

Studi Eksperimen Kinerja Turbin Angin Savonius Dekat Dinding Gedung pada Jarak $G/D=1,0018$

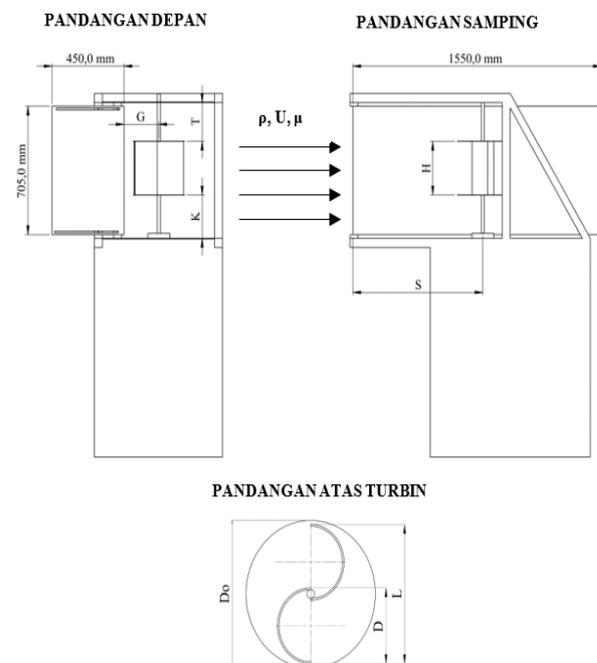
Naufallia Fitri Sholikhah dan Tri Yogi Yuwono
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Pemasangan turbin angin Savonius pada bangunan tinggi merupakan salah satu solusi yang potensial untuk memenuhi kebutuhan listrik pada kawasan perkotaan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan angin optimum yang menghasilkan kinerja terbaik pada turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan bangunan. 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. Sudu *advancing* turbin ditempatkan di samping model bangunan dengan rasio jarak pusat turbin ke dinding terhadap diameter sudu turbin (G/D) sebesar 1,0018. Variasi kecepatan angin yang digunakan adalah 4 hingga 9 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penempatan model bangunan di samping *advancing blade* pada jarak $G/D = 1,0018$ efektif dalam meningkatkan performa turbin pada kecepatan angin 4 m/s, dibuktikan dengan peningkatan *Coefficient of Power* maksimum (CoP_{max}) sebesar 55,43% dari *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa dinding (CoP_{0max}) dan peningkatan *Coefficient of Moment* maksimum (C_{Mmax}) sebesar 45,51% dari *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa dinding (C_{M0max}). Penempatan model bangunan juga efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin pada kecepatan angin 5 hingga 9 m/s, yang dibuktikan dengan peningkatan Koefisien Torsi Statis minimum (CT_{Smin}).

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

I. PENDAHULUAN

PERMINTAAN energi listrik di Indonesia diproyeksikan mencapai 2.214 TWh pada tahun 2050 dengan laju pertumbuhan rata-rata per tahun sebesar 7% [1]. Dalam usaha pemenuhan listrik, Indonesia masih banyak bergantung pada bahan bakar fosil yang ketersediaannya terbatas dan selalu berkurang setiap tahunnya, sebagai contoh produksi minyak bumi yang diperkirakan akan mengalami penurunan dari 292,4 juta barel pada tahun 2017 menjadi 53,8 juta barel pada tahun 2050 [2]. 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. Dewasa ini, seiring dengan pertumbuhan kawasan urban, turbin angin banyak dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan listrik di kawasan perkotaan dengan cara dipasang pada bangunan sebagai *Building Augmented Wind Turbine* (BAWT). Pemasangan pada gedung tinggi memungkinkan turbin untuk memanfaatkan aliran angin yang bebas hambatan. Salah satu jenis turbin angin yang cocok untuk diaplikasikan sebagai BAWT adalah turbin angin Savonius yang hanya menimbulkan getaran dan kebisingan relatif



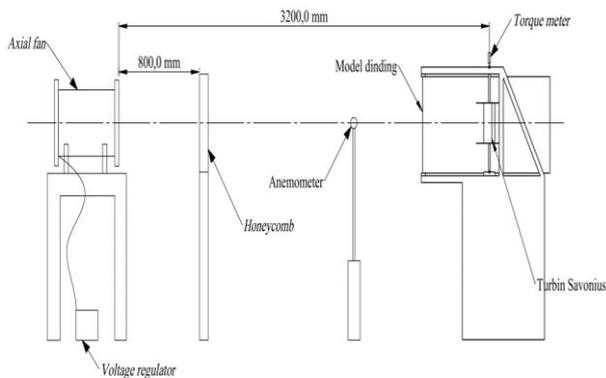
Gambar 1. Skema dan parameter penelitian.

Keterangan:

- U : Kecepatan angin (m/s)
- ρ : Massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : Viskositas udara ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)
- D : Diameter sudu turbin (m)
- D_o : Diameter *end plate* (m)
- L : Panjang karakteristik turbin (m)
- H : Tinggi turbin (m)
- S : Jarak pusat turbin ke ujung depan dinding (m)
- T : Jarak *end plate* atas ke ujung atas dinding (m)
- G : Jarak pusat turbin ke dinding (m)
- K : Jarak *end plate* bawah ke plat dasar penyangga turbin (m)

rendah, sehingga tidak mengganggu penghuni bangunan.

Beberapa penelitian terdahulu mengenai peningkatan efisiensi turbin angin Savonius serta aplikasi turbin angin yang dipasang pada bangunan telah dilakukan. Penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al. bertujuan untuk menentukan parameter operasional yang paling efektif dari turbin Savonius, di mana digunakan variasi geometri jumlah sudu (dua, tiga, dan empat sudu), jumlah *stage* (satu dan dua *stage*), *overlap ratio* (0 hingga 0,35), *aspect ratio* (0,5; 1; 2; 4; dan 5), serta ada tidaknya *end plate* [3]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin dengan dua sudu lebih efisien daripada turbin dengan tiga dan empat sudu. Turbin dua *stage* memiliki efisiensi yang lebih baik daripada satu *stage*. Performa turbin dengan *end plate* lebih baik daripada tanpa *end plate*. Turbin tanpa *overlap ratio* bekerja lebih baik daripada turbin dengan *overlap*. Peningkatan pada *aspect ratio* menyebabkan performa turbin meningkat.

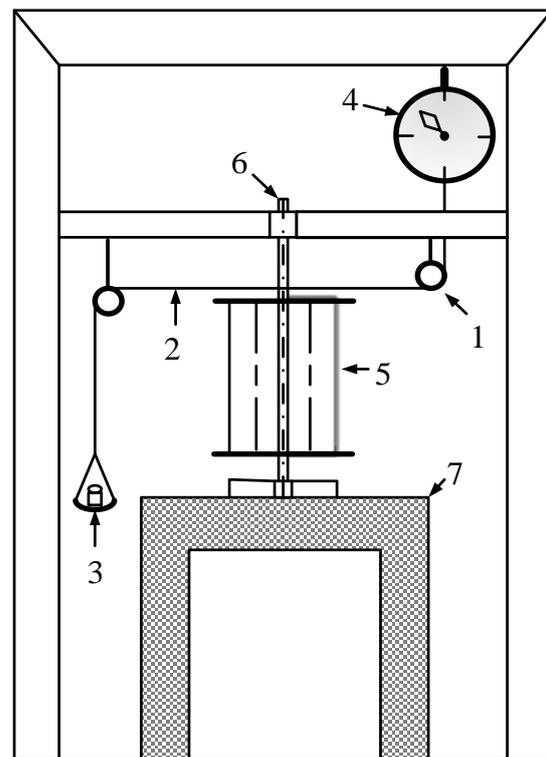


Gambar 2. Skema instalasi peralatan.

Penelitian yang dilakukan oleh Casini menunjukkan bahwa *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) memiliki beberapa keunggulan dibandingkan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), di antaranya tidak memerlukan *yaw mechanism*, mudah untuk dilakukan pemeliharaan, memiliki kemampuan *self-starting* yang baik, tidak memerlukan struktur menara yang tinggi, dan dapat memanfaatkan energi angin pada area seperti atap bangunan [4]. Selain itu juga disebutkan bahwa bangunan dapat menjadi lokasi yang baik untuk pemasangan VAWT (*Building Augmented Wind Turbine*/BAWT). Beberapa konfigurasi BAWT antara lain BAWT yang dipasang dekat bangunan seperti pada atap atau fasad, BAWT yang dipasang di antara bangunan, dan BAWT yang dipasang di dalam bangunan pada ventilasi/laluan udaranya. Dari data yang dihimpun oleh Casini juga dapat disimpulkan bahwa turbin angin lebih kompetitif dibandingkan sistem *photovoltaic* dalam hal biaya energi yang dihasilkan.

Penelitian yang dilakukan oleh Mao et al. bertujuan untuk menganalisis performa turbin angin Savonius yang dipasang pada tepi bangunan dengan kondisi aliran yang bervariasi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) [5]. Mao et al. mempelajari pengaruh *turbine gap*, *wind angle*, dan *adjacent turbine* terhadap performa turbin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa performa turbin menurun dengan meningkatnya *turbine gap* akibat perubahan pada *Jet Flow* dan *Recovery Flow*. Nilai C_p maksimum dicapai pada *turbine gap* $l = 0,75 D$ dan $TSR = 1,2$, yakni sebesar 0,7390 atau 234,4% lebih tinggi dibandingkan turbin angin Savonius yang bekerja pada aliran *uniform*. Pada penggunaan *adjacent turbines*, nilai C_p maksimum yang dicapai turbin adalah sebesar 0,4319 atau 29,2% lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tunggal dengan $l = 1,00 D$ dan $\phi = 45^\circ$. Walau begitu, nilai C_p yang dihasilkan masih jauh lebih tinggi dibandingkan turbin yang beroperasi pada aliran *uniform*. *Wind angle* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya yang dihasilkan turbin. Nilai C_p tertinggi dicapai pada *wind angle* $\theta = 292,5^\circ$ yakni sebesar 1,2093. Rata-rata nilai C_p maksimum dari seluruh *wind angle* adalah sebesar 0,4256 atau 92,5% lebih tinggi dibandingkan turbin yang beroperasi pada aliran *uniform*. Hal ini membuktikan bahwa turbin Savonius akan memberikan performa yang lebih baik ketika dipasang pada bangunan.

Penelitian yang dilakukan oleh Park et al. mengenai suatu sistem *Building Integrated Wind Turbine* (BIWT) yang secara langsung memanfaatkan kulit/dinding luar bangunan [6]. Sistem ini mengombinasikan rotor dengan *guide vane*

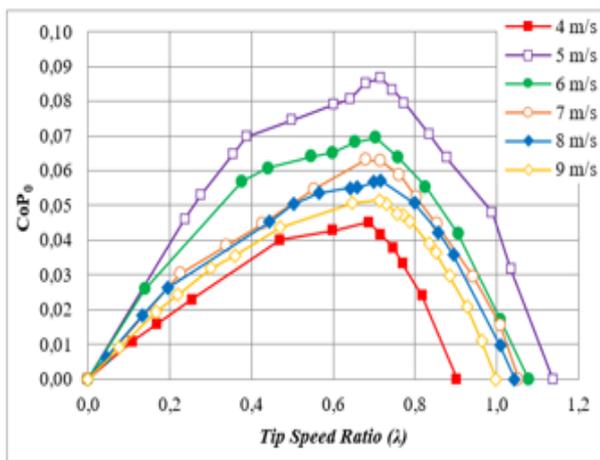
Gambar 3. Skema *brake dynamometer*.

untuk memusatkan aliran angin yang datang serta meningkatkan kecepatannya. Beberapa desain *guide vane* dan rotor dianalisis menggunakan metode CFD untuk mengetahui desain mana yang memberikan performa terbaik. Selanjutnya, dilakukan pengujian performa terhadap prototipe sistem. Ditemukan bahwa sistem BIWT berhasil mempercepat aliran angin sehingga *power coefficient* juga meningkat. Akhirnya, dapat disimpulkan bahwa sistem BIWT yang diusulkan merupakan sistem produksi energi yang ramah lingkungan untuk daerah perkotaan.

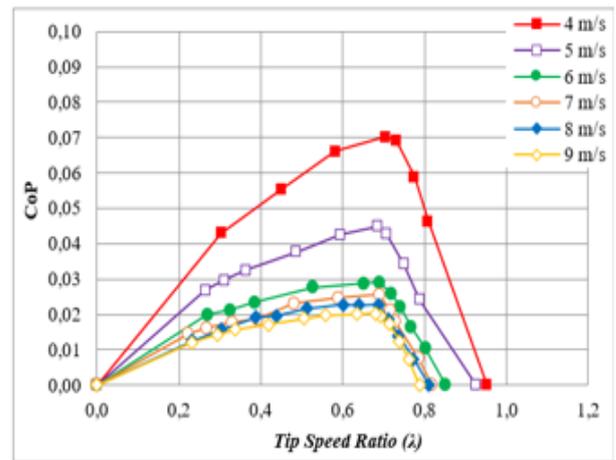
Dari beberapa penelitian terdahulu, belum banyak yang dilakukan untuk mengoptimalkan performa turbin angin, khususnya turbin angin Savonius, yang dipasang pada dinding luar bangunan. Permasalahan tersebut menjadikan penelitian ini menarik untuk dilakukan, di mana turbin angin Savonius diletakkan di samping model dinding bangunan pada jarak tertentu dengan variasi kecepatan angin sebesar 4–9 m/s. Performa turbin angin Savonius untuk setiap variasi kecepatan angin akan dianalisis untuk mengetahui nilai kecepatan angin optimum yang menghasilkan efisiensi terbaik. Penelitian ini akan memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi BAWT serta dapat menjadi referensi dalam pemanfaatan potensi energi terbarukan.

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-parameter yang berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius antara lain kecepatan angin (U), massa jenis udara (ρ), viskositas udara (μ), diameter sudu turbin (D), tinggi turbin (H), diameter poros turbin (b), jarak pusat turbin ke ujung depan dinding (S), jarak *end plate* atas ke ujung atas dinding (T), jarak pusat turbin ke dinding (G), jarak *end plate* bawah ke



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 penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,0018$.

plat dasar penyangga turbin (K), dan kecepatan sudut turbin (ω). 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*. Model dinding ditempatkan di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak (G/D) sebesar 1,0018. 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

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_0) : 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

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 yang dilakukan pada penelitian ini diinvestigasi dengan menggunakan kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s, 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:

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

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 m, dan μ adalah viskositas udara sebesar $1,84 \times 10^{-5}$ N.s/m².

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 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 m/s², r adalah jari-jari poros yang menerima beban *brake dynamometer* sebesar 0,0125 m, ω adalah kecepatan sudut turbin (rad/s), ρ adalah massa jenis udara sebesar 1,17 kg/m³, A adalah luas penampang turbin angin Savonius yang terkena angin ($A = L.H$) sebesar 0,0921 m², 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 kg/m³, A adalah luas penampang turbin angin Savonius yang terkena angin ($A = L.H$) sebesar 0,0921 m², R adalah jari-jari turbin ($R = \frac{L}{2}$) sebesar 0,1517 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.

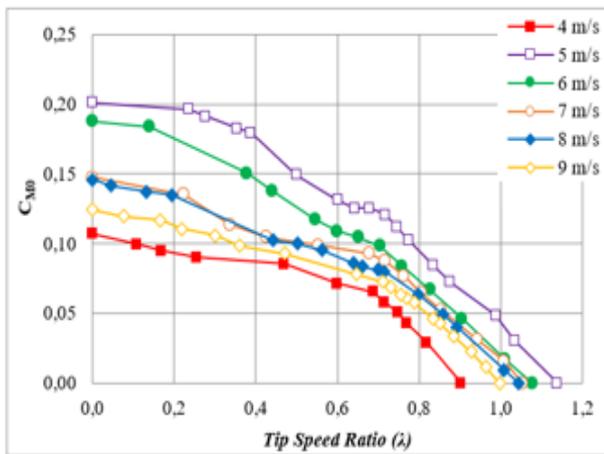
Gambar 4 merupakan grafik *Coefficient of Power* (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Sedangkan, Gambar 5 merupakan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,0018$ 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*.

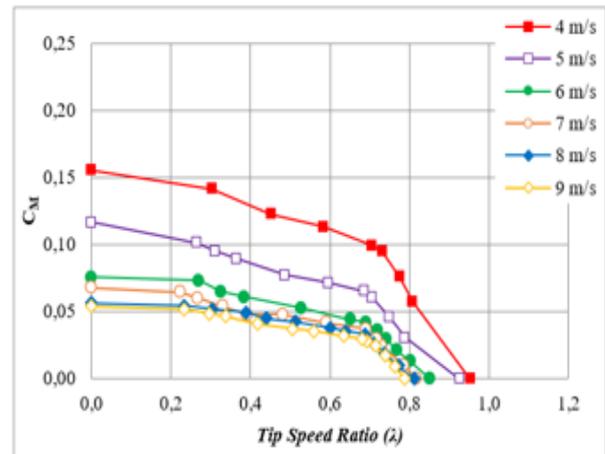
Dari grafik pada Gambar 4, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa dinding (CoP_{0max}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,0865 dengan $\lambda = 0,717$. Pada kecepatan angin 4 m/s, nilai CoP_{0max} meningkat hingga kecepatan 5 m/s, kemudian menurun hingga 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.

Dari grafik pada Gambar 5, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin dengan dinding (CoP_{max}) dicapai pada kecepatan angin 4 m/s, yaitu sebesar 0,0701 dengan $\lambda = 0,705$. Nilai ini 55,43% lebih tinggi daripada nilai CoP_{0max} turbin tanpa dinding. Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 4 m/s, aliran angin yang terdefleksi oleh dinding cenderung mengenai *advancing blade* turbin, sehingga kerja turbin dipengaruhi oleh daerah *high velocity* yang menyebabkan kecepatan angin yang mengenai turbin meningkat, sehingga daya dan nilai CoP yang dihasilkan turbin juga mengalami peningkatan. Nilai CoP_{max} terus mengalami penurunan mulai kecepatan angin 5 m/s hingga mencapai nilai terendahnya pada kecepatan angin 9 m/s, yang mana nilai CoP_{max} lebih rendah daripada nilai CoP_{0max} turbin tanpa dinding. Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 5–9 m/s, aliran angin yang menabrak dinding terdefleksi cukup kuat sehingga menyebabkan turbin berada dalam daerah *low velocity* yang menyebabkan kecepatan angin yang mengenai turbin menurun, sehingga daya dan nilai CoP yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan.

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



Gambar 6. Grafik C_{M0} terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ turbin angin Savonius tanpa dinding.



Gambar 7. Grafik C_M terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,0018$.

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* (C_{M0}) 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* (C_M) terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ (λ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,0018$ 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 (C_{M0max}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,2011. Pada kecepatan angin 4 m/s, nilai C_{M0max} meningkat hingga kecepatan 5 m/s, kemudian menurun hingga kecepatan 9 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan C_M 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 (C_M) akan bernilai rendah.

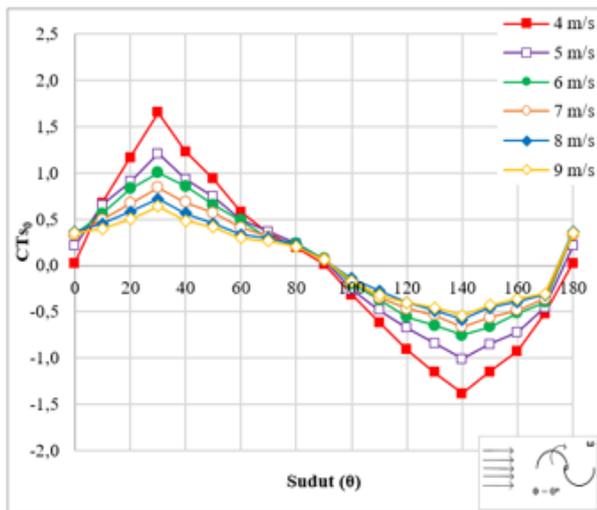
Dari grafik pada Gambar 7, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin dengan dinding (C_{Mmax}) dicapai pada kecepatan angin 4 m/s, yaitu sebesar 0,1557. Nilai ini 45,51% lebih tinggi daripada nilai C_{Mmax} turbin tanpa dinding. Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 4 m/s, aliran angin yang terdefleksi oleh dinding cenderung mengenai *advancing blade* turbin, sehingga kerja turbin dipengaruhi oleh daerah *high velocity* yang menyebabkan kecepatan angin yang mengenai turbin meningkat, sehingga daya dan nilai CoP yang dihasilkan turbin juga mengalami peningkatan. Nilai C_{Mmax} terus mengalami penurunan mulai kecepatan angin 5 m/s hingga mencapai nilai terendah pada kecepatan angin 9 m/s, yang mana nilai C_{Mmax} lebih rendah daripada nilai C_{M0max} turbin tanpa dinding. Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 5–9 m/s, aliran angin yang menabrak dinding terdefleksi cukup kuat sehingga menyebabkan turbin berada dalam daerah *low velocity* yang menyebabkan kecepatan angin yang mengenai turbin menurun, sehingga daya dan nilai C_M yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan.

C. Analisis Koefisien Torsi Statis (CT_s)

Nilai Koefisien Torsi Statis (CT_s) yang didapatkan dari eksperimen dianalisis dan ditampilkan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Gambar 8 merupakan grafik Koefisien Torsi Statis (CT_s) terhadap sudut sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Sedangkan, Gambar 9 merupakan grafik Koefisien Torsi Statis (CT_s) terhadap sudut sudu (θ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,0018$ untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/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

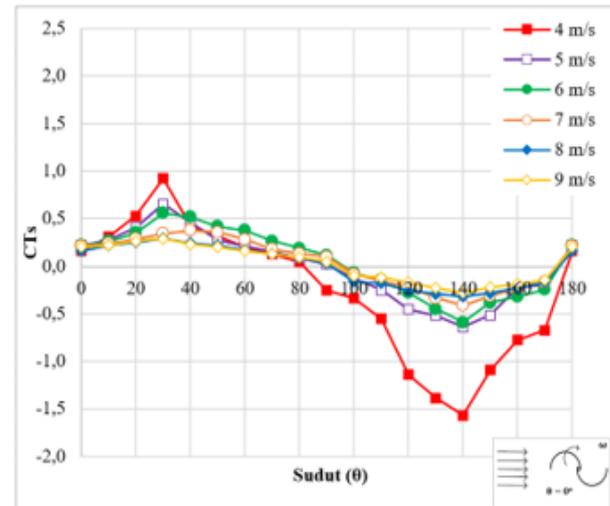


Gambar 8. Grafik CT_s terhadap sudut sudu turbin angin Savonius tanpa dinding.

kecepatan angin. Nilai $CT_{s_{max}}$ terbesar sebesar 1,65 dan nilai $CT_{s_{min}}$ terkecil sebesar -1,38 pada kecepatan angin 4 m/s. Sedangkan, nilai $CT_{s_{max}}$ terkecil sebesar 0,64 dan nilai $CT_{s_{min}}$ terbesar sebesar -0,54 pada kecepatan angin 9 m/s.

Kurva untuk setiap nilai kecepatan angin memiliki *trendline* berbentuk sinusoidal. Nilai CT_{s_0} meningkat seiring dengan peningkatan sudut sudu turbin (θ), pada sudut 0° 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_{s_0} menurun pada sudut sudu turbin (θ) 30° hingga 140° . Penurunan nilai CT_{s_0} 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_{s_0} bernilai negatif, yaitu pada sudut 100° hingga 170° untuk seluruh variasi kecepatan angin. CT_{s_0} 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_{s_0} 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 $CT_{s_{min}}$ dari kecepatan 4 m/s hingga 9 m/s, yang menunjukkan bahwa kemampuan *self-starting* turbin meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan angin. Peningkatan nilai $CT_{s_{min}}$ dikarenakan pada kecepatan angin yang semakin tinggi,



Gambar 9. Grafik CT_s terhadap sudut sudu turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,0018$.

selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* turbin semakin meningkat.

Dari grafik pada Gambar 9, dapat diamati bahwa pada kecepatan angin 4 m/s, nilai Koefisien Torsi Statis maksimum ($CT_{s_{max}}$) sebesar 0,92 pada $\theta = 30^\circ$ dan nilai Koefisien Torsi Statis minimum ($CT_{s_{min}}$) sebesar -1,57 pada $\theta = 140^\circ$. Pada kecepatan angin 5 m/s, nilai $CT_{s_{max}}$ sebesar 0,65 pada $\theta = 30^\circ$ dan nilai $CT_{s_{min}}$ sebesar -0,64 pada $\theta = 140^\circ$. Pada kecepatan angin 6 m/s, nilai $CT_{s_{max}}$ sebesar 0,56 pada $\theta = 30^\circ$ dan nilai $CT_{s_{min}}$ sebesar -0,59 pada $\theta = 140^\circ$. Pada kecepatan angin 7 m/s, nilai $CT_{s_{max}}$ sebesar 0,37 pada $\theta = 40^\circ$ dan nilai $CT_{s_{min}}$ sebesar -0,41 pada $\theta = 140^\circ$. Pada kecepatan angin 8 m/s, nilai $CT_{s_{max}}$ sebesar 0,29 pada $\theta = 30^\circ$ dan nilai $CT_{s_{min}}$ sebesar -0,32 pada $\theta = 140^\circ$. Pada kecepatan angin 9 m/s, nilai $CT_{s_{max}}$ sebesar 0,29 pada $\theta = 30^\circ$ dan nilai $CT_{s_{min}}$ sebesar -0,28 pada $\theta = 140^\circ$. Dari grafik pada Gambar 9, dapat disimpulkan bahwa kemampuan *self-starting* terbaik pada turbin angin Savonius yang ditempatkan di samping model dinding pada jarak $G/D = 1,0018$ dicapai pada kecepatan angin 9 m/s karena memiliki nilai $CT_{s_{min}}$ paling rendah. Selain itu, dari grafik pada Gambar 9 juga dapat diketahui bahwa pada kecepatan angin 5–9 m/s, terjadi peningkatan kemampuan *self-starting* pada turbin akibat nilai $CT_{s_{min}}$ yang lebih tinggi dibandingkan nilai $CT_{s_{min}}$ pada turbin tanpa dinding.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada hasil penelitian mengenai pengaruh penempatan model dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,0018$ dengan variasi kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s terhadap performa turbin, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut: (1) Penempatan model dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,0018$ efektif dalam meningkatkan performa turbin pada kecepatan angin 4 m/s, dengan nilai *Coefficient of Power* maksimum (CoP_{max}) sebesar 0,0701. Nilai tersebut memberikan peningkatan sebesar 55,43% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum pada turbin tanpa dinding (CoP_{0max}). (2) Penempatan model dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,0018$ efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* turbin pada kecepatan angin 4 m/s, dengan nilai

Coefficient of Moment maksimum (C_{Mmax}) sebesar 0,1557. Nilai tersebut memberikan peningkatan sebesar 45,51% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada turbin tanpa dinding (CM_{0max}). (3) Penempatan model dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,0018$ efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin pada kecepatan 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s yang ditunjukkan oleh peningkatan Koefisien Torsi Statis minimum (CT_{smin}). Namun usaha ini belum mampu untuk membuat turbin angin Savonius memiliki kemampuan *self-starting* di semua posisi angular sudu yang ditandai dengan adanya torsi statis bernilai negatif di beberapa posisi sudut sudu pada seluruh variasi kecepatan angin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, "Outlook Energi Indonesia." Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta, 2019.
- [2] A. Sugiyono, I. Fitriana, and L. Wahid, "Outlook Energi Indonesia 2019: Dampak Peningkatan Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan terhadap Perekonomian Nasional." PPIPE-BPPT Jakarta, 2019.
- [3] 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.
- [4] M. Casini, "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56–65, 2016.
- [5] 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.
- [6] 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.