum berada pada posisi sudut turbin 150°, di mana *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif. Pada kondisi tersebut, turbin dikatakan tidak mempunyai kemampuan *self starting*.

B. Data Performa Turbin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu

Berdasarkan Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11 dapat dilihat bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi S/D = 2,2 membuat turbin memiliki nilai CoP maksimum, C_m maksimum, dan C_{ts} maksimum yang lebih tinggi pada setiap kecepatan angin dibandingkan dengan turbin tanpa menggunakan silinder pengganggu. Dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi S/D = 2,2 efektif mengurangi tekanan di depan *returning blade*. Selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* akan menurun sehingga *pressure drag* pada *returning blade* menurun, gaya *drag* pada *returning blade* menurun, selisih gaya *drag* kedua sudu turbin meningkat, dan CoP turbin meningkat pula. Selain itu, pemberian silinder pengganggu pada S/D = 2,2 menyebabkan *boundary layer* pada *returning*

blade turbin terganggu, sehingga semakin cepatnya transisi aliran dari laminar menuju turbulen yang menyebabkan kemampuan aliran untuk melawan gaya gesek dan adverse pressure gradient semakin besar. Hal ini membuat titik separasi mundur sehingga wake yang terbentuk mengecil yang menyebabkan gaya drag pada returning blade menurun dan selisih gaya drag kedua sudu turbin meningkat. Oleh sebab itu, torsi serta CoP, Cm, dan Cts turbin meningkat.

IV. KESIMPULAN

Penempatan silinder pengganggu di depan returning blade turbin pada posisi $S/D = 2,2$ efektif meningkatkan *Coefficient of Power* turbin angin Savonius pada kecepatan angin 3,8 m/s hingga 9 m/s, dibuktikan dengan terjadinya peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin untuk semua variasi kecepatan angin.

Penempatan silinder pengganggu di depan returning blade turbin pada posisi $S/D = 2,2$ efektif meningkatkan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius pada kecepatan angin 3,8 m/s hingga 9 m/s, dibuktikan dengan terjadinya peningkatan nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin untuk semua variasi kecepatan angin.

Penempatan silinder pengganggu di depan returning blade turbin pada posisi $S/D = 2,2$ efektif meningkatkan kemampuan self starting turbin pada kecepatan angin 3,8 m/s hingga 9 m/s, dibuktikan dengan nilai *Coefficient of Static Torque* yang cenderung semakin mendekati nol dibandingkan turbin tanpa menggunakan silinder pengganggu.

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.expthermflusci.2008.06.006.
- [3] F. Mujahidin, "Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius 'Studi Kasus $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $2,2$; $2,4$; $2,6$; $2,8$; dengan Bilangan Reynolds = $9,6 \times 10^4$; $13,4 \times 10^4$; $17,3 \times 10^4$; $y/D = 0,5$,'" Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.
- [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.