

Studi Eksperimen Kinerja Turbin Angin Savonius yang Terintegrasi dengan Gedung pada Jarak $G/D = 1,82$ dari Dinding

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

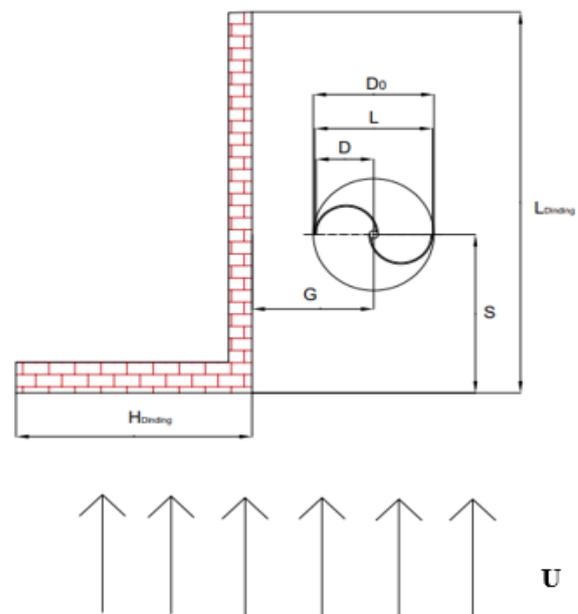
Abstrak—Energi memiliki peranan penting pada kehidupan manusia. Ketersediaan energi konvensional yang semakin berkurang akan menjadi tantangan. Dengan mengintegrasikan turbin angin Savonius pada gedung tinggi dapat menjadi solusi dalam pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai penghasil energi listrik. Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius dua sudu dengan diameter sudu (D) 165,2 mm, tinggi turbin (H) 303,4 mm, diameter poros (b) 19 mm, dan diameter *endplate* (D_o) 321 mm. Turbin diletakkan di samping model bangunan pada sisi *advancing*-nya dengan rasio jarak pusat turbin ke dinding terhadap diameter sudu turbin (G/D) sebesar 1,82. Variasi kecepatan angin yang digunakan adalah 4 hingga 9 m/s. Hasil penelitian yang diperoleh adalah kecepatan angin 8 m/s merupakan kecepatan optimum untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius, dibuktikan oleh peningkatan nilai *Coefficient of Power* (CoP_{max}) sebesar 14,7% dan peningkatan *Coefficient of Moment* (CoM_{max}) sebesar 15,9%. Pemasangan dinding disebelah di sudu *advancing* juga dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius pada seluruh variasi kecepatan angin, dengan peningkatan tertinggi yaitu pada kecepatan 9 m/s sebesar 79,9%.

Kata Kunci—*Coefficient of Moment*, *Coefficient of Power*, Kecepatan Angin, dan Turbin Angin Savonius.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA saat ini berada pada posisi keempat dengan laju pertumbuhan tertinggi dengan jumlah penduduk Indonesia tahun 2020 adalah 270.2 juta jiwa dan diperkirakan pertumbuhan penduduk Indonesia hingga tahun 2035 menjadi 305.7 juta jiwa [1]. Hal ini menyebabkan kenaikan konsumsi energi listrik sebesar 1.084,36 kWh/kapita pada bulan Juni 2020. Indonesia masih dominan menggunakan bahan bakar fosil seperti batubara 66%, gas 13%, minyak bumi 5% sebagai pembangkit listrik yang ketersediannya selalu berkurang setiap tahunnya. Berangkat dari masalah tersebut, Indonesia harus mempertimbangkan energi baru dan terbarukan untuk mengambil peran yang lebih besar dalam produksi listrik nasional, salah satunya energi angin yang pemanfaatannya baru sekitar 0,002% dari total potensinya atau sekitar 135 MW saja. Turbin angin Savonius adalah salah satu turbin angin penghasil energi listrik yang mampu memutar rotor walaupun pada kecepatan angin rendah, hal ini sesuai dengan kondisi kecepatan angin Indonesia. Pemasangan turbin angin Savonius di gedung pencakar langit menjadi lebih ideal karena angin dapat terhindar dari hambatan/penghalang sehingga dapat memperoleh kecepatan yang ideal sehingga menghasilkan efisiensi yang optimal, juga pada gedung tinggi tidak membutuhkan konstruksi atap yang karena turbin dapat dipasang pada *rooftop* ataupun dinding gedung.

Beberapa peneliti melakukan riset terhadap peningkatan



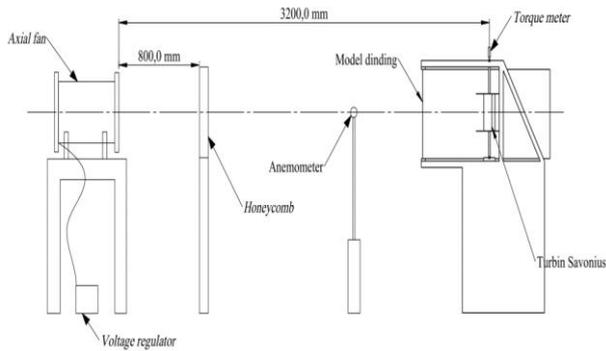
Gambar 1 Skema dan parameter penelitian.

Keterangan:

- U : Kecepatan angin (m/s)
- $H_{dinding}$: Lebar dinding bangunan (m)
- $L_{dinding}$: Panjang dinding bangunan (m)
- D : Diameter sudu turbin (m)
- D_o : Diameter *end plate* (m)
- L : Panjang karakteristik turbin (m)
- S : Jarak pusat turbin ke ujung depan dinding (m)
- G : Jarak pusat turbin ke dinding (m)

performa turbin angin Savonius diantaranya adalah N.H Mahmoud et al yaitu percobaan peningkatan performa turbin angin Savonius dengan melakukan variasi geometri turbin angin Savonius [2]. Variasi geometri yang digunakan dalam eksperimen ini adalah pada jumlah sudunya, 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; *aspect ratio* (α) sebesar 0.5, 1, 2, 4 dan 5; dan keberadaan *end plate*. Pada eksperimen ini rentang kecepatan angin yang keluar dari *wind tunnel* adalah 0-13 m/s. Dari eksperimen tersebut didapatkan hasil bahwa angin dengan jumlah sudu 2 lebih efisien dibandingkan dengan sudu 3 atau 4. Kemudian turbin angin dengan *double stages* lebih efisien dibandingkan *single stage*. Dan, turbin angin lebih efisien dengan menggunakan *end plates* dibandingkan tanpa *end plates*.

Pemanfaatan sistem *Building-Integrated Wind Turbine* (BIWT) pada kulit bangunan telah dilakukan oleh Park et al [3]. Penelitian ini mengusulkan sebuah inovasi *Building-integrated wind turbine* (BIWT) dengan memanfaatkan kulit bangunan secara langsung. Sistem yang diusulkan adalah



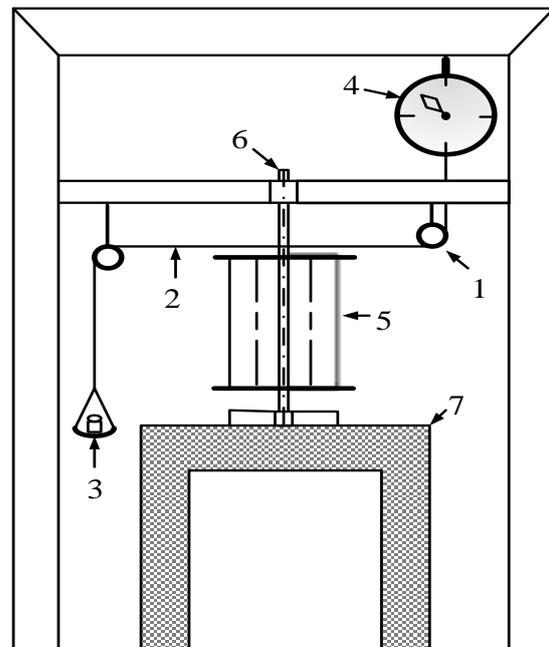
Gambar 2. Skema instalasi peralatan.

dengan menggabungkan *guide vane* dan rotor yang disesuaikan peletakannya pada kulit bangunan. Metode analisis penelitian ini adalah dengan simulasi *software* CFD untuk mendapatkan desain akhir dari *guide vane* dan rotor serta eksperimen dengan membuat prototipe yang diuji pada *wind tunnel*. Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah desain *guide vane* yang diusulkan adalah tipe 2 karena memiliki ruang di belakang *guide vane* yang lebih lebar, diameter rotor turbin sebesar 30 cm karena memiliki peformansi optimum, dan tipe sudu F8 karena menunukan peforma yang baik.

Penelitian yang dilakukan oleh Casini, yaitu analisis deksriptif mengenai perbedaan tipe *vertical wind turbines* yang tersedia dalam pasaran, termasuk meneliti produk dan menggambarkan bagaimana memasangnya di gedung (*Building Augmented Wind Turbines*) serta keuntungannya [4]. Pada penelitian ini dijelaskan bahwa turbin angin dibagi menjadi dua kelompok utama yaitu turbin angin Savonius dan Darrieus, dimana turbin Savonius memiliki kehandalan yang tinggi dan dapat dipakai pada kecepatan rendah, kekurangannya hanya pada efisiensi yang lebih kecil dibandingkan turbin angin Darrieus. Kemudian, terdapat beberapa pemasangan turbin angin pada gedung atau BAWT, yaitu BAWT yang diletakkan dekat dengan bangunan, BAWT yang diletakkan di antara gedung, dan BAWT yang diletakkan pada aliran udara di dalam gedung. Dan, keuntungan turbin angin Savonius di gedung adalah dapat menggantikan sistem fotovoltaik karena daya yang dihasilkan lebih tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh Mao et al, dengan meneliti performa turbin angin Savonius yang dipasang pada tepi gedung bertingkat menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) transien [5]. Penelitian ini menggunakan tiga variasi yaitu gap turbin, sudut arah angin, dan pengaruh turbin lainnya. Hasil penelitian pertama yang didapat yaitu hasil dengan menggunakan gap turbin yang kecil maka semakin besar nilai *coefficient of performance* (C_p). Hasil kedua, sudut arah angin yang baik untuk turbin angin Savonius sebesar 292.5° dengan nilai C_p adalah 1.2903. Hasil ketiga, turbin angin Savonius bekerja lebih efektif jika tidak dipengaruhi oleh turbin lainnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Choi et al melakukan eksperimen untuk mengetahui interaksi antara silinder berbentuk elips dan sirkular dengan sebuah plat datar yang diletakkan saling berdekatan [6]. Silinder elips yang digunakan dalam eksperimen memiliki axis ratio ($AR = A/B$) bernilai 2. Eksperimen ini menggunakan gap ratio atau rasio celah sebagai parameter. Eksperimen dilakukan dengan



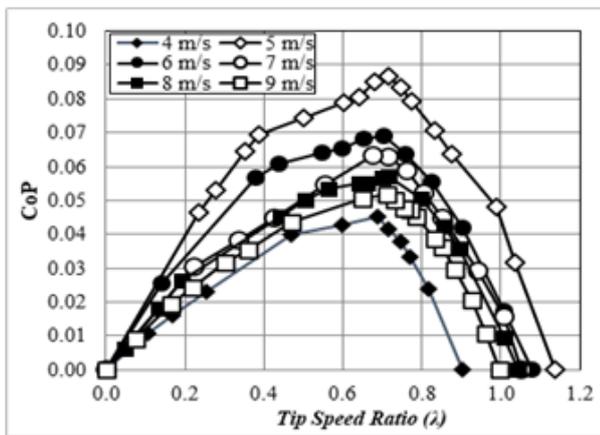
Gambar 3. Skema Brake Dynamometer.

Keterangan:

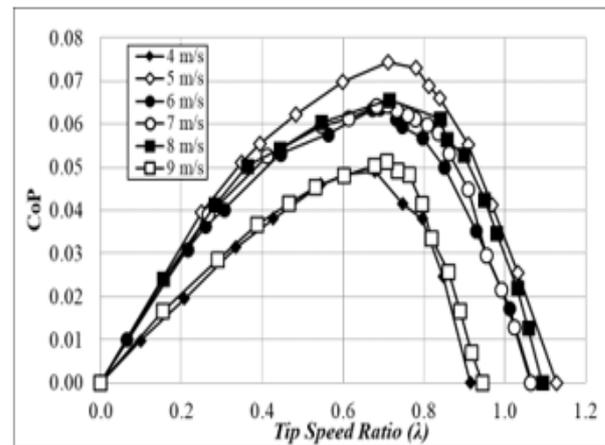
1. Pulley
2. Benang nilon
3. Anak timbangan
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Penyangga turbin angin Savonius

menggunakan kecepatan angin yang konstan sebesar 10 m/s. Hasil yang didapatkan yaitu pada silinder sirkular menghasilkan nilai Strodhal Number yang besarnya identi dengan perlahan naik seiring dengan peningkatan gap ratio sedangkan pada silinder elips memiliki selisih yang cukup kecil pada gap ratio yang rendah dan semakin tinggi gap ratio maka selisih yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa efek dari ground terhadap silinder elips lebih besar dibandingkan terhadap silinder sirkular. Selain itu, didapatkan bahwa koefisien drag yang dihasilkan semakin naik seiring dengan peningkatan gap ratio. Untuk $G/B < 0,5$ memiliki nilai koefisien drag silinder elips yang semakin meningkat seiring dengan peningkatan gap ratio. Koefisien drag yang dihasilkan oleh silinder sirkular juga meningkat secara drastis. Seiring dengan meningkatnya G/B akan menyebabkan nilai koefisien lift yang dihasilkan akan semakin turun dan konvergen menuju nol. Hasil ini menunjukkan bahwa distribusi tekanan pada bagian permukaan menjadi simetrik seiring dengan peningkatan G/B .

Dari penjelasan penelitian terdahulu dapat disimpulkan bahwa penelitian turbin angin Savonius terhadap bangunan masih dapat dikembangkan. Sehingga pada penelitian ini dilakukan eksperimen turbin angin Savonius dengan menempatkan dinding bangunan yang terbuat dari *multiplex* disebelah *advancing blade*. Jarak yang diteliti dari turbin angin Savonius ke dinding bangunan (G) sebesar 175 mm, dan akan memvariasikan kecepatan dari 4 hingga 9 m/s untuk mengetahui kecepatan yang paling efektif untuk menghasilkan kinerja turbin yang optimum pada jarak tersebut. Penelitian ini akan memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi BAWT serta dapat menjadi referensi dalam pemanfaatan potensi energi terbarukan.



Gambar 4. Grafik CoP_0 terhadap Tip Speed Ratio turbin angin Savonius tanpa dinding.



Gambar 5. Grafik CoP terhadap Tip Speed Ratio turbin angin Savonius dengan dinding pada G/D 1,82.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan melaksanakan eksperimen di mana performa turbin angin Savonius dengan penempatan model dinding dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa penempatan model dinding. Parameter yang mempengaruhi penelitian ini adalah kecepatan fluida berasal dari *axial fan* (U), jarak antara dinding samping bangunan ke turbin (G), diameter *endplate* (D_o), panjang turbin (L), dan diameter sudu turbin (D). Pada Gambar 1 ditunjukkan skema penelitian dan beberapa parameter yang digunakan pada eksperimen.

A. Skema Eksperimen

Skema instalasi peralatan yang digunakan selama eksperimen ditampilkan pada Gambar 2.

Axial fan berfungsi untuk menciptakan aliran udara, dihubungkan dengan *voltage regulator* yang dapat mengatur besar tegangan *output* sehingga kecepatan aliran udara yang keluar dari *axial fan* dapat diubah sesuai keperluan eksperimen. Jarak antara *axial fan* ke pusat turbin angin Savonius diatur sebesar 3200 mm. *Honeycomb* diletakkan di depan *axial fan* pada jarak 800 mm dengan tujuan untuk membuat aliran udara yang menuju turbin menjadi *uniform*. Turbin angin Savonius diletakkan pada kerangka penyangga di depan *honeycomb*. Dinding bangunan diletakkan di sebelah *advancing blade* dengan rasio dari pusat poros turbin dengan dinding terhadap diameter turbin (G/D) = 1,82 dimana dinding bangunan dan turbin angin Savonius diletakkan pada penyangga turbin. Di depan turbin angin Savonius dipasang *anemometer* yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang keluar dari *axial fan*. Di bagian poros atas turbin angin Savonius, dipasang *torque meter* yang digunakan untuk mengukur torsi statis turbin.

B. Benda Uji

1. Spesifikasi turbin angin Savonius yang digunakan pada eksperimen ini adalah sebagai berikut:
 - a. Diameter sudu (D) : 165,2 mm
 - b. Tinggi (H) : 303,4 mm
 - c. Diameter turbin (L) : 303,4 mm
 - d. Diameter poros (b) : 19 mm
 - e. Diameter *end plate* (D_o) : 321 mm
 - f. Tebal *end plate* : 1 mm

- g. Tebal sudu (x) : 4 mm
 - h. Material sudu : Pipa PVC
 - i. Material *end plate* : Aluminium *Cladding* 2024
2. Spesifikasi model dinding bangunan yang digunakan pada eksperimen ini adalah sebagai berikut:
 - a. Panjang : 1550 mm
 - b. Lebar : 450 mm
 - c. Tinggi : 705 mm
 - d. Tebal : 12 mm
 - e. Material : *Multiplex Wood*

C. Alat Ukur

1) Tachometer

Tachometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan putar poros turbin. *Tachometer* yang digunakan pada penelitian ini adalah *tachometer* merek OMEGA tipe HHT12 dengan resolusi 0,001 hingga 1,0 rpm dan akurasi 0,01%.

2) Anemometer

Anemometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang keluar dari *axial fan*. *Anemometer* yang digunakan pada penelitian ini adalah *anemometer* merek OMEGA tipe HHF92A dengan resolusi 0,01 m/s. Selain untuk mengukur kecepatan angin, *anemometer* pada penelitian ini juga digunakan untuk mengukur temperatur udara.

3) Torque meter

Torque meter adalah alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis yang dihasilkan poros turbin. *Torque meter* yang digunakan pada penelitian ini adalah *torque meter* merek LUTRON tipe TQ-8800 dengan resolusi 1 N-cm.

4) Brake Dynamometer

Brake dynamometer digunakan untuk mengukur nilai torsi dinamis turbin. Nilai torsi dinamis didapatkan dengan menghitung selisih berat beban pemberat dengan nilai yang terbaca pada neraca pegas. Skema instalasi *brake dynamometer* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.

D. Data Reduction

Eksperimen penelitian turbin angin Savonius ini diinvestigasi dengan menggunakan kecepatan angin yang

berasal dari *axial fan* (U) sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9, dengan bilangan Reynolds berturut-turut sebesar $7,72 \times 10^4$, $9,65 \times 10^4$, $11,57 \times 10^4$, $13,50 \times 10^4$, $15,43 \times 10^4$, dan $17,36 \times 10^4$. Bilangan Reynolds dihitung berdasarkan panjang karakteristik turbin (L) dan kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* (U), sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$Re_L = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (1)$$

di mana ρ adalah massa jenis udara sebesar $1,17 \text{ kg/m}^3$, U adalah kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* sebesar 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s, L adalah panjang karakteristik turbin ($L = 2D - b - 2x$) sebesar $0,3034 \text{ m}$, dan μ adalah viskositas udara sebesar $1,84 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$.

Tip Speed Ratio (λ) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2)$$

Di mana R adalah jari-jari turbin ($R = \frac{L}{2}$) sebesar $0,1517 \text{ m}$, U adalah kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* sebesar 4–9 m/s, dan ω adalah kecepatan sudut turbin (rad/s) yang dihitung dengan persamaan sebagai berikut, di mana n adalah jumlah putaran poros (rpm) yang diukur dengan *tachometer*:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} \quad (3)$$

Coefficient of Power (CoP) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$CoP = \frac{2|m - s|.g.r.\omega}{\rho A U^3} \quad (4)$$

Di mana m adalah massa pemberat pada *brake dynamometer*, s adalah massa yang terbaca pada neraca pegas pada *brake dynamometer*, g adalah percepatan gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$, r adalah jari-jari poros yang menerima beban *brake dynamometer* sebesar $0,0125 \text{ m}$, ω adalah kecepatan sudut turbin (rad/s), ρ adalah massa jenis udara sebesar $1,17 \text{ kg/m}^3$, A adalah luas penampang turbin angin Savonius yang terkena angin ($A = L.H$) sebesar $0,0921 \text{ m}^2$, dan U adalah kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* sebesar 4–9 m/s.

Coefficient of Moment (C_M) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_M = \frac{CoP}{\lambda} \quad (5)$$

Di mana CoP adalah nilai *Coefficient of Power* yang dihitung dengan persamaan 4, dan λ adalah nilai *Tip Speed Ratio* yang dihitung dengan persamaan 2.

Koefisien Torsi Statis (CTs) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$CTs = \frac{T_s}{\frac{1}{2}\rho A R U^2} \quad (6)$$

Di mana T_s adalah torsi statis turbin, ρ adalah massa jenis udara sebesar $1,17 \text{ kg/m}^3$, A adalah luas penampang turbin angin Savonius yang terkena angin ($A = L.H$) sebesar $0,0921 \text{ m}^2$, R adalah jari-jari turbin ($R = \frac{L}{2}$) sebesar $0,1517 \text{ m}$, dan U adalah kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* sebesar 4–9 m/s.

Data yang didapatkan dari eksperimen akan diolah

untuk mendapatkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), dan grafik Koefisien Torsi Statis (CTs) terhadap sudut sudu turbin (θ).

III. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

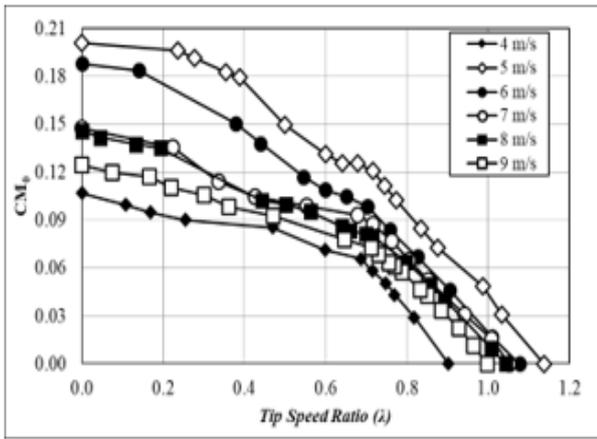
A. Analisis Coefficient of Power (CoP)

Nilai *Coefficient of Power* (CoP) yang didapatkan dari eksperimen dianalisis dan ditampilkan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Gambar 4 merupakan grafik *Coefficient of Power* (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Sedangkan, Gambar 5 merupakan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,82$ untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.

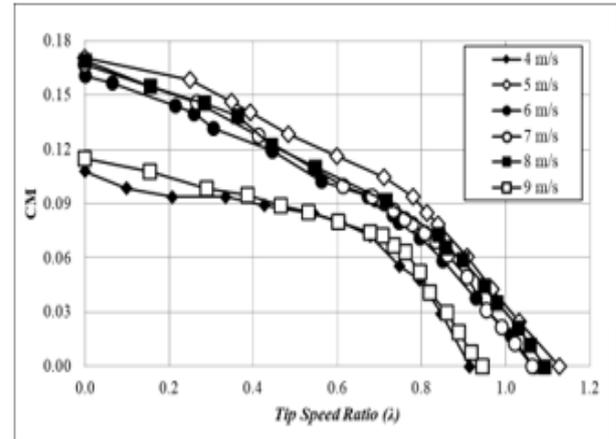
Nilai *Coefficient of Power* (CoP) didapatkan dari perbandingan daya yang dihasilkan turbin dengan daya teoritis yang diberikan aliran angin. Besar daya yang dihasilkan turbin merupakan hasil perkalian antara torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin. Nilai torsi dinamis didapatkan melalui pengukuran menggunakan *brake dynamometer*, sedangkan kecepatan sudut turbin diketahui dengan mengukur kecepatan putar turbin menggunakan *tachometer*.

Dari grafik pada Gambar 4, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa dinding (CoP_{0max}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar $0,0865$ dengan $\lambda = 0,717$. Pada kecepatan angin 4 m/s, nilai CoP_{0max} meningkat hingga kecepatan 5 m/s, kemudian menurun hingga kecepatan 9 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan CoP tidak berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angin. Apabila kecepatan angin terlalu rendah, kecepatan putar turbin juga rendah sehingga menghasilkan nilai CoP yang rendah. Namun, apabila kecepatan angin terlalu tinggi, akan terjadi fenomena *solid wall* di mana turbin berputar dengan cepat dan seakan-akan membentuk silinder pejal, sehingga aliran angin tidak dapat melewati sudu turbin dengan sempurna. Selain itu, seiring dengan putaran turbin yang semakin tinggi, kerugian mekanis yang terjadi pada turbin juga semakin besar. Kedua fenomena ini menyebabkan daya teoritis atau *input* yang diberikan oleh aliran angin tidak dapat sepenuhnya dimanfaatkan oleh turbin (terjadi *losses*), sehingga menyebabkan CoP bernilai rendah.

Pada Gambar 5, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin dengan dinding (CoP_{max}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar $0,0743$ dengan $\lambda = 0,711$. Namun nilai ini mengalami penurunan sebesar 16,4% dari pada nilai CoP_{0max} turbin tanpa dinding. Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 5 m/s, turbin sudah berada pada daerah *low velocity* sehingga angin cenderung mengenai sisi *returning blade* turbin, sehingga daya dan nilai CoP yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan. Nilai CoP_{max} terbaik terdapat pada kecepatan 8 m/s sebesar $0,0655$ dengan rentang *tip speed ratio* terbaik pada $0,6 - 0,8$ dengan peningkatan sebesar 14,5%. Hal ini disebabkan karena turbin angin Savonius berada pada *low velocity* yang terkena aliran *vortex* yang arahnya searah putaran turbin sehingga angin menyebabkan gaya drag pada sudu advancing meningkat dan



Gambar 6. Grafik CM_0 terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ turbin angin Savonius tanpa dinding.



Gambar 7. Grafik CM terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ turbin angin Savonius dengan dinding pada $G/D\ 1,82$.

menaikkan performa turbin angin Savonius.

Pada Gambar 4 dan Gambar 5, kurva untuk setiap nilai kecepatan angin memiliki *trendline* berbentuk parabolik. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh penambahan beban pada *brake dynamometer*. Pada saat kondisi tanpa beban, putaran turbin akan maksimum dan nilai $Tip\ Speed\ Ratio$ juga maksimum. Ketika beban ditambah, putaran turbin akan berkurang dan nilai $Tip\ Speed\ Ratio$ juga berkurang. Di sisi lain, penambahan beban menyebabkan peningkatan pada torsi dinamis turbin, sehingga nilai CoP akan meningkat hingga mencapai suatu titik optimum. Pada titik optimum, daya yang dihasilkan turbin, yang merupakan hasil perkalian torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin, mencapai nilai maksimum. Selanjutnya, ketika beban kembali ditambahkan, torsi dinamis akan terus meningkat, namun kecepatan putar turbin akan menurun sehingga daya yang dihasilkan turbin menurun dan nilai CoP juga akan menurun.

B. Analisis Coefficient of Moment (C_M)

Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) yang didapatkan dari eksperimen dianalisis dan ditampilkan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Gambar 6 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (CM_0) terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ (λ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Sedangkan, Gambar 7 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (CM) terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ (λ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,82$ untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.

Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) didapatkan dari perbandingan torsi dinamis turbin dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh aliran angin. Nilai torsi dinamis didapatkan melalui pengukuran menggunakan *brake dynamometer*.

Dari grafik pada Gambar 6, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa dinding (CM_{0max}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,2011. Pada kecepatan angin 4 m/s, nilai CM_{0max} meningkat hingga kecepatan 5 m/s, kemudian menurun hingga kecepatan 9 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan CM tidak berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angin. Apabila kecepatan angin terlalu rendah, kecepatan putar turbin juga rendah sehingga menghasilkan nilai torsi dinamis dan C_M yang rendah pula. Namun, apabila kecepatan terlalu tinggi, akan timbul fenomena *solid wall* di mana turbin berputar dengan cepat dan seakan-akan membentuk silinder

pejal, sehingga aliran angin tidak dapat melewati sudu turbin dengan sempurna. Selain itu, seiring dengan putaran turbin yang semakin tinggi, kerugian mekanis yang terjadi pada turbin juga semakin besar. Kedua fenomena ini menyebabkan torsi teoritis atau *input* yang diberikan oleh aliran angin tidak dapat sepenuhnya dimanfaatkan oleh turbin (terjadi *losses*), sehingga rasio torsi dinamis terhadap torsi teoritis (CM) akan bernilai rendah.

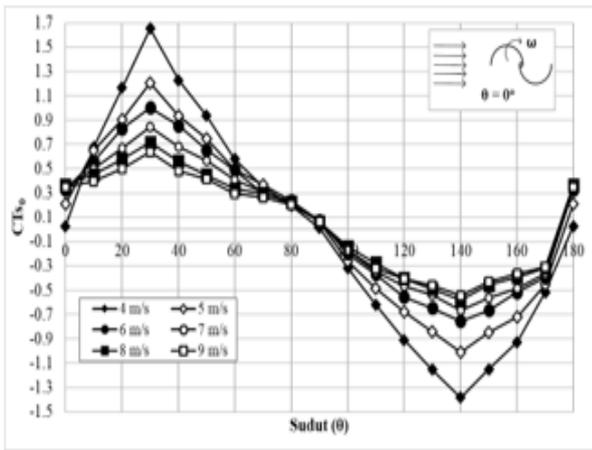
Dari grafik pada Gambar 7, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin dengan dinding (CM_{max}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,1705. Namun nilai ini mengalami penurunan sebesar 15,2% dari pada nilai CM_{0max} turbin tanpa dinding. Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 5 m/s, turbin sudah berada pada daerah *low velocity* sehingga angin cenderung mengenai sisi *returning blade* turbin, sehingga gaya drag pada sisi *returning* akan meningkat dan pembebanan yang dilakukan semakin kecil dibandingkan tanpa dinding sehingga nilai CM yang dihasilkan mengalami penurunan. Nilai CM terbaik pada kecepatan 8 m/s, yaitu sebesar 0,1691. Nilai ini 15,9% lebih tinggi dari pada nilai CM_{0max} turbin tanpa dinding. Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 8 m/s, turbin berada pada *low velocity* yang terkena aliran *vortex* yang arahnya searah putaran turbin. Akibatnya putaran turbin akan semakin besar dan membutuhkan pembebanan yang lebih besar untuk dapat mendiamkan turbin.

C. Analisis Koefisien Torsi Statis (CT_s)

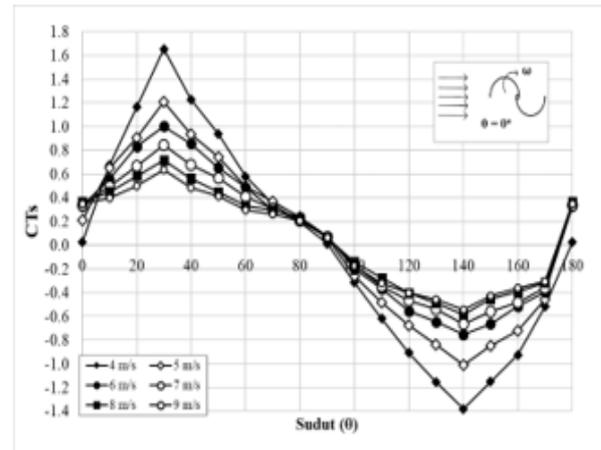
Nilai Koefisien Torsi Statis (CT_s) didapatkan dari perbandingan torsi statis turbin dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh aliran angin. Nilai torsi statis didapatkan melalui pengukuran menggunakan *torque meter*. Data torsi statis diambil untuk posisi sudut sudu turbin (θ) 0° hingga 180° dengan kenaikan setiap 10° .

Dari grafik pada Gambar 8, dapat diamati bahwa nilai CT_{s0} maksimum (CT_{s0max}) berada pada $\theta = 30^\circ$ untuk seluruh variasi kecepatan angin. Sedangkan, nilai CT_{s0} minimum (CT_{s0min}) berada pada $\theta = 140^\circ$ untuk seluruh variasi kecepatan angin. Nilai CT_{s0max} terbesar sebesar 1,65 dan nilai CT_{s0min} terkecil sebesar -1,38 pada kecepatan angin 4 m/s. Sedangkan, nilai Nilai CT_{s0max} terkecil sebesar 0,64 dan nilai CT_{s0min} terbesar sebesar -0,54 pada kecepatan angin 9 m/s.

Kurva untuk setiap nilai kecepatan angin memiliki *trendline* berbentuk sinusoidal. Nilai CT_{s0} meningkat seiring dengan peningkatan sudut sudu turbin (θ), pada sudut 0°



Gambar 8. Grafik CT_{s0} terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ turbin angin Savonius tanpa dinding.



Gambar 9. Grafik CT_s terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ turbin angin Savonius tanpa dinding.

hingga 30° serta pada sudut 140° hingga 180° . Hal ini menunjukkan adanya peningkatan torsi statis pada rentang sudut tersebut. Pada rentang sudut 0° hingga 30° , peningkatan torsi statis disebabkan oleh gaya *drag* pada *advancing blade* yang meningkat akibat bertambahnya luas penampang *advancing blade* yang terkena angin. Sedangkan pada rentang sudut 140° hingga 180° , peningkatan torsi statis disebabkan oleh gaya *drag* pada *returning blade* yang menurun akibat berkurangnya luas penampang *returning blade* yang terkena angin. Selain itu, dari grafik juga dapat diamati bahwa nilai CT_{s0} menurun pada sudut sudu turbin (θ) 30° hingga 140° . Penurunan nilai CT_{s0} menunjukkan adanya penurunan torsi statis pada rentang sudut tersebut. Penurunan torsi statis disebabkan oleh penurunan gaya *drag* pada *advancing blade* serta peningkatan gaya *drag* pada *returning blade*. Hal ini disebabkan oleh *advancing blade* yang menjauhi arah datangnya angin dan *returning blade* yang mendekati arah datangnya angin.

Grafik pada Gambar 8 juga menunjukkan adanya rentang sudut sudu turbin (θ) di mana CT_{s0} bernilai negatif, yaitu pada sudut 100° hingga 170° untuk seluruh variasi kecepatan angin. CT_{s0} bernilai negatif karena torsi statis yang bernilai negatif. Torsi statis yang bernilai negatif menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tidak mampu melakukan *self-starting* pada rentang sudut tersebut dan membutuhkan gaya dari luar agar dapat berputar. Di sisi lain, CT_{s0} positif mengindikasikan kemampuan *self-starting* turbin yang baik. Berdasarkan grafik pada Gambar 8, turbin angin Savonius memiliki kemampuan *self-starting* paling baik pada sudut 30° untuk seluruh variasi kecepatan angin. Selain itu, juga dapat diamati bahwa terjadi peningkatan nilai CT_{s0min} dari kecepatan 4 m/s hingga 9 m/s, yang menunjukkan bahwa kemampuan *self-starting* turbin meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan angin. Peningkatan nilai CT_{s0min} dikarenakan pada kecepatan angin yang semakin tinggi, selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* turbin semakin meningkat.

Gambar 9 menunjukkan grafik *Coefficient of Static Torque* (CT_s) dengan fungsi sudut sudu turbin angin Savonius pada turbin dengan dinding dengan kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Pada kecepatan 4 m/s memiliki nilai CT_s maksimum sebesar 1,65 pada sudut 30° dan CT_s minimum sebesar -1,35 pada sudut 140° , pada kecepatan 5 m/s memiliki nilai CT_s maksimum sebesar 1,209 pada sudut 30° dan CT_s

minimum sebesar -1,009 pada sudut 140° , pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai CT_s maksimum sebesar 1,002 pada sudut 30° dan CT_s minimum sebesar -0,75 pada sudut 140° , kecepatan 7 m/s memiliki nilai CT_s maksimum sebesar 0,84 pada sudut 30° dan CT_s minimum sebesar -0,66 pada sudut 140° , kecepatan 8 m/s memiliki nilai CT_s maksimum sebesar 0,71 pada sudut 30° dan CT_s minimum sebesar -0,58 pada sudut 140° , dan pada kecepatan 9 m/s memiliki nilai CT_s maksimum sebesar 0,63 pada sudut 30° dan CT_s minimum sebesar -0,54 pada sudut 140° . Berdasarkan grafik pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa kecepatan 9 m/s memiliki kemampuan *self starting* yang paling baik karena memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* negatif yang paling rendah.

Grafik pada Gambar 8 dan Gambar 9 memiliki trendline dimana nilai *Coefficient of Static Torque* akan meningkat seiring bertambahnya besar sudut sudu turbin hingga mencapai sudut sudu turbin tertentu yang kemudian akan dilanjutkan dengan penurunan *Coefficient of Static Torque* sampai pada sudut tertentu lalu akan dilanjutkan dengan kenaikan *Coefficient of Static Torque* lagi. Besarnya nilai *Coefficient of Static Torque* yang dihasilkan berbanding dengan kecepatan angin yang digunakan dimana nilai *Coefficient of Static Torque* negatif akan semakin rendah seiring dengan peningkatan kecepatan angin yang menyebabkan semakin besar kecepatan angin akan menyebabkan kemampuan *self starting* akan semakin baik. Apabila kecepatan angin yang digunakan semakin rendah maka energy kinetik yang digunakan untuk memutar turbin angin Savonius akan semakin kecil sehingga semakin rendah kecepatan angin yang digunakan akan menyebabkan turbin memiliki kemampuan *self starting* yang semakin buruk.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen untuk mengetahui performa turbin angin Savonius dengan memasang dinding disebelah sudu *advancing* dengan G/D 1,82, S/D 4,91, T/D 1,16, K/D 1,31 serta aspect ratio sebesar 1 pada variasi kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut: (1) Pemasangan dinding bangunan disebelah sudu *advancing* turbin angin Savonius dengan G/D 1,82 pada kecepatan 8 m/s efektif untuk diterapkan. Ditunjukkan oleh peningkatan nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebesar 14,7% dari turbin angin Savonius tanpa dinding. (2) Pemasangan

dinding bangunan disebelah sudu *advancing* turbin angin Savonius dengan G/D 1,82 pada kecepatan 8 m/s efektif untuk diterapkan. Ditunjukkan oleh peningkatan nilai *Coefficient of Moment* (CM) sebesar 15,9% dari turbin angin Savonius tanpa dinding. (3) Pemasangan dinding bangunan disebelah sudu *advancing* turbin angin Savonius dengan G/D 1,82 efektif untuk meningkatkan *self starting* pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Ditunjukkan dengan peningkatan nilai CTs negatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. P. Statistik, "Berita Resmi Statistik: Hasil Sensus Penduduk 2020." Badan Pusat Statistik, Jakarta, 2021.
- [2] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, and M. H. Nasef, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance," *Alexandria Eng. J.*, vol. 51, no. 1, pp. 19–25, 2012, doi: 10.1016/j.aej.2012.07.003.
- [3] M. Casini, "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56–65, 2016.
- [4] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *J. Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2636, 2020.
- [5] J. Park, H.-J. Jung, S.-W. Lee, and J. Park, "A new building-integrated wind turbine system utilizing the building," *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11846–11870, 2015.
- [6] J.-H. Choi and S.-J. Lee, "Ground effect of flow around an elliptic cylinder in a turbulent boundary layer," *J. Fluids Struct.*, vol. 14, no. 5, pp. 697–709, 2000.