

Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular di Depan *Returning Blade* Turbin pada Jarak $S/D = 2,6$

Afiyah Shuhufam dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

Abstrak—Turbin angin yang cocok dan bisa digunakan di Indonesia adalah jenis turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius, namun performa yang dihasilkan masih cukup rendah sehingga menarik untuk diteliti. Tujuan dari Eksperimen ini adalah meningkatkan performa turbin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Studi eksperimen ini dilakukan menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua sudu dengan dimensi yaitu diameter sudu turbin (D) sebesar 167 mm, tinggi (H) sebesar 298 mm, dan diameter poros (b) sebesar 19 mm. Penelitian ini menggunakan pengganggu yang berbentuk silinder dengan diameter (d) sebesar 83 mm dan tinggi (L) sebesar 309 mm. Sumber angin yang digunakan berasal dari axial fan yang dibantu oleh honeycomb di depannya agar aliran udara yang mengalir seragam. Untuk mengatur kecepatan axial fan menggunakan voltage regulator. Penelitian ini menggunakan rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin d/D sebesar 0,5 dengan variasi jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin $S/D = 2,6$ dan variasi kecepatan angin = 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Untuk mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer, untuk mengukur torsi dinamis menggunakan brake dynamometer, untuk mengukur torsi statis menggunakan torsi meter dan untuk mengukur putaran turbin menggunakan tachometer. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah, bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berukuran $d/D=0,5$ di depan *returning blade* pada posisi $S/D = 2,6$ pada bilangan *Reynolds* $9,6 \times 10^4$ yang paling efektif meningkatkan performa turbin. Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya nilai *Coefficient of Power* maksimum (CoP_{Max}), *Coefficient of Moment* maksimum (Cm_{Max}), dan *Static Torque Coefficient* (Cts) dibandingkan dengan Turbin Savonius tanpa pengganggu.

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

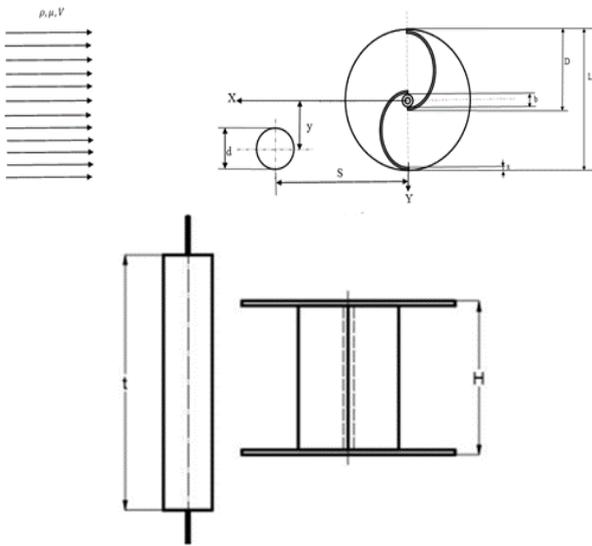
I. PENDAHULUAN

KONSUMSI energi final masih didominasi dari pemanfaatan bahan bakar minyak. Salah satu energi yang dapat dimanfaatkan pada saat ini adalah energi angin. Alternatif turbin yang ideal untuk pemanfaatan energi angin tenaga listrik ini adalah turbin Savonius. sisi yang lain berbentuk cekung yang nantinya akan menciptakan gaya hambat yang timbul oleh angin. Kedua sumbu pada turbin Savonius disebut juga sebagai *advancing blade* dan *returning blade*. Kedua sudu ini bertujuan untuk menciptakan torsi positif dan torsi negatif dan gaya hambat yang berbeda pada setiap sudu turbin. Perbedaan gaya hambat ini dari *advancing*

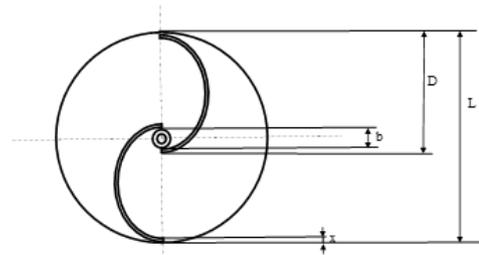
blade dan *returning blade* akan menghasilkan torsi, yang apabila dikalikan dengan kecepatan angular dari turbin angin maka akan menghasilkan daya yang diciptakan oleh turbin angin. Dengan semakin besarnya selisih gaya hambat pada kedua sudu tersebut maka daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Alternatif yang dapat dilakukan antara lain adalah mengurangi gaya hambat pada sudu *returning blade*.

Penelitian pada turbin angin Savonius yang diberi pengganggu berupa dua buah plat yang diposisikan di depan turbin dengan variasi panjang plat ($\ell 1$ dan $\ell 2$) dan besar sudut plat (α dan β) dengan kecepatan angin 7 m/s dan bilangan *Reynolds* $1,5 \times 10^5$. Hasil penelitian didapatkan bahwa *Coefficient of Power* (CoP) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% apabila diberi pengganggu dengan susunan yang optimal, yaitu dengan panjang plat pengganggu $\ell 1$ sebesar 45 cm dan $\ell 2$ sebesar 52 cm dengan sudut sudu pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ [1]. Studi eksperimental tentang pengurangan gaya hambat silinder sirkuler dilakukan oleh pengukuran tekanan pada bilangan *Reynolds* 82.000. Sebuah batang balok ditempatkan ke atas dan sejajar dengan silinder untuk mengontrol aliran di sekitar silinder. Hulu batang dapat mengurangi gaya resultan silinder pada berbagai jarak antara batang dan silinder untuk $\alpha < 5^\circ$ (α didefinisikan sebagai sudut terhuyung-huyung dari batang dan silinder). Untuk $\alpha > 10^\circ$, koefisien gaya resultannya memiliki nilai yang besar, sehingga batang hulu tidak dapat mengurangi gaya pada silinder lagi. Untuk $\alpha = 0^\circ$ dan $d/D = 0,5$ (di mana d dan D adalah masing-masing diameter batang dan silinder), hambatan maksimum silinder berkurang menjadi 2,34% dari silinder tunggal [2]. Penelitian untuk meningkatkan performa turbin dengan cara pemberian silinder pengganggu yang berukuran $d/D = 0,5$ pada posisi $y/D = 0,5$, dengan variasi jarak $S/D = 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; \text{ dan } 2,8$ dan variasi bilangan *Reynolds* $9,6 \times 10^4; 13,4 \times 10^4; \text{ dan } 17,3 \times 10^4$. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 2,0$ paling efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) pada bilangan *Reynolds* $9,6 \times 10^4$ dan $13,4 \times 10^4$. Pada bilangan *Reynolds* $9,6 \times 10^4$ terjadi kenaikan CoP sebesar 13,23% dari CoP maksimum turbin tanpa silinder pengganggu [3].

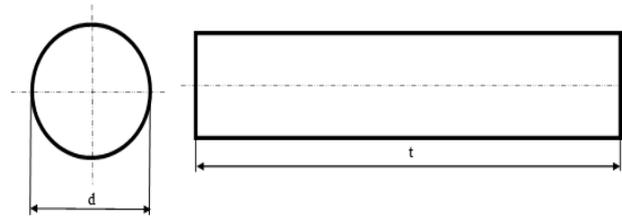
Percobaan peningkatan performa turbin angin Savonius dengan melakukan variasi pada geometri turbin angin Savonius. Variasi geometri yang diubah adalah pada jumlah sudu nya, yaitu dua sudu (2b), tiga sudu (3b), dan 4 sudu (4b); jumlah stage turbin yaitu single stage (1st) dan double stages (2st); overlap ratio (β) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35;



Gambar 1. Skema Penelitian dari pandangan atas



Gambar 2. Turbin Savonius



Gambar 3. Silinder Sirkular sebagai Pengganggu

aspect ratio (α) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5; dan keberadaan end plate. Dari eksperimen tersebut didapatkan hasil bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 2 lebih efisien dibandingkan dengan sudu 3 atau 4. Kemudian turbin dengan end plates lebih efisien dibandingkan tanpa end plates. Dan, turbin angin dengan double stages lebih efisien dibandingkan dengan single stage [4]. Penelitian dengan memvariasikan diameter silinder pengganggu (d/D), jarak antara kedua pusat silinder (L/D) dan harga bilangan *Reynolds*. Hasil penelitian tersebut mendapatkan bahwa penurunan harga koefisien drag (C_D) disebabkan oleh peningkatan bilangan Re , d/D dan penurunan harga L/D . Sedangkan pengurangan pressure drag didominasi oleh perubahan harga Re . Kondisi optimum penurunan harga pressure drag coefficient (CDP) diperoleh pada nilai $d/D = 0,25$; $L/D = 2$ untuk Re kurang dari $4,1 \times 10^4$ dan diperoleh CD sebesar 73% dibanding pada silinder tunggal [5]. Penelitian untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius dengan menggunakan obstacle berupa silinder dengan diameter 45 mm, panjang 280 mm dan jarak dari pusat *returning blade* turbin angin (S/D) = $1,5 < S/D < 2,4$. Penelitian dilakukan pada wind tunnel dengan jenis subsonic, open circuit wind tunnel dan bentuk penampang segi 8. Dimensi dari wind tunnel adalah; panjang 457 mm, tinggi 304 mm dan lebar 304 mm. Turbin Savonius yang digunakan memiliki dimensi; diameter 60 mm, tinggi 80 mm dan overlap 14 mm. Prosedur yang digunakan untuk mengukur daya output adalah dengan cara menghubungkan poros turbin Savonius dengan poros generator listrik menggunakan flexible coupling. Output dari generator listrik akan diteruskan untuk menghidupkan beban berupa lampu.

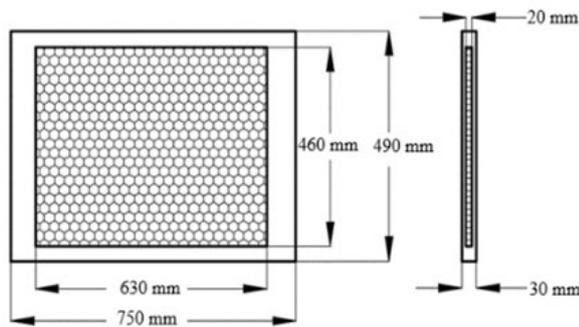
Hasil dari penelitian ini adalah penggunaan silinder pengganggu sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius efektif dalam meningkatkan performa turbin angin dan jarak pusat *returning blade* turbin angin dengan pusat silinder pengganggu yang paling efektif adalah sebesar $S/D = 1,7$ [6]. Penelitian Eksperimental dan Numerik Efek Silinder Tipe I65° terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius dilakukan dengan silinder bundar dipotong 65 derajat di kedua sisi ditempatkan sejajar dengan sumbu *returning blade* vane dari turbin rotor Savonius. Penelitian dilakukan dengan angka *Reynolds* $Re = 9,9 \times 10^4$ berdasarkan kecepatan aliran bebas (U) 5 m/s dan karakteristik panjang L

= $2D-b$, di mana D adalah diameter luar baling-baling dan b adalah diameter batang. Output eksperimental menunjukkan bahwa memasang silinder tipe I-65° di depan (*blade* yang kembali) dapat meningkatkan C_p dari Turbin Savonius. Dibandingkan dengan turbin konvensional, turbin koefisien daya maksimum turbin Savonius meningkat menjadi sekitar 23,6% karena pemasangan silinder tipe I-65°, dan ini dicapai pada rasio tip-speed (TSR) 0,8 [7]. Penelitian untuk mengamati pengaruh pengganggu yang berbentuk silinder yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius terhadap performa turbin angin Savonius tersebut. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D) = 0,5 dan dengan rasio jarak posisi pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 2,0. Penelitian dilakukan pada open circuit wind tunnel dengan reynold yang bervariasi $Re = 9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$ dan dengan variasi $y/D = 0,0$; 0,25; 0,5. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin terhadap diameter turbin angin yang paling efektif adalah sebesar (y/D) = 0,5 pada $Re = 9,7 \times 10^4$ ditandai dengan nilai puncak dari putaran meningkat 1,054 kali, *Coefficient of Power* meningkat 1,062 kali dan *Coefficient of Moment* (CM) meningkat 1,041 kali dibandingkan dari tanpa silinder pengganggu pada turbin angin Savonius tersebut [8].

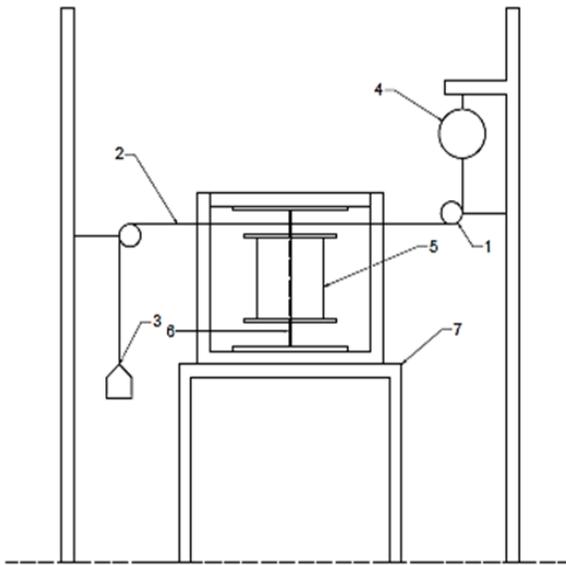
Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa dari turbin angin tipe Savonius dengan mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade* dan mempelajari secara rinci pengaruh kecepatan angin yang diberikan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Gambar 1 menunjukkan skema penelitian (pandangan atas) dan parameter-parameter pengujian. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran adalah jarak antara pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S) dan juga variasi kecepatan aliran (V) yang diatur melalui *Reynolds* number, serta terdapat parameter-parameter lain yang mempengaruhi seperti massa jenis udara (ρ), viskositas udara (μ), diameter *returning blade* (sebagai silinder utama) (D), dan juga diameter silinder pengganggu (d).



Gambar 4. Honeycomb



Gambar 5. Susunan sitem Brakedynamometer

Keterangan :

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

A. Benda Uji

Profil turbin angin tipe Savonius dapat dilihat pada Gambar 2. Dengan dimensi sebagai berikut, Diameter (D): 167 mm; Tinggi (H): 298 mm; Diameter Overlap (b): 19 mm; Diameter end plate (D₀): 320 mm; Tebal sudu turbin (x): 3 mm; Panjang Karakteristik (L=2D-b-2x): 309 mm.

Profil Silinder Pengganggu dapat dilihat pada Gambar 3. Dengan dimensi sebagai berikut, d/D: 0,50; Diameter (d): 83 mm; Tinggi (t): 309 mm; Variasi Jarak (S/D): 2,6

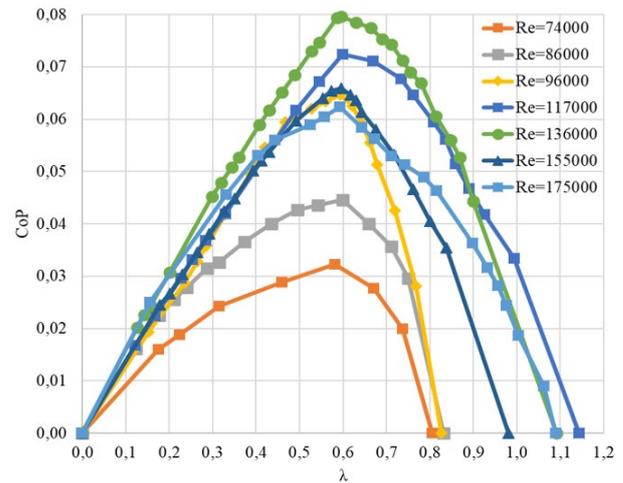
1) Spesifikasi Honeycomb

Honeycomb digunakan pada penelitian ini karena berguna untuk membuat aliran angin dari *Axial fan* menuju benda uji menjadi uniform. Berikut skema dari *Honeycomb*.

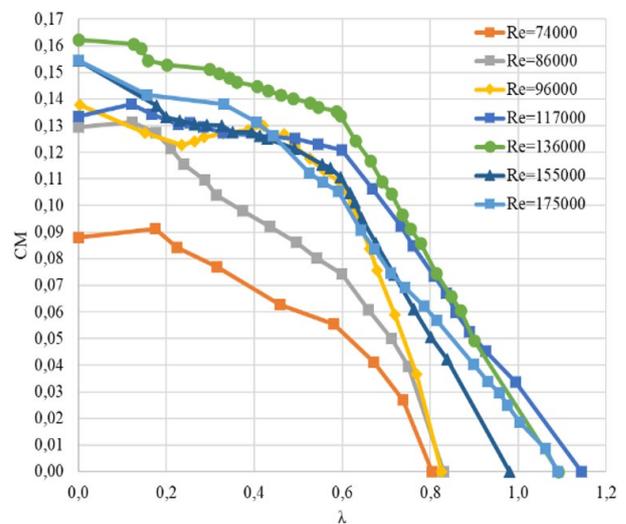
- Panjang sisi frame : 750 mm
- Panjang sisi honeycomb : 630 mm
- Tinggi honeycomb : 460 mm
- Tinggi frame : 490 mm
- Tebal frame : 30 mm
- Tebal honeycomb : 20 mm
- Meshing size : 0,0248 lubang/mm²

2) Blower

Pada penelitian ini menggunakan blower untuk menghasilkan kecepatan angin yang akan digunakan dalam pengujian performa turbin angin Savonius. **Blower** yang



Gambar 6. Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius sebagai fungsi Tip Speed Ratio



Gambar 7. Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius sebagai fungsi Tip Speed Ratio

digunakan yaitu **CKE SPV- 18**. Untuk Spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat dibawah ini

- Diameter : 18 inch/450mm
- Speed : 2850 RPM
- Air Flow : 4413 CFM
- Power : 1700 Watt
- Static Press : 520 Pa
- Phase : 1
- Voltage : 220 - 240 V

3) Alat Ukur

• *Tachometer*

Tachometer yang digunakan yaitu **Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT12** dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit dan range pengukuran antara 5 sampai 99.999 rpm.

• *Torque meter*

Torque meter yang digunakan yaitu **LUTRON model : TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm.

• *Anemometer*

Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tipe **Omega HHH141**.

• *Voltage Regulator*

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

• *Neraca Pegas*

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

• *Massa Pemberat*

Nilai massa pemberat yang digunakan pada penelitian ini bervariasi 3-20 gram.

B. Metode Pengukuran Daya

Pada penelitian ini untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilkan turbin Savonius digunakan *Brake dynamometer*. Pengukuran yang dilakukan adalah dengan skema yang terdiri dari sistem pulley, massa pemberat dan pegas yang dihubungkan oleh benang nilon dengan merk Optimum yang menyelubungi dari poros turbin angin Savonius. Besarnya daya yang terukur sesuai dengan persamaan perhitungan *Coefficient of Power*, dimana torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dapat diukur oleh *brake dynamometer*. Torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius diukur ketika turbin berputar. Massa pemberat ditambahkan dengan berbagai variasi hingga turbin berhenti berputar.

C. Perhitungan Daya

Eksperimen ini dilakukan pada kecepatan angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Untuk mendapatkan bilangan *Reynolds* adalah digunakan rumus sebagai berikut:

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

Dimana: L = panjang karakteristik yang diukur dari medan aliran, dalam kasus ini adalah diameter turbin (m) $L=2D-e-2x$; U = kecepatan blower fan; ρ = massa jenis udara (kg/m^3); μ = viskositas udara ($kg/m.s$).

Prinsip utama dari turbin angin adalah laju energi angin yang dapat dikonversikan oleh turbin menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang didapatkan dikonversikan menjadi hitungan daya yang menjadi indikator performa dari turbin angin Savonius. Sehingga, besarnya daya yang dapat dihasilkan oleh angin yang berhembus dapat dihitung dengan rumus berikut :

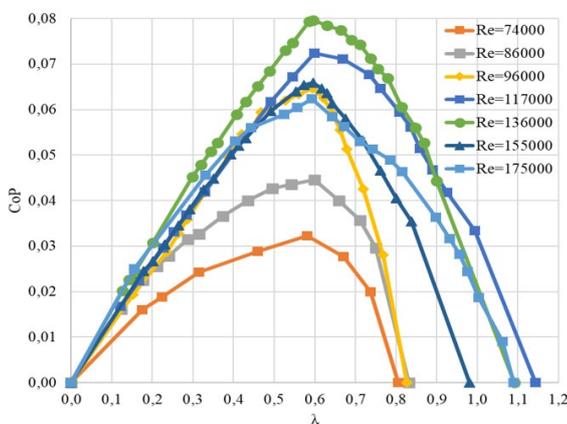
$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \tag{2}$$

Dimana: E_k = energi kinetik (Joule); P_w = daya angin (watt); ρ = massa jenis udara (kg/m^3); A = luas penampang turbin (m^2); D = diameter sudu turbin (m); b = overlap diameter poros (m); H = tinggi turbin (m); dan V = kecepatan udara (m/s).

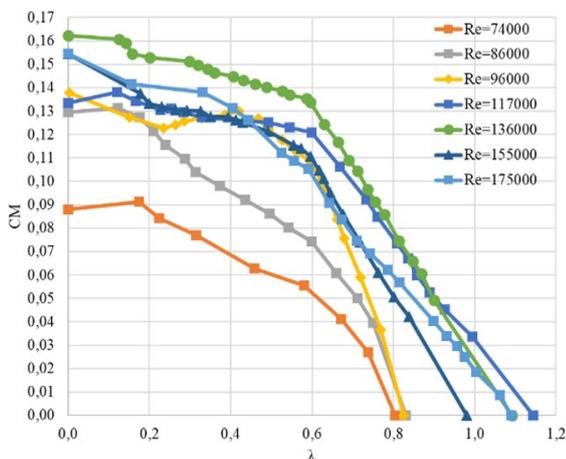
Luas permukaan pada turbin yang ditabrak oleh angin dirumuskan dengan persamaan:

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

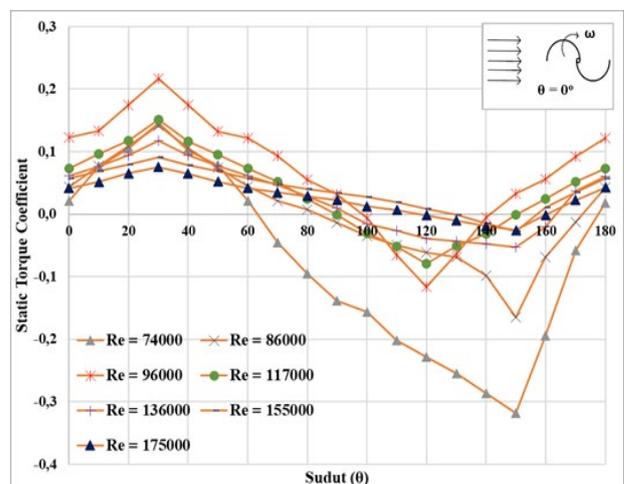
Pada perhitungan daya aktual turbin (P_T) pada perencanaannya akan diukur menggunakan *Brake Dyamometer* dimana alat tersebut menghitung besarnya torsi dinamis yang dihasilkan oleh aliran fluida pada turbin angin



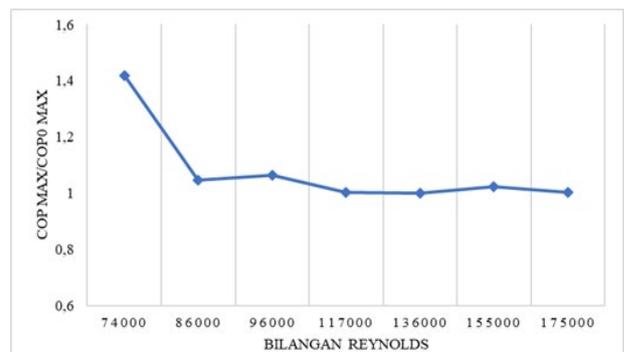
Gambar 6. Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius sebagai fungsi Tip Speed Ratio.



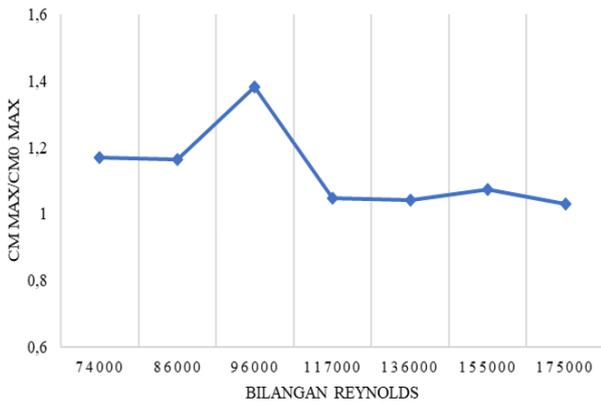
Gambar 7. Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius sebagai fungsi Tip Speed Ratio



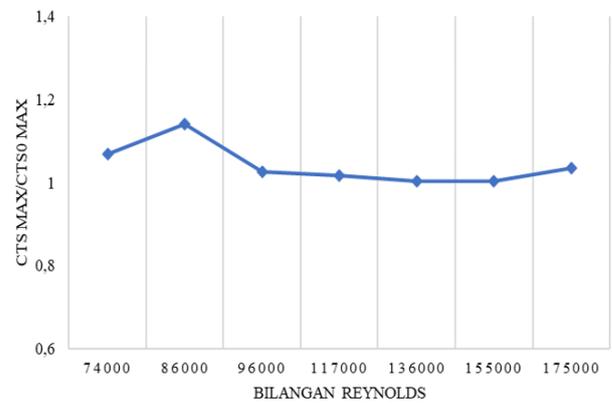
Gambar 8. Grafik Static Torque Coefficient Turbin Angin Savonius sebagai fungsi Tip Speed Ratio.



Gambar 9. Grafik perbandingan Coefficient of Power maksimum antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{Max}/CoP_{0Max}) sebagai fungsi bilangan *Reynolds*



Gambar 10. Grafik perbandingan *Coefficient of Moment* maksimum antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CM_{Max}/CM_0_{Max}) sebagai fungsi bilangan *Reynolds*



Gambar 11. Grafik perbandingan *Static Torque Coefficient* (Cts) maksimum antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (Cts_{Max}/Cts_0_{Max}) sebagai fungsi bilangan *Reynolds*

Savonius. Perhitungan daya aktual turbin (P_T) dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

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

Dimana: P_T = Daya aktual turbin (watt); T_D = Torsi dinamis turbin yang dalam penelitian diukur dengan menggunakan *Brake dynamometer* (N-m); ω = Kecepatan putaran turbin angin Savonius (rad/s).

Besarnya torsi yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$T_D = F \cdot r \tag{5}$$

Dimana: r = radius *pulley* (m)

Gaya yang bekerja pada poros turbin dapat diukur dengan rumus berikut:

$$F = (m - s) \cdot g \tag{6}$$

Dimana: m = massa pemberat (kg); s = pegas yang terbaca (kg); g = akselerasi gravitasi (m/s^2).

Kecepatan putaran turbin angin Savonius dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \tag{7}$$

Dimana: n = kecepatan putar turbin (rpm)

Salah satu paramater untuk menentukan performa pada turbin angin adalah *Coefficient of Moment* (C_M). Persamaan untuk *Coefficient of Moment* adalah sebagai berikut:

$$C_M = \frac{4 \cdot T_D}{\rho \cdot A \cdot V^2 \cdot L} \tag{8}$$

Dimana: T_D : torsi dinamis turbin yang diukur dengan *Brake Dynamometer* (N.cm)

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. TSR dilambangkan dengan λ .

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \tag{9}$$

Dimana: λ = *tip speed ratio*; ω = kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s); R = jari-jari turbin (m) = $\frac{L}{2} = \frac{2D-b-2x}{2}$; V = kecepatan angin (m/s)

Coefficient of Power (CoP) merupakan suatu perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu oleh turbin angin terhadap daya yang dihasilkan oleh *drag force*

yang dihasilkan oleh aliran udara. Persamaan *Coefficient of Power* (CoP) dapat ditulis sebagai berikut:

$$C_{op} = \frac{P_T}{P_w} \tag{10}$$

Dimana: P_T telah didefinisi pada persamaan (4); dan P_w telah didefinisi pada persamaan (2), sehingga persamaan CoP dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$C_{op} = \frac{(m-s)g \cdot r \cdot \pi \cdot n}{15 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3} \tag{11}$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Data Tanpa Penambahan Silinder Pengganggu

Gambar 6 menunjukkan ketujuh grafik CoP masing-masing menunjukkan bahwa peforma turbin angin Savonius akan meningkat hingga mencapai CoP maksimum pada TSR optimal tertentu kemudian akan turun setelah melewati TSR optimalnya pada masing masing bilangan *Reynolds*. Pada turbin angin Savonius tanpa menggunakan silinder pengganggu ini bekerja lebih optimal pada bilangan *Reynolds* $13,6 \times 10^4$ atau pada kecepatan sedang 7 m/s dengan nilai CoP maks sebesar 0,0797 pada TSR = 0,591. Berdasarkan data tersebut, dapat dilihat bahwa kemampuan turbin angin Savonius tidak terlalu baik pada kecepatan rendah maupun tinggi. Hal ini dikarenakan nilai CoP turbin angin Savonius sebagai fungsi TSR mempunyai bentuk grafik parabolik yang akan naik sampai CoP maksimum pada bilangan *Reynolds* tertentu dan akan turun setelah melewati titik maksimumnya. Diduga nilai CoP pada bilangan *Reynolds* = $13,6 \times 10^4$ berada pada posisi puncak nilai CoP maksimumnya sehingga peforma sebelum dan sesudah nilai puncak tersebut akan menurun nilai CoP nya, hal ini terjadi karena adanya rugi yang terjadi pada turbin salah satunya akibat rugi bearing.

Gambar 7 menunjukkan secara garis besar dapat dilihat trendline C_m turun seiring bertambahnya nilai TSR. Nilai C_m akan naik seiring meningkatnya nilai bilangan *Reynolds* sampai nilai maksimumnya dan akan turun setelah melewati nilai maksimum. Nilai C_m tertinggi terdapat pada kecepatan medium atau pada bilangan *Reynolds* 136000 dengan nilai C_M maks sebesar 0,1379 pada TSR = 0,000 dikarenakan sebelum mencapai nilai maksimumnya pada bilangan *Reynolds* tertentu, nilai C_m akan naik seiring bertambahnya

bilangan *Reynolds* hingga mencapai titik puncaknya. Berdasarkan data tersebut, dapat dinyatakan bahwa turbin angin Savonius bekerja lebih efektif pada kecepatan medium atau tinggi, namun kurang efektif bekerja pada kecepatan rendah pada kondisi ini. Secara matematis, nilai C_m berbanding terbalik dengan nilai kecepatan angin pangkat dua sehingga semakin tinggi kecepatan angin maka akan menyebabkan semakin rendahnya nilai C_m turbin angin Savonius.

Pada Gambar 8 tersebut dapat dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada ketujuh grafik bilangan *Reynolds* tersebut dapat dilihat bahwa nilai koefisien torsi statis meningkat hingga sudut 30° kemudian turun hingga kisaran sudut 120° dan 150° , kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Didapatkan torsi statis maksimum masing masing nilai *Reynolds number* adalah pada posisi sudut 30° hal ini menunjukkan bahwa pada sudut ini turbin memiliki nilai *self starting* yang paling tinggi dibandingkan sudut lainnya karena *advancing blade* menerima gaya drag lebih besar. Sedangkan torsi minimal berada dikisaran posisi sudut 120° dan 150° dengan nilai koefisien torsi statis negatif yang berarti bahwa pada posisi sudut tersebut *advancing blade* menerima gaya drag dari angin lebih rendah daripada *returning blade* sehingga harus diberikan gaya luar pada *blade* agar dapat mulai berputar dari keadaan diam dengan kata lain nilai koefisien torsi statis yang bernilai negatif tidak mempunyai kemampuan *self starting*. Nilai Koefisien torsi statis akan naik seiring meningkatnya nilai bilangan *Reynolds* sampai nilai maksimumnya dan akan turun setelah melewati nilai maksimum. Nilai koefisien torsi statis tertinggi terdapat pada kecepatan medium atau pada bilangan *Reynolds* 96000 dengan nilai maks pada sudut 30° dikarenakan sebelum mencapai nilai maksimumnya pada bilangan *Reynolds* tertentu, nilai koefisien torsi statis akan naik seiring bertambahnya bilangan *Reynolds* hingga mencapai titik puncaknya.

B. Data Performa Turbin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu

Gambar 9, 10 dan 11 memperlihatkan bahwa dari ketiga bilangan *Reynolds* yang digunakan pada penelitian ini, menunjukkan bahwa perbandingan *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment* dan *Static Toerque Coefficient* memiliki nilai lebih besar dari satu. Hal ini menjelaskan bahwa dengan diletakkannya silinder pengganggu di depan *returning blade*, terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa peletakkan silinder pengganggu pada posisi $S/D = 2,6$ dapat mengurangi tekanan di depan *returning blade*.

Gambar 9 dan Gambar 11 memperlihatkan bahwa dengan $S/D=2,6$ pada bilangan *Reynolds* $7,4 \times 10^4$ mengalami peningkatan CoP sebesar 41,49% dan pada bilangan *Reynolds* $8,6 \times 10^4$ mengalami peningkatan koefisien torsi statis tertinggi sebesar 14,03%. Kenaikan performa turbin yang terjadi cukup signifikan, hal ini membuktikan turbin angin Savonius mampu berputar berotasi pada kecepatan angin rendah dan memiliki *self-starting* yang baik dan torsi yang tinggi.

Gambar 10 menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* pada jarak $S/D=2,6$ pada bilangan *Reynolds* $9,6 \times 10^4$ mengalami peningkatan CM tertinggi dibandingkan dengan tanpa pengganggu sebesar 38,14%. Kenaikan performa yang terjadi cukup signifikan, dikarenakan sudah mencapai kecepatan optimumnya sesuai dengan rumusan masalah bahwa pada kecepatan angin optimum akan mendapatkan nilai *Coefficient of Moment* maksimum, setelah melewati titik optimumnya maka nilai meningkatkan nilai torsi, daya, dan *Coefficient of Moment* (C_m), akan kembali menurun, hal ini terjadi karena adanya rugi yang terjadi pada turbin salah satunya akibat rugi bearing.

IV. KESIMPULAN

Peningkatan performa turbin paling efektif terjadi pada bilangan *Reynolds* $7,4 \times 10^4$ dibuktikan peningkatan nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 41,49% dari CoP maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.

Peningkatan nilai *Coefficient of Moment* paling efektif terjadi pada bilangan *Reynolds* $9,6 \times 10^4$ terjadi kenaikan C_m sebesar 38,14% dari CM maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.

Untuk semua bilangan *Reynolds* $7,4 \times 10^4$; $8,6 \times 10^4$; $9,6 \times 10^4$; $11,7 \times 10^4$; $13,6 \times 10^4$; $15,5 \times 10^4$; dan $17,5 \times 10^4$ efektif meningkatkan nilai koefisien torsi statis turbin sehingga turbin angin Savonius berpengganggu mempunyai kemampuan *self starting* lebih banyak sudut dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.expthermflusc.2008.06.006.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [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] 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 = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$,'" Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [8] G. Sakti, T. Yuwono, and W. A. Widodo, "Experimental and numerical investigation of I-65° type cylinder effect on the Savonius wind turbine performance," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 19, no. 5, pp. 115–125, 2019.