

Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular Berukuran $d/D = 0,2$ di depan Sudu Returning pada Jarak $S/D = 1,1$

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

Abstrak—Kebutuhan energi di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk tiap tahunnya. Energi primer Indonesia didominasi oleh energi fosil yang jumlahnya terbatas. Menyebabkan kita harus mencari alternatif energi terbarukan agar dimanfaatkan sebagai pengganti energi fosil yaitu energi angin. Kecepatan angin yang tidak terlalu besar sangat cocok dipilih turbin angin jenis Savonius. Turbin Savonius dapat ditingkatkan performansinya dengan menambahkan *disturbance body* didepan *returning blade* turbin sehingga mempengaruhi efisiensi dari turbin tersebut. Dalam penelitian ini digunakan silinder sirkular sebagai *disturbance body*. Studi eksperimen ini menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua sudu dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 165,2 mm, tinggi (H) sebesar 294,4 mm. Penelitian dilakukan menggunakan rasio diameter silinder terhadap diameter turbin d/D sebesar 0,2 dengan jarak yang konstan $S/D=1,1$ dan variasi kecepatan aliran udara $U=4-10$ (m/s). Hasil yang diperoleh, peningkatan kinerja tertinggi dengan pemasangan silinder sirkular didepan *returning blade* $d/D = 0,2$ pada jarak $S/D = 1,1$ didapat pada kecepatan angin 4 m/s dengan nilai CoP dan CM, yang masing-masing meningkat sebesar 44,5% dan 22,3%. Selain itu, ditemukan adanya pemasangan silinder sirkular didepan *returning blade* turbin memiliki *self starting capability*, meskipun hanya pada kecepatan angin 5 m/s.

Kata Kunci—Coefficient of Moment, Coefficient of Power, Silinder Sirkular, Turbin Savonius, Vertical Axis Wind Turbine.

I. PENDAHULUAN

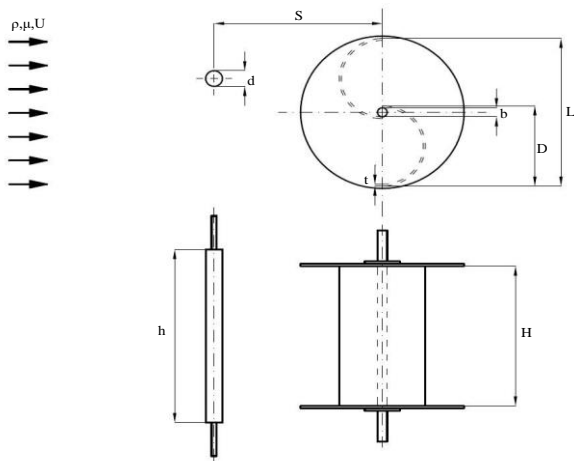
LISTRIK merupakan sumber energi utama yang menopang berjalannya kehidupan masyarakat. Jumlah populasi di Indonesia yang besar membuat kapasitas energi, terutama listrik, yang diperlukan juga besar. Terjadi kenaikan konsumsi listrik nasional sebesar 20 kWh/kapita pada tahun 2019, menjadi 1.084 kWh/kapita, dibandingkan pada tahun 2018 sebesar 1.064 kWh/kapita. Peningkatan ini sejalan dengan rasio elektrifikasi yang juga menunjukkan kenaikan. Rasionya dari 84,35% pada 2014 menjadi 98,89% pada 2019. Energi primer Indonesia didominasi oleh energi fosil. Permasalahan yang sedang dihadapi adalah pembangkit listrik berbasis batubara yang mendominasi pemenuhan kebutuhan listrik nasional, oleh karenanya cadangan batubara terus tergerus. Berdasarkan permasalahan diatas solusi yang dapat dimanfaatkan sebagai pengganti energi fosil yaitu energi angin. Indonesia memiliki kecepatan angin rata-rata sebesar 2 - 6 m/s, sehingga diperlukan suatu inovasi pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin. Untuk kecepatan angin yang

tidak terlalu besar sangat cocok dipilih turbin angin jenis Savonius. Turbin angin menggunakan prinsip konversi energi dan sumber daya alam yaitu angin. Turbin Savonius merupakan salah satu turbin angin yang paling sederhana dan tidak membutuhkan torsi awal yang besar. Namun ada permasalahan yang dihadapi dimana nilai dari efisiensi turbin angin Savonius ini masih sangat rendah maka dari itu dibutuhkannya penelitian agar dapat dilakukan optimasi terhadap performanya.

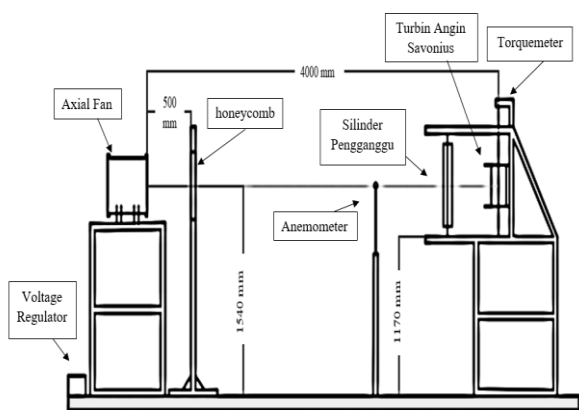
Penelitian dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di depan silinder utama [1]. Silinder utama berdiameter (D) sebesar 40 mm dan diameter silinder pengganggu (d) sebesar 1 – 10 mm. Jarak antara pusat silinder utama dan pusat silinder pengganggu (L) sebesar 50 – 120 mm. Penelitian ini menggunakan variasi d/D dan L/D . Dan bilangan Reynolds sebesar $1,5 \times 10^4 - 6,2 \times 10^4$. Hasil yang didapat dari penelitian ini bahwa penurunan nilai pressure drag coefficient (CD) berbanding terbalik dengan peningkatan bilangan Reynolds dan d/D serta seiring dengan penurunan L/D .

Penelitian dengan judul Studi Eksperimen pada Turbin Savonius One-stage [2]. Penelitian ini membahas mengenai pengaruh overlap ratio (m/D), aspect ratio (H/D), blade arc angle (ψ), blade shape factor (p/q) dan bilangan Reynolds (Re) pada performa turbin Savonius. Dari hasil eksperimen diketahui bahwa turbin Savonius yang dimodifikasi (tanpa poros) dengan overlap ratio (m/D) nol, aspect ratio (H/D) sebesar 0,7, blade arc angle (ψ) 124° , blade shape factor (p/q) sebesar 0,2 dan parameter end plate (Do/D) sebesar 1,1 menghasilkan coefficient of power maksimal sebesar 0,21 pada tip speed ratio 0,69 untuk bilangan Reynolds 150.000.

Penelitian dengan judul Studi Eksperimen Mengurangi Gaya Drag pada Sirkular Silinder dengan Menambahkan Silinder Tipe-I Sebagai Kontrol Pasif [3]. Penambahan silinder tipe-I yang diletakkan didepan silinder utama digunakan sebagai kontrol pasif dengan harapan untuk mengurangi gaya drag pada silinder sirkular utama. Silinder tipe-I divariasikan berbagai sudut pemotongan $\theta_s = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 53^\circ, \text{ dan } 65^\circ$ didepan silinder utama dan jarak antara silinder tipe-I dengan silinder utama adalah $S/d = 1,375$. Pengujian dilakukan pada bilangan Reynolds = $5,3 \times 10^4$. Hasil yang didapat pada penelitian ini menunjukkan terbukti bahwa penambahan silinder tipe-I sebagai kontrol pasif didepan silinder sirkular utama secara efektif dapat mengurangi gaya drag pada silinder utama. Pada pengujian dengan sudut pemotongan $\theta_s = 65^\circ$ menghasilkan



Gambar 1. Skema alat pengujian dan parameter ukur.

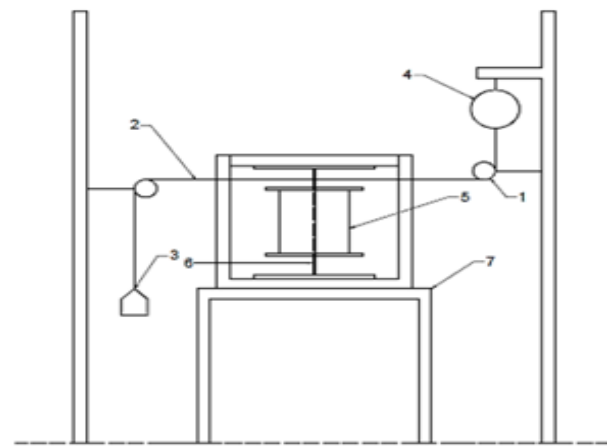


Gambar 2. Skema Instalasi alat pengujian serta dimensinya.

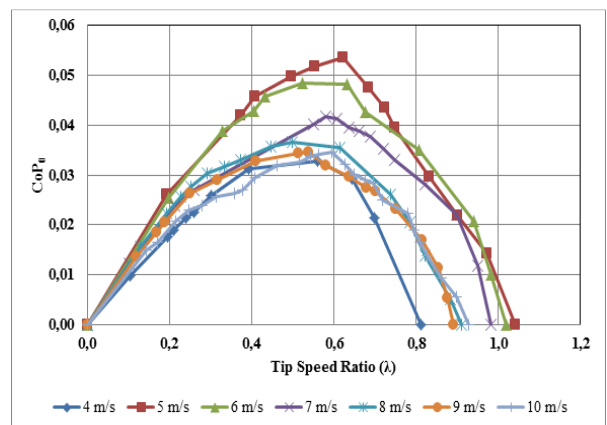
pengurangan gaya drag tertinggi. Penambahan silinder tipe-I ini dapat mengurangi gaya drag sekitar 0,52 kali dibandingkan tanpa penambahan.

Penelitian untuk meningkatkan performa rotor Savonius berdasarkan geometrinya [4]. Turbin angin diletakkan di depan wind tunnel dengan kecepatan angin pada rentang 0-13 m/s saat keluar dari wind tunnel dengan parameter berupa jumlah sudu turbin (dua, tiga, dan empat sudu), jumlah stages (single and double stages), overlap ratio (0 sampai 0,35), aspect ratio (0,5 ; 1; 2; 4; 5), dan keberadaan end plate. Berdasarkan penelitian tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa performa paling efisien ketika digunakan dua sudu turbin, *double stages*, tanpa *overlap ratio*, *aspect ratio* 5, dan dengan menggunakan end plate.

Penelitian dengan judul Studi Eksperimen dan Numerik Pengaruh Silinder tipe I-65° Pada Performansi Turbin Savonius [5]. Pada penelitian ini penambahan silinder pengganggu tipe I-65° yang diletakkan didepan returning blade diharapkan dapat menurunkan gaya drag yang terjadi sehingga meningkatkan performansi turbin savonius. Studi eksperimen dan numerik yang dilakukan membandingkan keadaan performansi turbin apabila ditambahkan silinder pengganggu dengan tidak adanya penambahan silinder pengganggu didepan returning blade apakah akan ada perubahan yang signifikan terhadap performansinya. Pengujian dilakukan dengan nilai bilangan reynolds $9,9 \times 10^4$ dengan panjang karakteristik $L = 2D-b$, dan silinder pengganggu memiliki diameter $0,5D$ yang diletakkan sejauh $1,4D$ didepan returning blade. Pada studi numerik, untuk



Gambar 3. Skema brake dynamometer.

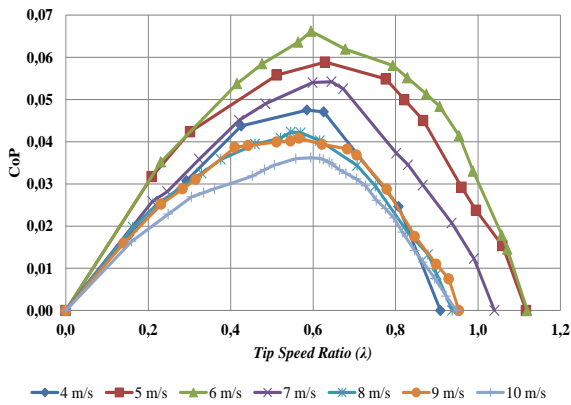


Gambar 4. Grafik Coefficient of Power Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Pada Masing-masing kecepatan udara 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 m/s.

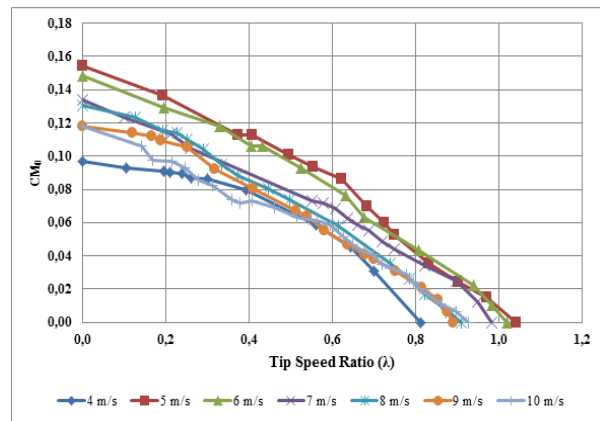
menganalisa aliran turbin angin savonius dilakukan simulasi 3D dengan software CFD dan ANSYS. Sedangkan pada studi eksperimen menunjukkan bahwa penambahan silinder pengganggu tipe I-65° dapat menaikkan CoP dari turbin savonius. Dibandingkan dengan turbin savonius tanpa penambahan silinder pengganggu, CoP mengalami kenaikan sekitar 26,3% hal ini tercapai pada TSR 0,8.

Penelitian lain yang terkait dengan peningkatan kinerja turbin angin Savonius yaitu Studi eksperimen peningkatan kinerja turbin angin Savonius dengan penempatan *circular cylinder* pada sisi *upstream* dari *returning blade* [6]. Penelitian ini dilakukan dengan pemasangan silinder pengganggu di depan returning blade dengan variasi S/D dalam penelitian ini adalah 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; dan 2,2. Hasil dari penelitian ini adalah terdapat peningkatan *coefficient of power* (C_p) ketika terjadi penambahan silinder pengganggu di depan returning blade turbin angin Savonius $S/D = 1,4$; 1,6; dan 1,8. *Maximum coefficient of power* terjadi pada saat *tip speed ratio* (λ) bernilai 0,65; 0,70; dan 0,67 peningkatan sekitar 12,2%; 6,7%; dan 1,7% masing-masing untuk $S/D = 1,4$; 1,6; dan 1,8.

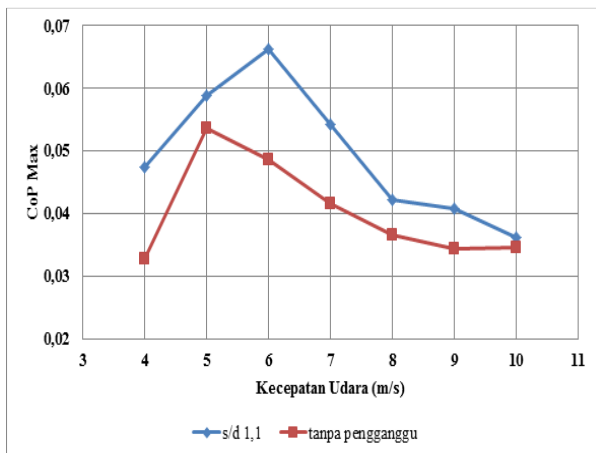
Dari beberapa penelitian diatas dapat diketahui bahwa penelitian mengenai peningkatan performa turbin angin jenis Savonius masih perlu terus dikembangkan agar mendapat hasil yang lebih optimal. Penelitian yang diusulkan dalam Tugas Akhir ini adalah upaya peningkatan performa turbin angin Savonius dengan cara menempatkan silinder pengganggu didepan returning blade dengan jarak antara silinder pengganggu dan sudu returning yang konstan $S/D =$



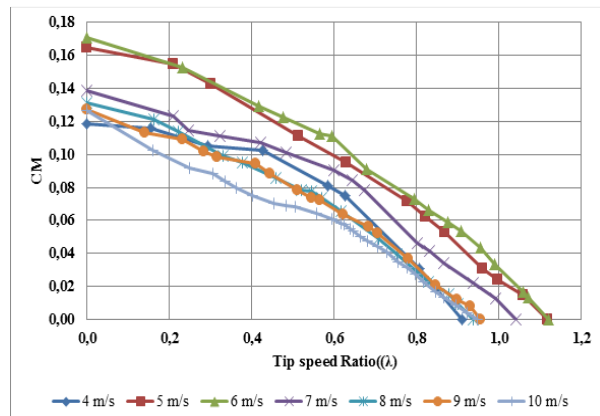
Gambar 5. Grafik Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Pada Masing-masing kecepatan udara 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s.



Gambar 7. Grafik Coefficient of Moment Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CM₀) Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Pada Masing-masing Kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Coefficient of Power Maksimal (CoPmax) Terhadap Kecepatan Angin Pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu.



Gambar 8. Grafik coefficient of moment turbin dengan silinder pengganggu (CM) fungsi tip speed ratio (λ) pada masing-masing kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s.

1,1 dan memvariasikan kecepatan aliran udara $U = 4 - 10$ m/s.

II. METODE PENELITIAN

Gambar 1 menjelaskan skema alat yang digunakan pada penelitian ini, dengan memvariasikan jarak antara pusat *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu (S) dan juga variasi kecepatan angin (U). Selain parameter yang divariasikan, performa turbin angin Savonius juga dipengaruhi oleh massa jenis udara (ρ), viskositas udara (μ), diameter *blade* (D), dan diameter silinder pengganggu (d). Beberapa parameter tersebut dijelaskan sebagai berikut :
Dimana:

D : diameter sudu turbin Savonius (m)

S : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)

d : diameter silinder pengganggu (m)

b : diameter poros (m)

L : diameter turbin (m)

U : kecepatan aliran (m/s)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

μ : viskositas fluida (Ns/m^2)

h : tinggi silinder pengganggu (m)

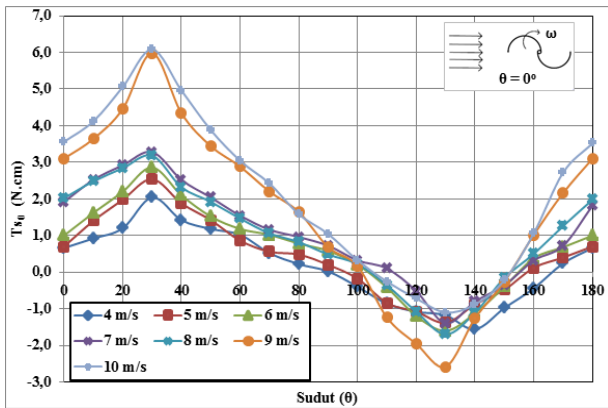
H : tinggi turbin (m)

ω : putaran sudu (n)

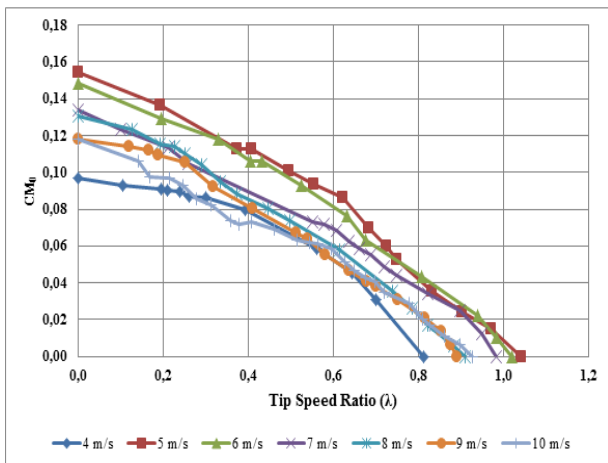
t : tebal sudu turbin (m)

A. Skema Eksperimen

Gambar 2 menjelaskan konfigurasi susuna pemasangan alat pengujian dalam eksperimen ini. Dimana turbin dipasang dengan jarak 4000mm dari *Axial fan* dengan spesifikasi fan adalah CKE-SF 45, speed = 1800 rpm, airflow = $12\text{ m}^3/\text{min}$, power = 1700 watt. Lalu diletakan *honeycomb* dengan ukuran 1×1 m dengan jarak 500 mm dari fan untuk menyeragamkan aliran udara yang keluar dari fan. Kemudian aliran udara diukur menggunakan *anemometer* dengan tipe model Omega HF141 dengan ketelitian $\pm 1\%$. *Tachometer* digunakan untuk mengukur putaran dari turbin dengan tipe model Omega HTT12 dengan ketelitian $\pm 1\%$. Untuk mengetahui torsi statis dari turbin angin digunakan *torquemeter* tipe model LUTRON TQ-8800 dengan tingkat ketelitian 0,01 N.cm. lalu digunakan juga *bearing* tipe mode SKF 6301- 2Z untuk mengurangi gesekan poros turbin yang berputar. Dan menggunakan timbangan neraca tipe model Nagata C-5 dengan ketelitian ± 50 grams yang dihubungkan dengan susunan *brake dynamometer*. Pengujian torsi dinamis dilakukan dengan penambahan beban dari turbin berputar tanpa pembebanan hingga pembebanan maksimum hingga akhirnya turbin berhenti berputar. Data dari timbangan neraca dan putaran turbin dicatat untuk melakukan perhitungan torsi dinamis, CoP serta CM. Pengujian untuk torsi stati dilakukan dengan mencengkram poros turbin dengan *torquemeter* pada setiap sudut dari sudu turbin dari $0^\circ - 180^\circ$, kemudian data



Gambar 9. Grafik torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (Ts0) sebagai fungsi posisi angular sudu(θ).



Gambar 10. Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) sebagai fungsi posisi angular sudu(θ).

yang didapat dari pembacaan *torquemeter* dicatat untuk kemudian didapat torsi statis dari turbin angin Savonius.

Gambar 3 menjelaskan skema susunan dari *brake dynamometer* dimana dari no 1 adalah sistem *pulley*, no 2 adalah benang *nylon* yang digunakan untuk menghubungkan no 4 timbangan neraca dengan no 4 massa pemberat yang sebelumnya dililitkan pada no 6 poros turbin angin savonius. *Brake dynamometer* ini berfungsi sebagai pengereman dari turbin angin Savonius, apabila pada kenyataannya *brake dynamometer* ini adalah generator. Awalnya turbin angin Savonius berputar tanpa pembebanan kemudian pembebanan dilakukan penambahan secara berkala hingga pembebanan maksimum yang artinya turbin dilakukan pengereman. Untuk mengetahui torsi dinamisnya maka massa yang terbaca sebagai pembebanan dan putaran dari turbin angin harus dicatat untuk menghasilkan torsi.

Keterangan :

1. Sistem *pulley*
2. Benang *nylon*
3. Massa Pemberat
4. Neraca Pegas
5. Turbin Angin Savonius
6. Poros Turbin Angin Savonius
7. Struktur Penyangga Turbin

B. Perhitungan Data

Dalam penelitian ini, torsi dinamis, *coefficient of power* dan *coefficient of moment* dari turbin angin Savonius didapat dari menghitung dari persamaan sebagai berikut:

$$T = \{m - s\} \cdot g \times r \tag{1}$$

Untuk persamaan *tip speed ratio* sebagai berikut :

$$TSR = \frac{\omega R}{U_{\infty}} \tag{2}$$

Dimana persamaan torsi dinamis diatas digunakan untuk menghitung *coefficient of moment* sehingga persamaan sebagai berikut:

$$CM = \frac{2 T_D}{\rho \cdot A \cdot U^2 \cdot L} \tag{2}$$

Untuk persamaan *coefficient of power* menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

Dimana

$$A = L \times H \tag{4}$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Coefficient of Power (CoP)

Gambar 4 menunjukkan data berupa nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan udara 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 m/s. Daya output yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius didapat dari perkalian torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin. Nilai torsi dinamis didapat dengan menggunakan *Brake Dynamometer* dengan menghitung selisih massa pemberat yang diberikan dan nilai yang terbaca pada neraca pegas dikalikan dengan percepatan gravitasi dan jari-jari poros yang dikenai benang. Penambahan variasi massa dilakukan untuk mendapatkan variasi nilai *tip speed ratio* (λ) dari turbin angin Savonius.

Dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *coefficient of power* mengalami kenaikan diawal dan kemudian setelah titik puncak optimum akan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya nilai dari *tip speed ratio* (λ). Di titik puncak didapatkan nilai *coefficient of power* maksimum pada λ optimum. dapat diketahui bahwa nilai CoP₀ maksimum tertinggi berada pada kecepatan aliran udara 5 m/s serta nilai CoP₀ maksimum terendah pada kecepatan aliran udara 4 m/s. Turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bekerja lebih optimal pada kecepatan aliran udara 5 m/s. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada kecepatan aliran udara 5 m/s mempunyai nilai CoP₀ maksimum yang paling tinggi dengan nilai 0,053 pada *tip speed ratio* 0,621 kemudian nilai CoP₀ menurun pada kecepatan aliran udara 4 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, 9 m/s, dan 10 m/s. Sedangkan pada kecepatan yang terlalu tinggi turbin tidak bekerja efektif dimana pada kecepatan ini nilai CoP₀ maksimumnya paling rendah.

Hal tersebut dapat disebabkan nilai CoP₀ Turbin angin Savonius fungsi *tip speed ratio* (λ) mempunyai bentuk grafik parabolik yang akan naik sampai CoP₀ maksimum pada kecepatan tertentu dan akan turun setelah melewati titik optimumnya. Dari hasil yang didapat maka diduga nilai CoP₀ maksimum pada kecepatan 5 m/s berada pada posisi titik optimum sehingga kinerja yang dihasilkan paling besar dibandingkan pada enam pengujian pada kecepatan udara lainnya, Dari ketujuh grafik diatas menunjukkan bahwa semakin meningkatnya kecepatan angin tidak menjamin nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius akan semakin meningkat. Dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius kurang efektif dioperasikan pada kecepatan angin yang terlalu rendah karena pada kecepatan yang terlalu rendah

kurang efektif dalam meningkatkan gaya drag walaupun terdapat kecepatan aliran fluida yang lebih tinggi namun turbin angin Savonius kurang dapat bekerja dengan efektif. Hal ini dikarenakan kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat putaran turbin berputar sangat cepat dan turbin akan membentuk seperti *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dan juga adanya kerugian kerugian mekanis, akibatnya daya turbin yang dihasilkan justru akan rendah.

Gambar 5 menunjukkan hasil grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,1 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,2 pada seluruh variasi kecepatan. Turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai TSR paling maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu juga berbeda, hal tersebut disebabkan pemasangan silinder pengganggu menyebabkan putaran poros turbin semakin meningkat. Didapat kenaikan nilai CoP terbesar pada kecepatan 4 m/s dengan kenaikan CoP sebesar 0,4445 atau 44,45 %. Hal ini disebabkan menurunnya gaya drag pada sisi *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* yaitu *advancing blade* dan *returning blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula.

Gambar 6 menjelaskan perbandingan CoP_{max} terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada seluruh variasi kecepatan angin. Grafik tersebut menunjukkan bahwa terjadi pergeseran nilai CoP dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ke turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu pada turbin tanpa silinder pengganggu nilai CoP_{max} berada pada kecepatan 5 m/s sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu berada pada kecepatan 6 m/s. secara keseluruhan pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,1 dengan rasio d/D sebesar 0,2 efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat menurunkan tekanan di depan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat [1].

B. Analisa Coefficient of Moment (CM)

Gambar 7 menjelaskan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap *tip speed ratio* (λ) tanpa silinder pengganggu pada seluruh variasi kecepatan. dapat dilihat bahwa *trendline* naik sampai titik maksimum dari *coefficient of moment* pada *tip speed ratio* (λ) optimum. Selanjutnya *trendline* akan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya nilai *tip speed ratio* (λ). Dapat dilihat bahwa nilai CM_0 maksimum tertinggi terdapat pada kecepatan 5 m/s yaitu sebesar 0,154

pada $\lambda = 0$. Torsi dinamis maksimum di setiap kecepatan didapat saat turbin angin Savonius akan berhenti, akibatnya disaat tersebut didapatkan nilai *coefficient of moment* (CM_0) maksimum. Dari grafik dapat diketahui untuk kecepatan 5 m/s memiliki nilai CM_0 maksimum paling tinggi dan untuk kecepatan 4 m/s nilai CM_0 maksimumnya paling rendah.

Gambar 8 menjelaskan bahwa penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D 1,1 untuk seluruh variasi kecepatan angin efektif dalam meningkatkan *coefficient of moment* (CM) turbin angin Savonius. Dapat dilihat bahwa peningkatan nilai CM tertinggi terletak pada kecepatan 4 m/s dengan nilai CM dari 0,096 pada *tip speed ratio* 0 menjadi 0,118 pada *tip speed ratio* 0 atau terjadi kenaikan sebesar 22,3 %. 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 tentang eksperimen penurunan gaya drag yang diterima oleh sebuah silinder utama dengan penggunaan sebuah silinder sirkular sebagai pengganggu [1].

C. Analisa Nilai Torsi Statis

Gambar 9 data hasil torsi statis dari turbin angin Savonius tanpa penggunaan silinder pengganggu (T_{s0}) pada saat *blade* turbin angin Savonius berada pada posisi angular sudu $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan tiap kenaikan 10° pada seluruh variasi kecepatan. dapat dilihat bahwa grafik tersebut berbentuk sinusoidal pada seluruh kecepatan angin. Pada seluruh variasi kecepatan angin didapatkan bahwa nilai torsi statis mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° . Lalu nilai torsi statis pada kecepatan angin tersebut mengalami penurunan hingga sudut 130° untuk kecepatan angin $V = 6, 7, 8, 9$ dan 10 m/s serta penurunan hingga sudut 140° untuk $V = 4$ m/s. Torsi statis negatif pada masing-masing variasi kecepatan memiliki rentang sudut yang berbeda-beda. Torsi statis maksimum dan minimum tertinggi terjadi pada saat kecepatan angin 10 m/s, karena semakin besar kecepatan angin semakin besar pula gaya drag yang diterima turbin angin Savonius. didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut 30° untuk seluruh kecepatan angin dan untuk torsi negatif terbesar pada sudut 130° untuk kecepatan angin $V = 5, 6, 7, 8, 9$ dan 10 m/s serta sudut 140° untuk $V = 4$ m/s. Torsi statis adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai torsi statis yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting*, sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Gambar 10 menjelaskan data hasil torsi statis dari turbin

angin Savonius dengan penggunaan silinder pengganggu (Ts) pada saat *blade* turbin angin Savonius berada pada posisi angular sudu $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan tiap kenaikan 10° pada seluruh variasi kecepatan. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu dan juga dapat membuat torsi statis pada rentang posisi angular sudu tertentu yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada $d/D = 0,2$ dan jarak $S/D = 1,1$ dapat meningkatkan kemampuan self starting dari turbin angin Savonius. Didapat juga nilai torsi yang positif pada seluruh posisi sudut dari sudu turbin yaitu pada kecepatan 5 m/s yang artinya pada kecepatan ini dengan penambahan silinder pengganggu turbin angin Savonius memiliki *self starting capability* yang baik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang dilakukan pada penelitian peningkatan performa Turbin Angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu didepan Returning Blade Turbin Angin Savonius dengan rasio jarak silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) = 1,1; rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) = 0,2 dengan variasi kecepatan angin sebesar 4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s; 9 m/s dan 10 m/s didapatkan beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut: (1) Pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio $S/D = 1,1$ dan $d/D = 0,2$ efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power* pada semua variasi kecepatan. Peningkatan *Coefficient of Power* yang paling tinggi terletak pada kecepatan angin 4 m/s dengan nilai CoP maksimum sebesar 0,0475 atau kenaikan sebesar 44,4%; (2) Pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio $S/D = 1,1$ dan $d/D = 0,2$ efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of*

Moment pada semua variasi kecepatan. Peningkatan nilai *coefficient of moment* tertinggi terletak pada kecepatan 4 m/s dengan nilai CM maksimum sebesar 0,1184 atau kenaikan sebesar 22,3%; (3) Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,2$ didepan *returning blade* turbin dengan jarak $S/D = 1,1$ untuk semua variasi kecepatan angin efektif meningkatkan nilai torsi statis 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 torsi statis yang bernilai negatif pada beberapa posisi angular sudu. Kecuali hanya pada kecepatan 5 m/s didapat nilai torsi statis positif pada semua posisi angular sudu hal ini menandakan turbin angin Savonius memiliki *self starting* yang baik; (4) Pada desain turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini memiliki kondisi rentang operasi terbaik yaitu pada *tip speed ratio* 0,5 sampai dengan 0,7 yang ditunjukkan pada semua kecepatan angin. Dimana pada rentang tersebut turbin memiliki nilai CoP yang optimum baik dengan dan tanpa penambahan silinder pengganggu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, and S. V. Prabhu, "Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1064–1073, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.09.019.
- [3] T. Yuwono, "Studi Eksperimen Mengurangi Gaya Drag pada Silinder Sirkular dengan Penambahan Silinder Tipe-I Sebagai Kontrol Pasif," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2009.
- [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] G. Sakti, "Studi Eksperimen dan Numerik Pengaruh Silinder Tipe I-650 Terhadap Performansi Turbin Angin Savonius," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.
- [6] T. Yuwono *et al.*, "Enhancing Savonius Turbine Self starting Capability by Installing a Circular Cylinder in Front of Returning Turbine Blade," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2020.