

Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Pengganggu di Depan *Returning Blade* Turbin pada $S/D = 1,2$

Bagas Ramadhan Ananto dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

Abstrak—Salah satu energi alternatif yang dapat dikembangkan di Indonesia adalah energi angin. Kecepatan angin di Indonesia tergolong rendah yakni sekitar 3 - 7 m/s. Turbin angin yang optimal diterapkan sesuai kecepatan angin di Indonesia adalah turbin Savonius. Turbin Savonius bekerja dengan memanfaatkan perbedaan dari gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu menghasilkan torsi yang akan membuat rotor berputar. Turbin Savonius memiliki kelemahan yaitu memiliki efisiensi yang rendah, sehingga penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan cara meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin. Silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* dengan jarak (y/D)= 0,5 yang memiliki diameter (d) = 83 mm. Penelitian ini dilakukan dengan variasi kecepatan angin 3,8 - 9 m/s pada jarak (S/D) = 1,2. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa Turbin Savonius dengan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada kecepatan angin 5 m/s paling efektif dalam meningkatkan C_oP dan C_m , dengan didapatkan nilai sebesar 74,28% dan 73,24%. Namun penggunaan silinder pengganggu dengan ukuran $d/D = 0,5$, posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 1,2$ untuk semua variasi kecepatan belum mampu menyebabkan turbin Savonius memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

Kata Kunci—Turbin Savonius; Silinder Pengganggu; Putaran Turbin; Torsi Statis; *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment*.

I. PENDAHULUAN

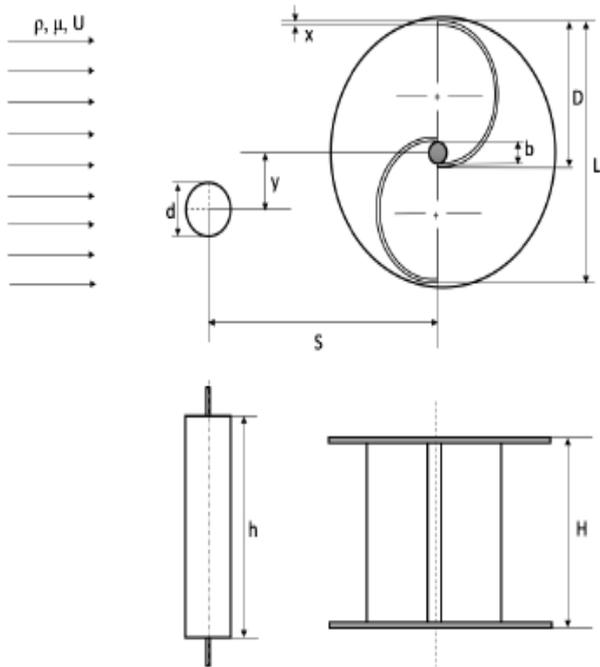
INDONESIA merupakan negara dengan konsumsi energi terbesar di Asia Tenggara [1]. Semakin bertambahnya jumlah penduduk menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi. Konsumsi energi Indonesia selama tahun 2010-2015 meningkat sekitar 1,3% per tahun. Konsumsi energi masih didominasi oleh energi fosil, seperti minyak bumi. Cadangan minyak bumi Indonesia terus menurun dari 5,9 miliar barel pada tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel pada tahun 2015 [2]. Hal ini menuntut untuk memanfaatkan energi baru terbarukan salah satunya energi angin. Mengingat pembentukan energi fosil membutuhkan waktu yang lama, maka perlu adanya sumber energi alternatif. Salah satu energi alternatif yang dapat dikembangkan di Indonesia adalah energi angin. Energi angin dapat dikonversikan menjadi energi listrik dengan cara mengubah energi kinetik yang dimiliki oleh angin menjadi energi mekanik pada turbin angin. Turbin angin yang optimal diterapkan sesuai kecepatan angin di Indonesia adalah turbin Savonius. Turbin Savonius memiliki kelemahan yaitu memiliki efisiensi paling

rendah dibandingkan dengan turbin angin tipe lainnya, sehingga salah satu upaya untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan cara meletakkan silinder pengganggu di depan sisi *returning blade* turbin angin Savonius.

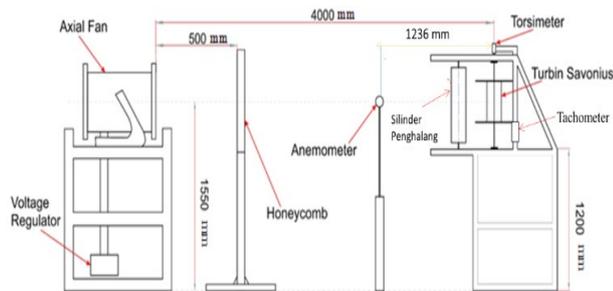
Penelitian mengenai sebuah silinder utama yang diberi pengganggu berupa silinder disisi *upstream* yang dipasang secara tandem dengan memvariasikan besar L/D , d/D serta bilangan *Reynolds* menunjukkan bahwa peletakan silinder mampu menurunkan *coefficient drag* yang disebabkan oleh peningkatan bilangan *Reynolds*, peningkatan d/D , dan penurunan harga L/D dengan peningkatan bilangan *Reynolds* diatas 3×10^4 . Dengan melakukan variasi pada diameter silinder sirkular utama (d/D) nilai C_p pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya variasi diameter dari silinder pengganggu. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar *wake* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit [3].

Penelitian dengan tujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan pengaruh jumlah *blade*, jumlah *stage* turbin, *overlap ratio*, *aspect ratio*, dan keberadaan *end plates* pada turbin oleh [4]. Pada penelitian ini terdapat beberapa parameter yang digunakan yaitu jumlah *blade* dengan dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b), dan empat *blade* (4b); jumlah *stage* turbin dengan satu *stage* dan dua *stage*; *overlap ratio* (β) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35, dan *aspect ratio* sebesar 0,5, 1, 2, 4 dan 5 dengan ada dan tidak adanya *end plates* pada turbin angin Savonius. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa jumlah *blade* turbin angin Savonius dengan dua *blade* lebih efisien dari pada tiga atau empat *blade*. Turbin dengan dua *stage* memiliki *specific power* yang lebih besar dari pada satu *stage*, sehingga performa turbin dengan dua *stage* lebih optimum. Pengoperasian turbin angin Savonius tanpa *overlap ratio* lebih baik dibandingkan dengan turbin dengan *overlap ratio*. *Coefficient of power* dari turbin akan meningkat seiring dengan kenaikan dari parameter *aspect ratio* (α). Serta penggunaan *end plates* pada turbin akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa menggunakan *end plates*.

Penelitian mengenai peningkatan performa pada turbin Savonius pernah dilakukan oleh [5] dengan menggunakan dua buah plat, yaitu plat pengarah di samping *advancing blade* dan plat pengganggu di depan *returning blade* serta melakukan variasi pada variabel panjang plat (l_1 dan l_2) dan



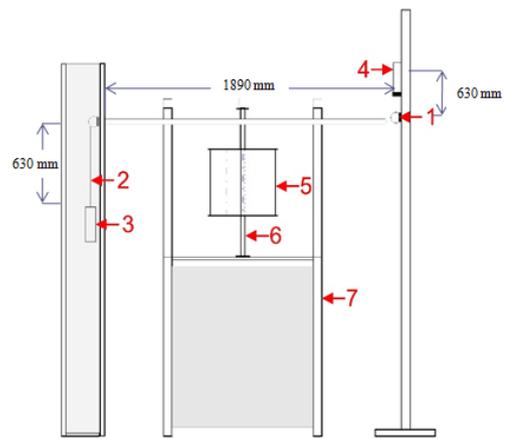
Gambar 1. Skema penelitian dan parameter pengukuran.



Gambar 2. Skema Eksperimen

besar sudut plat (α dan β). Pada penelitian ini digunakan tiga tipe plat dengan perbedaan panjang plat pengganggu dan pengarah (l_1 dan l_2). Percobaan dilakukan pada kecepatan angin sebesar 7 m/s dan bilangan *Reynolds* $1,5 \times 10^5$. Dari penelitian ini didapatkan nilai optimum sudut plat pengganggu pada α sebesar 45° dan β sebesar 15° dengan hasil nilai *coefficient of power* (CoP) yang tertinggi terdapat pada penggunaan plat tipe satu dengan panjang plat pengganggu (l_1) sebesar 45 cm dan panjang plat pengarah (l_2) sebesar 52 cm. Penggunaan plat tipe satu ini dapat meningkatkan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius sebesar 38,5%.

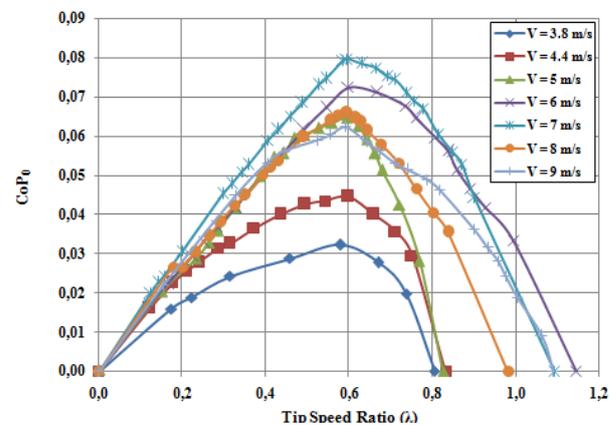
Penelitian mengenai peningkatan performa pada turbin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin pernah dilakukan oleh [6]. Variasi yang digunakan dalam eksperimen ini adalah rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0; 0,25; 0,5 dan bilangan *Reynolds* (Re) sebesar $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$. Dari studi eksperimen ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Peningkatan performa turbin angin Savonius ini ditandai dengan meningkatnya nilai torsi statis (T_s), kecepatan putar turbin (n), dan *Coefficient of Power* (CoP) dengan silinder pengganggu di depan *returning*



Gambar 3. Skema pengukuran *brake dynamometer*

Keterangan

1. Sistem pulley
2. Benang nilon
3. Massa pemberat
4. Neraca
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius



Gambar 4. Grafik CoP tanpa pengganggu terhadap λ pada seluruh variasi kecepatan

blade dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu di depan *returning blade*. Performa optimal turbin angin Savonius didapatkan pada jarak $y/D = 0,5$ pada bilangan *Reynolds* $9,7 \times 10^4$ dengan kenaikan nilai *coefficient of power* turbin sebesar 1,3 kali dari turbin tanpa pengganggu.

Selanjutnya, penelitian secara eksperimen dan simulasi numerik mengenai pengaruh silinder pengganggu dilakukan oleh [7]. Dimana silinder pengganggu tipe I- 65° dianalisa terhadap performa turbin angin Savonius. Pada penelitian ini silinder pengganggu Tipe I- 65° diletakkan di depan *returning blade* dari turbin. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa pemberian silinder pengganggu Tipe I- 65° pada $S/D = 1,4$ memiliki hasil yang lebih efektif dalam meningkatkan performa dari turbin Savonius, dimana *Coefficient of Power* dari $S/D = 1,4$ mengalami kenaikan dari 17,7% secara eksperimen dan 17,3% melalui simulasi numerik pada *Tip speed ratio* 0,8, menjadi 21,8% dan 21,7 %. Begitu juga dengan nilai torsi statis turbin yang mengalami kenaikan setelah diberikan silinder pengganggu Tipe I- 65° . Dimana nilai torsi statis tertinggi pada sudut bilah turbin 30° , dari 3,75 Ncm tanpa pengganggu menjadi 4,3 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Torsi terendah terjadi pada sudut bilah turbin 150° , dari -0,8 Ncm tanpa pengganggu menjadi 0,13 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Melalui simulasi numerik didapatkan bahwa dengan penambahan silinder

pengganggu Tipe I-65° pada keadaan Turbin pada sudut bilah 30°, memiliki dampak paling efektif dalam meningkatkan torsi turbin dibandingkan dengan keadaan Turbin pada sudut bilah 90° dan 150°.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang sesuai untuk digunakan di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dengan penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) sebesar 0,5. Penambahan silinder pengganggu dilakukan dengan variasi jarak antara pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) sebesar 1,2 dengan variasi kecepatan angin masuk yaitu 3,8 - 9 m/s.

II. METODE PENELITIAN

Gambar 1 menunjukkan skema penelitian dan parameter-parameter pengukuran. Parameter-parameter tersebut adalah densitas fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan fluida (V), diameter turbin angin Savonius (L), diameter sudu turbin Savonius (D), tinggi turbin Savonius (H), diameter silinder pengganggu (d), tinggi silinder pengganggu (h), jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (S) dan diameter poros turbin (b). Dimana, ρ : massa jenis fluida (kg/m^3); μ : viskositas fluida (Ns/m^2); V : kecepatan aliran udara (m/s); H : tinggi turbin angin Savonius (m); h : panjang

silinder sirkular pengganggu (m); D : diameter sudu turbin angin Savonius (m); d : diameter silinder sirkular pengganggu (m); b : diameter poros (m); S : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m); y : jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu dengan proyeksi titik pusat turbin angin Savonius dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)

A. Skema Eksperimen

Jarak *axial fan* ke turbin : 4000 mm
 Jarak *honeycomb* ke turbin : 500 mm

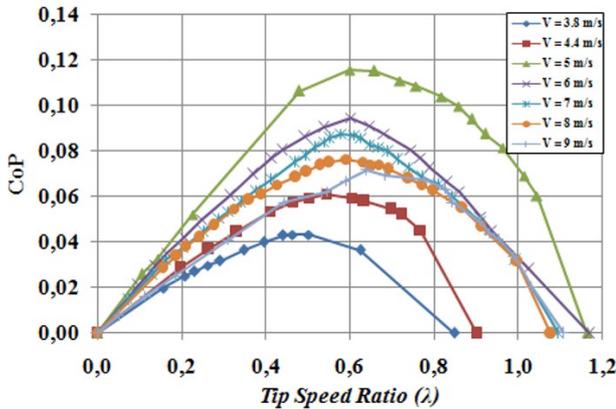
B. Benda Uji

1) Profil turbin angin tipe Savonius memiliki dimensi sebagai berikut :

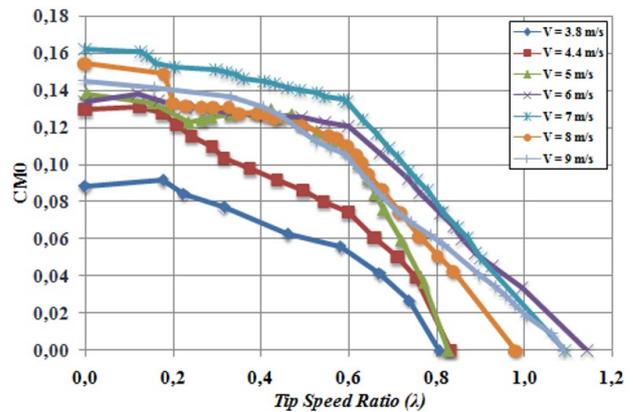
- Diameter sudu turbin (D) : 167 mm
- Diameter turbin ($L=2D-b-2x$) : 309 mm
- Diameter End Plate (D_o) : 320 mm
- Tebal End Plate : 1 mm
- Tinggi (H) : 298 mm
- Diameter Poros Turbin (b) : 19 mm
- Material Endplate : *aluminium cladding 2024*

2) Profil Silinder memiliki dimensi sebagai berikut :

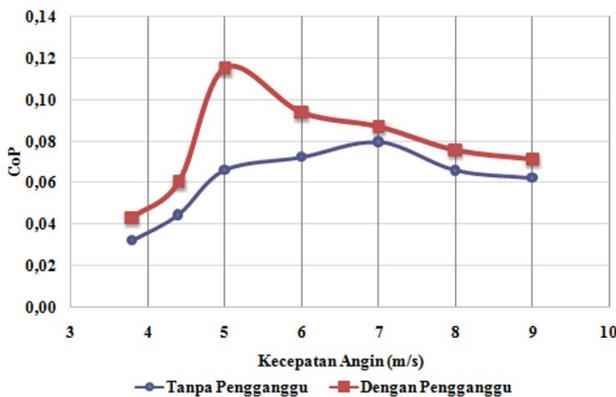
- Diameter (d) : 83 mm
- Jarak tegak lurus pusat *returning blade* (y/D) : 0,5
- Jarak dari pusat *returning blade* (S/D) : 1,2
- Material Silinder Pengganggu : *PVC schedule 40*



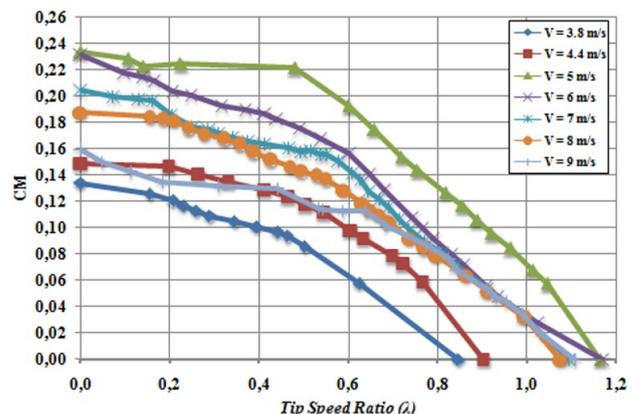
Gambar 5. Grafik CoP dengan pengganggu terhadap λ pada seluruh variasi kecepatan



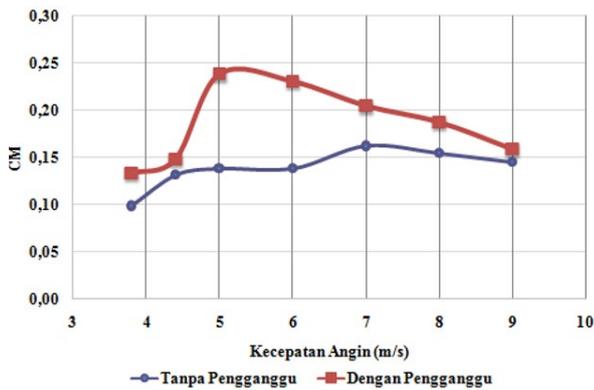
Gambar 7. Grafik Cm tanpa pengganggu terhadap λ pada seluruh variasi kecepatan



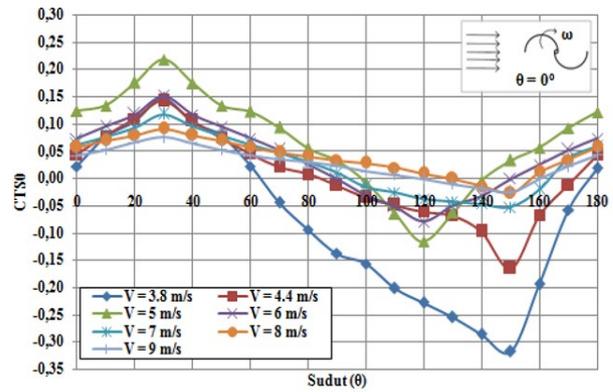
Gambar 6. Grafik CoP dengan pengganggu terhadap λ pada seluruh variasi kecepatan.



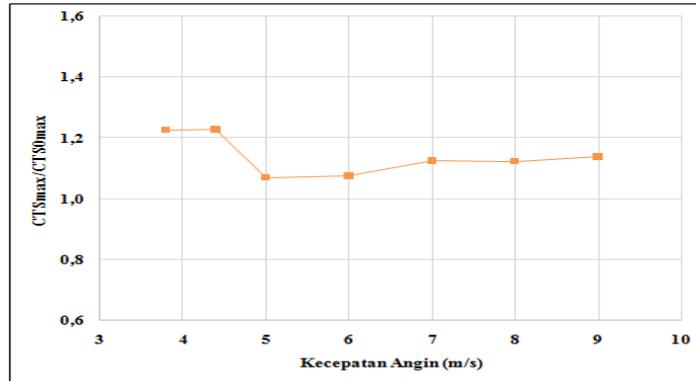
Gambar 8. Grafik Cm dengan pengganggu terhadap λ pada seluruh variasi kecepatan



Gambar 9. Grafik CoP dengan dan tanpa pengganggu terhadap seluruh variasi kecepatan



Gambar 10. Grafik Static Torque Coefficient turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CTS₀) sebagai fungsi posisi angular sudu(θ)



Gambar 11. Grafik Perbandingan Static Torque Coefficient (CTS) maksimum antara turbin angin Savonius dengan pengganggu dan tanpa pengganggu

C. Alat Ukur

1) Tachometer

Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari rotor turbin. Tachometer yang digunakan pada penelitian ini yaitu **Tachometer OMEGA seri HHT13** memiliki kemampuan pembacaan 5-99.999 rpm dan tingkat ketelitian pembacaan 0.1 rpm.

2) Torquemeter

Torquemeter digunakan untuk mengukur torsi statis dari poros turbin. Torque meter yang digunakan yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-513-003** memiliki kemampuan pembacaan 0,1-147,1 Newton-cm dan memiliki tingkat ketelitian pembacaan 0,1 Newton-cm.

3) Anemometer

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Omega HHH141 Digital Anemometer** memiliki kemampuan pembacaan 1,5-35 m/s dan memiliki tingkat ketelitian pembacaan 0.01 m/s.

D. Metode Pengukuran Daya

Pada penelitian ini untuk mengukur daya aktual yang dihasilkan turbin Savonius menggunakan mekanisme *brake dynamometer*. Pengukuran dilakukan pada saat turbin sedang berputar, selanjutnya ditambahi beban berupa anak timbangan sampai turbin berhenti berputar. Selanjutnya dimasukkan ke dalam persamaan berikut:

$$T_d = |m - s|.g \times r \tag{1}$$

dimana:

- s : gaya yang terbaca pada neraca pegas (kg)
- m : massa pemberat (kg)
- g : percepatan gravitasi bumi (9,81 m/s²)

r : jari-jari silinder yang menerima beban (m)

Persamaan diatas akan digunakan untuk mencari *Coefficient of Power* (CoP) dengan menggunakan persamaan:

$$CoP = \frac{T_d \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3} \tag{2}$$

Dengan T_d merupakan torsi turbin angin Savonius, ω merupakan putaran poros, ρ merupakan densitas udara, V merupakan kecepatan udara freestream, dan A merupakan luasan yang terkena udara. Persamaan A adalah:

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

dengan

$$L = (2D - b - 2x) \tag{4}$$

Maka,

$$L = (2D - b - 2x) \times H \tag{5}$$

Untuk Persamaan *Tip Speed Ratio* (λ) adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \tag{6}$$

Dengan ω adalah putaran poros dalam Rad/s, R adalah jari jari turbin dalam meter (m) dan V merupakan kecepatan *freestream* dalam m/s.

Untuk Persamaan *Coefficient of Moment* (Cm) adalah sebagai berikut:

$$Cm = \frac{CoP}{\lambda} \tag{7}$$

Data penelitian akan diolah untuk mendapatkan grafik CoP terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), grafik Cm terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan grafik Torsi Statis Terhadap sudut angular turbin (θ).

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Coefficient of Power (CoP)

Pada penelitian ini dilakukan analisa *Coefficient of Power* (CoP) dengan cara membandingkan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius terhadap daya kinetik dari angin yang digunakan. Daya mekanik yang dihasilkan turbin angin Savonius merupakan hasil perkalian antara torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin angin Savonius. Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan *brake dynamometer*. Hasil dari penelitian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 4-6.

Pada Gambar 4 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* (CoP₀) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Berdasarkan gambar 4 nilai *Coefficient of Power* (CoP₀) akan terus meningkat hingga mencapai λ optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP₀) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan hasil yang didapat, titik optimum berada pada kecepatan 7 m/s, dimana nilai CoP₀ akan meningkat sampai pada kecepatan 7 m/s dan setelah melewati kecepatan angin optimum, nilai CoP₀ akan mengalami penurunan sampai pada kecepatan 9 m/s. Hal ini disebabkan pada kecepatan aliran fluida tinggi, turbin angin Savonius kurang dapat bekerja secara efektif. Didapatkan performa terbaik dari turbin angin Savonius tanpa penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif pada kecepatan 7 m/s dengan nilai *Coefficient of Power* (CoP₀) optimum sebesar 0,0797 pada *Tip Speed Ratio* (λ) optimum 0,596.

Berdasarkan Gambar 5 menunjukkan bahwa *trendline* grafik *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) memiliki bentuk yang terbentuk adalah parabolik. Didapatkan nilai *Coefficient of Power* tertinggi dengan silinder pengganggu (CoP) pada seluruh variasi kecepatan tersebut didapatkan pada kecepatan 5 m/s dengan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,1152 dengan $\lambda = 0,597$. Sehingga pada kecepatan 5 m/s ini nilai *Coefficient of Power* berhasil ditingkatkan dari 0,0646 menjadi 0,1152 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 74,28% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 untuk seluruh variasi kecepatan angin efektif meningkatkan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius. Fenomena tersebut diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi yang dihasilkan turbin. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP). Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [3] tentang eksperimen penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama dengan penggunaan sebuah silinder sirkular sebagai pengganggu.

B. Analisa Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius

Analisa *Coefficient of Moment* (Cm dilakukan dengan cara membandingkan hasil torsi dinamis yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan torsi teoritis dari angin. Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan *brake dynamometer*. Nilai dari *Coefficient of Moment* berhubungan dengan *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio*. Hasil dari penelitian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 7-9.

Berdasarkan Gambar 7, dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* (Cm₀) mengalami mengalami kenaikan seiring dengan menurunnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm₀) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai Cm₀ maksimum tertinggi terdapat pada kecepatan 7 m/s yaitu sebesar 0,1622 pada $\lambda = 0$

Trendline Cm₀ setelah melewati titik optimum dalam hal ini pada kecepatan 7 m/s akan turun sampai pada pada kecepatan 9 m/s disebabkan oleh kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin serta ketika nilai kecepatan aliran fluida semakin naik, maka putaran turbin semakin naik, namun jika putaran turbin semakin cepat maka turbin angin Savonius seolah – olah akan terlihat seperti dinding *solid* terhadap angin dan dapat mengakibatkan turbulensi saat sudu berputar

Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* (Cm₀) mengalami mengalami kenaikan seiring dengan menurunnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 7 dapat dilihat bahwa nilai Cm maksimum tertinggi terdapat pada kecepatan 5 m/s.

Melalui Gambar 9 dapat dilihat bahwa penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 untuk seluruh variasi kecepatan angin efektif meningkatkan *Coefficient of Momet* (CM) turbin angin Savonius. Dapat dilihat bahwa peningkatan nilai CM tertinggi terletak pada kecepatan 5 m/s dengan nilai CM dari 0,1379 pada $\lambda = 0$ menjadi 0,2389 dengan $\lambda = 0$ atau terjadi kenaikan nilai CM sebesar 73,24% dari nilai CM turbin tanpa pengganggu. Fenomena peningkatan nilai CM pada seluruh variasi kecepatan ini diakibatkan oleh penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi yang dihasilkan turbin. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm). Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [3] tentang eksperimen penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama dengan penggunaan sebuah silinder sirkular sebagai pengganggu.

C. Analisa Static Torque Coefficient Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran torsi statis turbin angin Savonius dengan dan tanpa penggunaan silinder

pengganggu di depan *returning blade* pada $S/D = 1,6$ dengan variasi kecepatan 3,8 - 9 m/s. Torsi statis diukur dengan *torquemeter* yang dipasang di poros turbin. Pengukuran dilakukan dalam kondisi turbin Savonius tidak berputar yang dilalui aliran udara dengan kecepatan angin tertentu. Pengukuran dimulai pada posisi angular sudu 0° sampai 180° dengan tiap kenaikan 10° . Adapun hasil penelitian torsi statis (T_s) dari turbin terhadap posisi angular sudu (θ) dengan dan tanpa silinder pengganggu ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 10-11.

Berdasarkan Gambar 10, dapat dilihat bahwa grafik tersebut berbentuk sinusoidal pada seluruh kecepatan angin. Pada seluruh variasi kecepatan angin didapatkan bahwa nilai *Static Torque Coefficient* mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° . Lalu nilai *Static Torque Coefficient* pada kecepatan angin tersebut mengalami penurunan hingga sudut 120° untuk kecepatan angin $V = 5$ m/s dan 6 m/s serta penurunan hingga sudut 150° untuk $V = 3,8, 4,4, 7, 8$ dan 9 m/s. Lalu nilai *Static Torque Coefficient* pada seluruh kecepatan angin tersebut mengalami kenaikan hingga sudut 180° . *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum tertinggi terjadi pada saat kecepatan angin 9 m/s, karena semakin besar kecepatan angin semakin besar pula gaya *drag* yang diterima turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi dengan harga negatif yang berarti turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga pada sudut tertentu turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai nilai *Static Torque Coefficient* positif terbesar pada sudut 30° untuk seluruh kecepatan angin. Hal ini disebabkan pada posisi angular sudu 30° mampu mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif terbesar pada sudut 120° untuk kecepatan angin $V = 5$ m/s dan 6 m/s serta sudut 150° untuk $V = 3,8, 4,4, 7, 8$ dan 9 m/s, hal ini disebabkan pada posisi angular sudu 140° dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade*.

Melalui Gambar 11 dapat dilihat bahwa penggunaan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,2$ untuk seluruh variasi kecepatan angin pada sudut posisi turbin 30° efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* (CTS). Dimana peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* (CTS) terbesar terletak pada kecepatan 4,4 m/s dengan kenaikan nilai sebesar 22,80% dari turbin tanpa silinder pengganggu. Kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* (CTS) setelah diberi pengganggu ini menyebabkan turbin Savonius memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik dibandingkan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ didepan *returning blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment*, dan *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius.

Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ didepan *returning blade* turbin dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 1,2$ pada kecepatan angin 5 m/s paling efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power* maksimum untuk semua variasi kecepatan angin. Dimana pada kecepatan angin 5 m/s terjadi kenaikan sebesar 74,28% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ didepan *returning blade* turbin dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 1,2$ pada seluruh variasi kecepatan angin efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* maksimum untuk semua variasi kecepatan angin. Dimana pada kecepatan angin 5 m/s terjadi kenaikan sebesar 73,24% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ didepan *returning blade* turbin dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 1,2$ untuk semua variasi kecepatan angin efektif meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* pada semua posisi angular sudu. Namun belum mampu membuat turbin angin Savonius memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu. Hal ini ditandai dengan adanya *Static Torque Coefficient* yang bernilai negatif pada beberapa posisi angular sudu.

B. Saran

Perlu dilakukan penelitian secara numerik untuk mengetahui pengaruh silinder pengganggu pada performa turbin angin Savonius. Menggunakan neraca pegas pengukuran dengan kemampuan menerma beban yang lebih tinggi.

Menempatkan sensor cahaya *tachometer* pada poros turbin. Dalam melakukan setting alat terutama *voltage regulator* yang harus dilakukan dengan lebih teliti dan hati-hati.

Pengukuran torsi dinamis dengan *brake dynamometer* sebaiknya lebih diperhatikan karena seringnya terjadi *slip* pada benang dan poros turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), *OutLook Energi Indonesia 2018: Energi Berkelanjutan untuk Transportasi Darat*. Jakarta, Indonesia: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2018.
- [2] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), *OutLook Energi Indonesia 2017: Inisiatif Pengembangan Teknologi Energi Bersih*. Jakarta, Indonesia: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2017.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] S. G. P. Syafardinah, "Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [7] 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.