

Studi Eksperimental Kinerja Turbin Angin Savonius yang Dekat dengan Dinding Gedung pada Jarak $G/D=1,7$

Naila Hanin Laksita dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

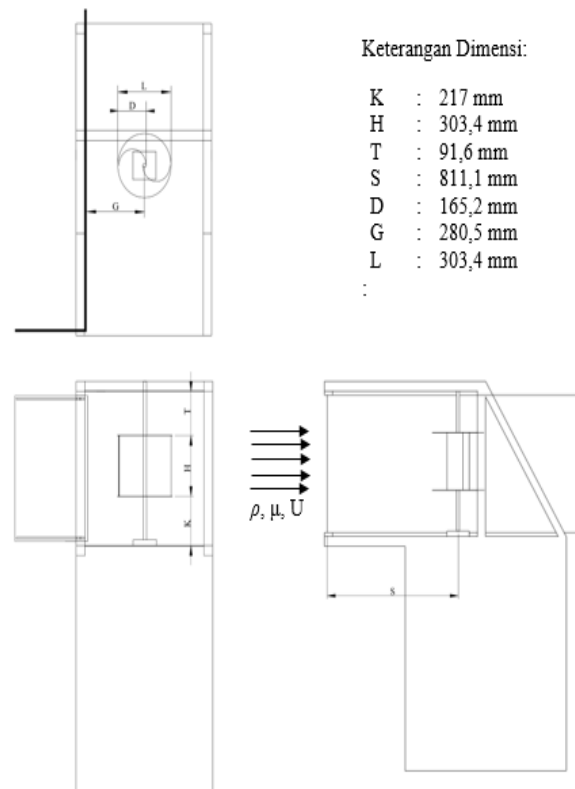
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Dalam usaha mengurangi ketergantungan konsumsi bahan bakar fosil sebagai bahan bakar utama pembangkit listrik, penggunaan turbin angin dapat menjadi solusi terbaik. Prinsip kerja turbin angin Savonius adalah memanfaatkan selisih torsi akibat gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar menghasilkan energi mekanis yang akan dikonversi menjadi energi listrik. Penelitian ini dilakukan dengan menempatkan *advancing blade* turbin angin Savonius dekat dinding gedung. Turbin angin Savonius yang digunakan memiliki 2 sudu dengan diameter sudu (D) 165,2 mm, *aspect ratio* (H/L) = 1 dan variasi kecepatan angin bernilai 4 sampai dengan 10 (m/s) pada jarak celah antara model dinding dengan turbin (G/D) = 1,7. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menempatkan *advancing blade* turbin angin Savonius dekat dinding gedung efektif meningkatkan performa turbin. Nilai tertinggi diperoleh pada kecepatan angin 5 m/s yaitu diperoleh *coefficient of power maximum* sebesar 0,0747 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,687. Sedangkan peningkatan nilai *coefficient of power maximum* tertinggi pada kecepatan angin (U) 4 m/s yaitu sebesar 16% dengan nilai 0,0504 pada *tip speed ratio* (λ) 0,717 dan nilai *coefficient of moment* maksimum pada kecepatan 4 m/s sebesar 6,07%. Serta, adanya penempatan dinding untuk semua variasi kecepatan mampu menyebabkan turbin Savonius memiliki *self-starting* yang lebih baik pada semua posisi angular sudu.

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

I. PENDAHULUAN

PENINGKATAN laju pertumbuhan penduduk berakibat pada meningkatnya kebutuhan konsumsi listrik. Berdasarkan statistik Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, konsumsi tenaga listrik perkapita 1,08 MWh pada tahun 2019 meningkat 1,9% dari tahun sebelumnya. Dalam pemenuhan konsumsi listrik ini tidak terlepas dari ketergantungan bahan bakar fosil yang menjadi sumber bahan bakar utama. Seperti yang dilaporkan oleh IESR tahun 2019 dominasi produksi energi listrik oleh input bahan bakar fosil menyumbang 88% [1]. Sehingga kondisi ini akan meningkatkan intensitas emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang akan memperburuk kualitas lingkungan. Pada tahun 2013, pembangkit listrik telah menghasilkan emisi GRK sebesar 172,294 Gg CO₂e yang meningkat menjadi 261,427 Gg CO₂e pada tahun 2018 [2]. Untuk mengatasi ketergantungan konsumsi bahan bakar fosil dan memangkas emisi karbon, maka perlu pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) sebagai solusi dari permasalahan lingkungan.



Gambar 1. Skema dan parameter ukur alat penelitian.

Keterangan:

S : Jarak antara sudut depan dinding dengan tepi pusat poros turbin

L : Panjang Karakteristik turbin

G : Jarak antara dinding bangunan dengan pusat poros turbin (m)

K : Jarak *endplate* bawah terhadap plat dasar penyangga turbin (m)

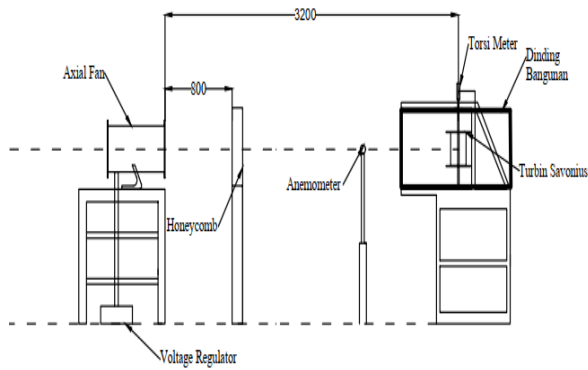
H : tinggi turbin

U : kecepatan aliran udara

ρ : densitas udara

μ : viskositas udara

Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan energi baru dan terbarukan, salah satunya adalah energi angin atau bayu dengan kecepatan aliran angin rata-rata sebesar 3-6 m/s. Saat ini, daerah perkotaan di Indonesia terdapat 105 gedung dengan ketinggian melebihi 150 meter. Banyaknya bangunan bertingkat tersebut dapat menjadi potensi yang sangat besar dalam pengembangan energi angin dengan mengintegrasikan turbin angin di dinding gedung (BIWT). Pemasangan turbin angin di ketinggian gedung tersebut menjadikan aliran udara akan mengalir bebas tanpa ada gangguan dari pohon, bangunan sekitar yang lebih rendah dan lain sebagainya. Sehingga, kecepatan aliran udara akan lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin yang dipasang pada bangunan rendah. Dengan kondisi kecepatan angin di

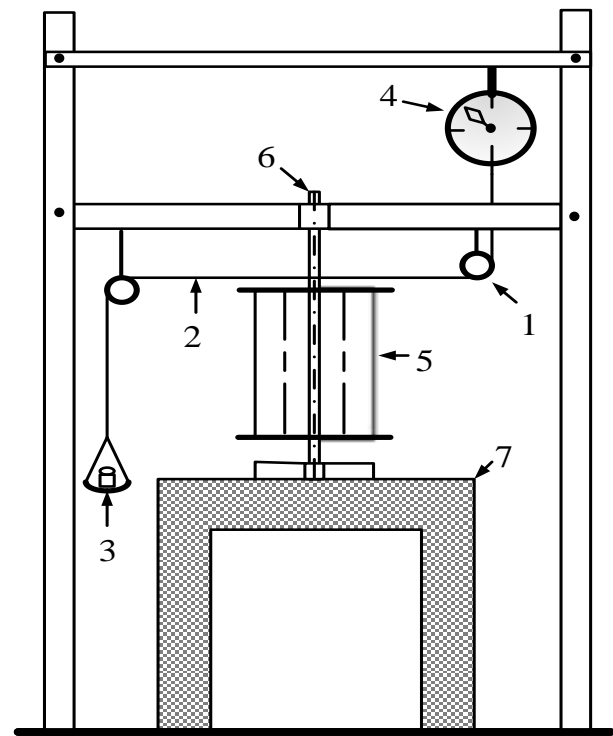


Gambar 2. Skema Eksperimen alat penelitian.

Indonesia, pemilihan jenis turbin angin yang ideal untuk digunakan adalah VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) tipe Savonius. Turbin ini menghasilkan daya dengan memanfaatkan dari selisih gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Selisih gaya *drag* kedua sudu tersebut dikalikan dengan jari-jari sudu yang akan menghasilkan torsi turbin angin Savonius. Dari nilai torsi tersebut dikalikan dengan nilai kecepatan angular dari turbin menghasilkan daya turbin.

Guna mengetahui pengaruh turbin angin Savonius dan pemasangannya pada bangunan, maka dibutuhkan penelitian terdahulu sebagai pendukung penelitian ini. Salah satu penelitian mengenai analisis peningkatan performa turbin angin Savonius telah dilakukan oleh [3]. Pada penelitian ini, digunakan variasi pada geometri. Dimana, variasi yang diubah adalah jumlah sudu (dua, tiga, dan empat sudu); Jumlah *stages* turbin (satu dan dua *stage*); *overlap ratio* (β) (0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35); *aspect ratio* (α) untuk 0,5; 1; 2; 4; dan 5; serta dengan atau tanpa menggunakan *end plate*. Dengan metode pengujian turbin angin Savonius di depan *wind tunnel* berdiameter 49 cm, jarak antara keluaran *wind tunnel* dan turbin angin Savonius sebesar 125 cm, dan pada sisi keluaran *wind tunnel* divariasikan kecepatan angin sebesar 0-13 m/s. Sudu turbin terbuat dari pipa PVC dengan variasi diameter yaitu 0,3; 0,2; 0,1; dan 0,08 m. Pada *end plate* dibuat dari bahan kayu dengan ketebalan 2,5 mm dan diameter 10% dari diameter turbin. Dari hasil penelitian, didapatkan bahwa pada turbin angin Savonius dengan menggunakan dua sudu, *double stage*, nilai *overlap ratio* sebesar 0, nilai *aspect ratio* sebesar 5, dan penggunaan *end plate* mampu meningkatkan performa dari turbin angin Savonius.

Penelitian oleh Casini et al. menganalisis tipe-tipe dari *vertical axis wind turbines* (VAWT) yang tersedia di pasar [4]. Analisis yang dilakukan mencakup investigasi produk, ilustrasi cara yang mungkin dilakukan dalam pemasangan turbin VAWT pada bangunan, serta keuntungan yang dicapai dalam produksi energi menggunakan sistem *Building Augmented Wind Turbines* (BAWT) dibandingkan dengan sistem *photovoltaic* (sel surya). Metode dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif dengan mengamati dari berbagai literatur yang berhubungan dengan pokok permasalahan ini. Disimpulkan dari hasil penelitian ini adalah (i) sudah tersedia berbagai macam VAWT di pasar dengan mempertimbangkan sesuai kebutuhan; (ii) terdapat tiga cara pemasangan turbin



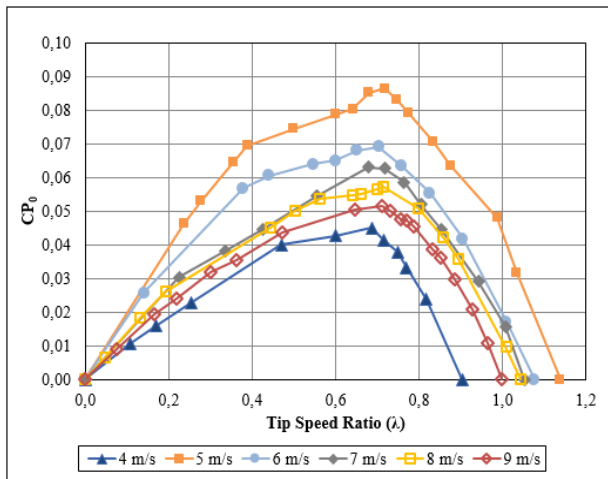
Gambar 3. Skema *brake dynamometer*.

Keterangan:

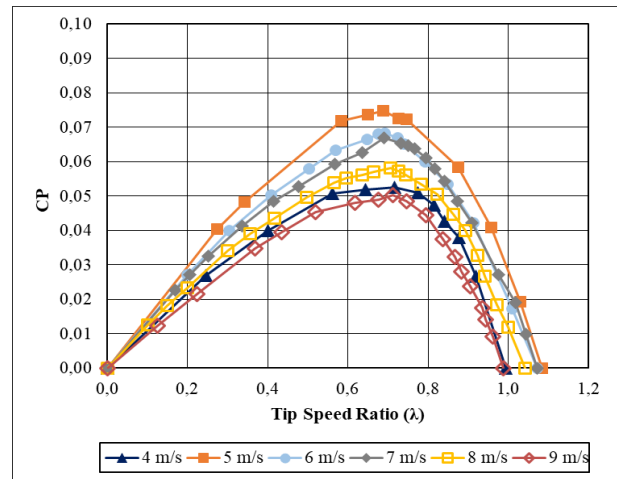
1. *Pulley*
2. Benang
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

angin menggunakan sistem BAWT guna mendapatkan efisiensi energi turbin angin Savonius pada bangunan

Pemasangan turbin angin Savonius menggunakan sistem BIWT (*Building Integrated Wind Turbines*) di sudut bangunan telah dilakukan penelitian oleh Mao et al. [1], [5]. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi performa turbin angin Savonius yang dipasang di sudut gedung bertingkat dan aliran interaksi antara turbin angin dan bangunan di perkotaan. Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan dalam penelitian ini. Terdapat tiga variasi yang digunakan sebagai faktor utama pada penelitian ini yaitu (i) *gap* antara pusat turbin dengan sudut gedung; (ii) turbin yang berdekatan (*adjacent turbine*); (iii) arah angin. Dapat disimpulkan dari hasil penelitian ini adalah peningkatan daya turbin terjadi ketika jarak antar celah turbin dengan bangunan semakin dekat dengan bahwa nilai *coefficient of power* (C_p) maksimum pada turbin yang diintegrasikan dengan bangunan adalah 0.7390 pada $l = 0.75D$ dan $TSR = 1.2$. Dengan kata lain, 234.4% lebih besar dibandingkan turbin Savonius pada *uniform flows*. Kesimpulan selanjutnya adalah multi-turbin menghasilkan daya yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin tunggal. Dijelaskan bahwa C_p maksimum untuk multi-turbin adalah 0.4319 dan 29.2% lebih rendah dibandingkan dengan turbin tunggal pada $l = 1.00 D$ dan $\phi = 45$. Namun lebih tinggi dibandingkan dengan turbin pada aliran angin seragam. Kesimpulan terakhir pada penelitian ini adalah sudut angin memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap daya keluaran turbin angin Savonius. Rata-rata nilai C_p dari turbin pada sudut angin dibawah 360° adalah 0.456, di mana 92.5%



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 $G/D = 1,7$.

lebih tinggi daripada turbin yang beroperasi pada aliran seragam (*uniform*). Maka, dapat disimpulkan bahwa pemasangan sistem BIWT oleh turbin angin Savonius di sudut bangunan memiliki kinerja yang baik jika dilakukan pemasangan di gedung.

Penelitian Choi et al. melakukan eksperimen mengenai efek *ground* pada aliran di silinder elip ($AR = 2$) pada *boundary layer* yang turbulen [6]. Kemudian performanya dibandingkan dengan penggunaan silinder sirkular ($AR = 1$). Kedua silinder tersebut diletakkan di sebuah plat datar dengan jarak G . Kemudian diberikan variasi G/B sebesar 0; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1,0; dan 2,0. Didapatkan hasil bahwa *critical gap ratio* dimana *vortex* mulai muncul terjadi saat $G/B = 0,4$ untuk silinder elip sedangkan pada silinder sirkular terjadi saat $G/B = 0,3$. Didapatkan pula hasil bahwa efek *ground* pada bagian *wake* silinder membatasi *vortex* untuk mengalir terutama pada bagian *lower side*. Daerah *wake* yang terbentuk pada bagian belakang silinder elip dan intensitas turbulennya lebih kecil dari pada yang terjadi di silinder sirkular.

Penelitian terdahulu dapat dijadikan sebagai referensi pada penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan angin yang optimum sehingga mampu mendapatkan kinerja turbin angin Savonius yang maksimal. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah variasi dan posisi turbin angin Savonius pada dinding bangunan. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah nilai kecepatan angin, yaitu 4, 5, 6, 7, 8, 9 m/s dengan rasio jarak celah antara pusat turbin dan dinding gedung $G/D = 1,7$. Serta posisi turbin dipasangkan secara vertikal. Oleh karena itu, dapat dikatakan penelitian ini belum banyak eksplorasi dan dapat menjadi inspirasi untuk mengembangkan secara menyeluruh.

II. METODE PENELITIAN

Eksperimen ini dilakukan dengan dibandingkan performa antara turbin angin Savonius tanpa dinding dan dengan dinding. Gambar 1 ditunjukkan bahwa skema penelitian yang terdiri dari peletakkan alat, spesifikasi dimensi, dan parameter-parameter yang dipakai dalam penelitian.

A. Skema Eksperimen

Gambar 2 ditunjukkan skema eksperimen dengan

konfigurasi dari turbin angin Savonius. Skema eksperimen ditunjukkan bahwa sistem eksperimen yang dilakukan untuk observasi turbin angin Savonius adalah dilakukan peletakkan *voltage regulator* yang berfungsi untuk mengatur kecepatan angin dari *axial fan* (U).

Axial fan yang diletakkan di dekat *voltage regulator* dan jarak antara *axial fan* dengan turbin angin Savonius adalah 3200 mm. *Honeycomb* yang berfungsi untuk membuat aliran dari *axial fan* menjadi *uniform* diletakkan di dekat *axial fan* dengan jarak 800 mm. Dengan rasio jarak celah antara model dinding dengan turbin (G/D) sebesar 1,7. *Anemometer* yang berfungsi untuk mengukur kecepatan angin yang datang menuju turbin angin Savonius diletakkan di depan turbin angin Savonius dengan jarak $8D$. *Torquemeter* yang berfungsi untuk mengukur torsi statis diletakkan di bagian poros atas turbin angin Savonius. *Tachometer* yang berfungsi untuk mengukur putaran dari turbin angin Savonius diletakkan di dekat poros bawah turbin angin Savonius.

B. Benda Uji

Spesifikasi yang dimiliki oleh turbin angin Savonius yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- a. Material sudu turbin : Pipa PVC
- b. Material *end plate* : Aluminium clad 2024
- c. Diameter *blade* turbin (D) : 165,2 mm
- d. Tinggi turbin (H) : 294,4 mm
- e. Diameter turbin (L) : 303,4 mm
- f. Diameter poros turbin (b) : 19 mm
- g. Diameter *end plate* (D_0) : 321 mm
- h. Tebal *end plate* : 1 mm
- i. Tebal sudu turbin (t) : 4 mm

Spesifikasi yang dimiliki oleh dinding bangunanyang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- a. Panjang : 1550 mm
- b. Lebar : 450 mm
- c. Tinggi : 705 mm
- d. Tebal : 12 mm
- e. Material : Multiplex

C. Alat Ukur

1) Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah poros turbin angin Savonius. *Tachometer* yang digunakan dalam penelitian ini

adalah *tachometer* OMEGA seri HHT12 dengan kemampuan pembacaan 0,05 m sampai 7,6 m seta akurasi pembacaan $0,01\% \pm 1$ digit.

2) Anemometer

Anemometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan *flow* yang datang dari *axial fan*. *Anemometer* yang digunakan pada penelitian ini adalah *anemometer* model Omega HHH92A dengan *high resolution* 0,01 m/s.

3) Voltage regulator

Voltage regulator digunakan untuk mengatur besar keluaran tegangan yang berkaitan dengan kecepatan angin yang keluar dari *axial fan*. Kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* dapat diperbesar dengan menaikkan tegangan dan kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* dapat diperkecil dengan menurunkan tegangan. *Voltage regulator* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe TDGC 2J-3.

4) Torquemeter

Torquemeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari poros turbin angin Savonius. Torque meter yang digunakan pada penelitian adalah *Torque meter* LUTRON model TQ-8800 dengan *high resolution* 0,1 N.cm.

5) Brake Dynamometer

Brake dynamometer digunakan untuk mengukur torsi dinamis dengan timbangan beban sebagai *spring balance*. Skema dan *free body diagram* dari *brake dynamometer* dapat dilihat pada 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 m/s. Sehingga, bilangan Reynolds yang didapatkan sebesar $7,68 \times 10^4$, $9,57 \times 10^4$, $11,15 \times 10^4$, $13,34 \times 10^4$, $15,37 \times 10^4$ dan $17,25 \times 10^4$. Bilangan Reynolds dikalkulasikan berdasarkan panjang karakteristik dan kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* (U) seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

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

Dimana ρ adalah massa jenis udara bernilai $1,17 \text{ Kg/m}^3$, U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* bernilai 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s, L adalah panjang karakteristik dari turbin ($L=2D-b-2t$) (m), D adalah diameter *blade* turbin (m), b adalah diameter poros turbin (m), t adalah tebal sudu turbin (m), dan μ adalah viskositas udara dengan nilai $1,8 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$.

Tip speed ratio (λ) dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

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

Dimana R adalah jari-jari turbin sebesar 0,1517 m, U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* sebesar 4-9 m/s, dan ω adalah kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s) yang dikalkulasikan dengan persamaan berikut:

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

Torsi dinamis (τ) dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tau = \{s - m\}.g\}.r \quad (4)$$

Dimana s adalah pembacaan neraca pegas (Kg), m adalah massa yang ditanggung oleh poros turbin (Kg), g adalah percepatan gravitasi bumi dengan nilai $9,81 \text{ m/s}^2$, dan r adalah jari-jari poros turbin yang menerima beban sebesar 0,0125 m. *Coefficient of moment* (C_M) dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_M = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R} \quad (5)$$

Dimana τ adalah torsi dinamis (N.m), ρ adalah massa jenis udara sebesar $1,17 \text{ Kg/m}^3$, U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* sebesar 4-9 m/s, R adalah jari-jari turbin angin Savonius sebesar 0,1517 m, dan A adalah *cross sectional area* dialiri aliran angin yang berasal dari *axial fan* yang dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = L H \quad (6)$$

Dimana L adalah panjang karakteristik turbin angin Savonius dengan nilai sebesar 0,3034 m, H adalah tinggi turbin angin Savonius dengan nilai sebesar 0,2944 m.

Coefficient of power (C_P) dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_P = \frac{\{(s-m)g\}.r.\pi.\omega}{15.\rho.A.U^3} \quad (7)$$

Dimana s adalah pembacaan neraca pegas (Kg), m adalah massa beban yang ditanggung poros turbin (Kg), g adalah percepatan gravitasi bumi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$, r adalah jari-jari poros turbin yang menerima beban sebesar 0,0125 m, ω adalah kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s), ρ adalah massa jenis udara sebesar $1,17 \text{ Kg/m}^3$, A adalah luas *cross sectional* sebesar $0,092 \text{ m}^2$, dan U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* sebesar 4-9 m/s.

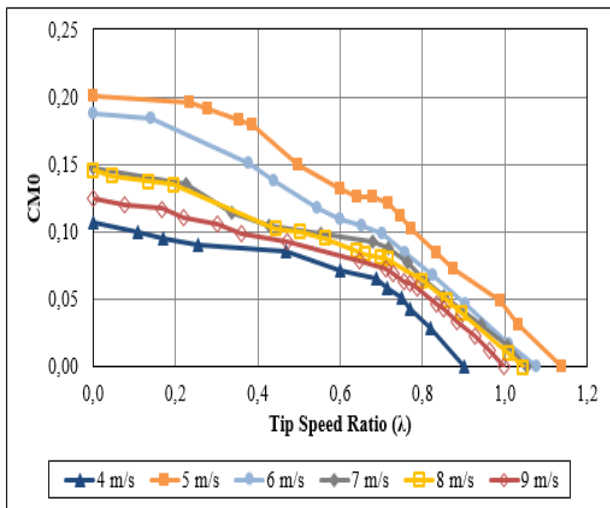
Data penelitian yang didapatkan akan digunakan untuk mendapatkan grafik *coefficient of moment* (C_M) terhadap *tip speed ratio* (λ), grafik *coefficient of moment* (C_M) terhadap *tip speed ratio* (λ), dan grafik torsi statis (T_s) terhadap sudut angular turbin angin Savonius (θ).

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Coefficient of Power (C_P)

Nilai *Coefficient of Power* (C_P) yang didapatkan dari eksperimen yang dianalisis dan ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5. Gambar 4 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (C_{P0}) 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 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (C_P) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,7$ untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.

Nilai *Coefficient of Power* (C_P) didapatkan dari perbandingan daya yang dihasilkan turbin dengan daya teoritis oleh aliran angin. 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*.



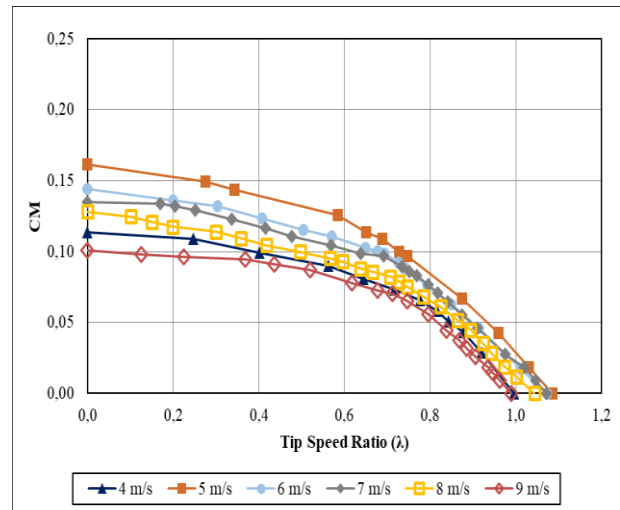
Gambar 6. Grafik C_{M0} terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ turbin angin Savonius tanpa dinding.

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 C_p 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 C_p juga akan menurun.

Dari grafik pada Gambar 4, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa dinding (C_{P0max}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,0866 dengan $\lambda = 0,717$. Pada kecepatan angin 4 m/s, nilai C_{P0max} meningkat hingga kecepatan 5 m/s, kemudian menurun hingga kecepatan 9 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan C_p tidak berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angin. Apabila kecepatan angin terlalu rendah, maka penyerapan energi oleh turbin angin Savonius menjadi kurang efektif dalam meningkatkan daya. 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, kerugian mekanis dapat terjadi pada kecepatan putar turbin yang tinggi sehingga daya turbin yang dihasilkan juga akan semakin rendah.

Dari grafik pada Gambar 5, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin dengan dinding (C_{Pmax}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,0747 dengan $\lambda = 0,687$. Namun, bila dibandingkan dengan C_{P0max} nilai ini 13,7% lebih rendah dari pada nilai C_{P0max} turbin tanpa dinding. Sedangkan, peningkatan C_p yang paling maksimum terjadi pada kecepatan 4 m/s dengan peningkatan sebesar 16%. Dimana, nilai C_p pada kecepatan 4 m/s sebesar 0,0524 dengan nilai $\lambda = 0,717$

Hal ini disebabkan pada kecepatan angin 4 m/s, aliran



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

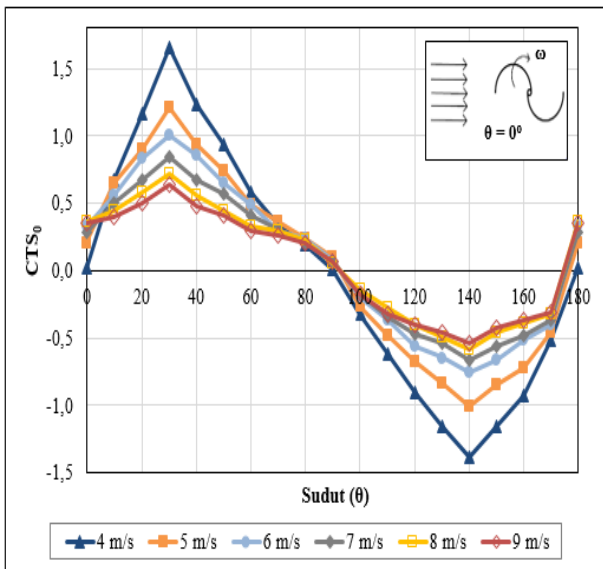
angin yang terdefleksi oleh dinding cenderung mengenai *advancing blade* turbin, sehingga kerja turbin dipengaruhi oleh daerah *high velocity* yang menyebabkan kecepatan angin yang mengenai turbin meningkat, sehingga daya dan nilai C_p yang dihasilkan turbin juga mengalami peningkatan. Nilai C_{Pmax} terus mengalami penurunan nilai C_p mulai kecepatan angin 5 m/s hingga mencapai nilai terendahnya pada kecepatan angin 9 m/s, yang mana nilai C_{pmax} lebih rendah dari pada nilai C_{P0max} turbin tanpa dinding. Namun, pada kecepatan 7 dan 8 m/s mengalami peningkatan nilai C_p terhadap C_p , yaitu berturut-turut sebesar 5,6% dan 1,75%. Dimana, peningkatan ini masih belum signifikan. 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_p yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan.

B. Analisa Coefficient of Moment (C_M)

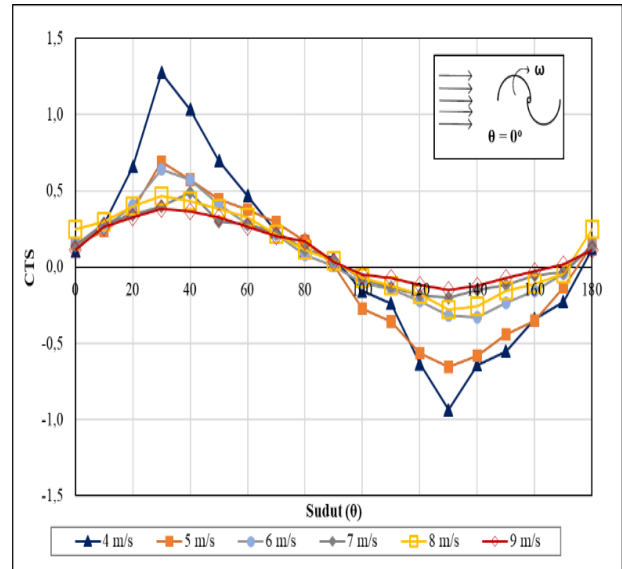
Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) yang didapatkan dari eksperimen, dianalisis dan ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* (C_{M0}) terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ (λ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Sedangkan, Gambar 7 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap $Tip\ Speed\ Ratio$ (λ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,7$ untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.

Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) dihasilkan dari perbandingan torsi dinamis dan torsi teoritis. Dimana, torsi teoritis dihasilkan dari kecepatan angin. Sedangkan, nilai torsi dinamis didapatkan melalui pengukuran dengan menggunakan system *brakedynamometer*.

Dari grafik pada Gambar 6, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin dengan dinding (C_{Mmax}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,2013. Terlihat pula, terjadi peningkatan nilai C_{M0} dari kecepatan 4 m/s hingga 5 m/s, kemudian menurun hingga kecepatan 9 m/s. Hal ini serupa dengan hasil pada grafik C_{P0} , dimana, hal ini menunjukkan bahwa peningkatan C_M tidak berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angin.



Gambar 8. Grafik CTs terhadap sudut sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,7$.



Gambar 9. Grafik CTs terhadap sudut sudu (θ) turbin angin Savonius dengan penempatan dinding pada jarak $G/D = 1,7$.

Apabila kecepatan angin terlalu rendah, maka penyerapan energi oleh turbin angin Savonius menjadi kurang efektif dalam meningkatkan daya dan nilai C_{M0} . 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, kerugian mekanis dapat terjadi pada kecepatan putar turbin yang tinggi sehingga nilai C_{M0} turbin yang dihasilkan juga akan semakin rendah.

Dari grafik pada Gambar 7, dapat diamati bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin dengan dinding (C_{Pmax}) dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 0,1615. Namun, bila dibandingkan dengan C_{M0max} nilai ini 19,7% lebih rendah. Sedangkan, peningkatan C_M yang paling maksimum terjadi pada kecepatan 4 m/s dengan peningkatan sebesar 6,07% dengan nilai C_M maksimum sebesar 0,1135.

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 C_M yang dihasilkan turbin juga mengalami peningkatan. Nilai C_{Mmax} terus mengalami penurunan nilai C_M mulai kecepatan angin 5 m/s hingga mencapai nilai terendahnya pada kecepatan angin 9 m/s. 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 nilai C_M yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan.

C. Analisa Coefficient of Static Torque (CT_s)

Hasil eksperimen yang telah dilakukan menghasilkan data koefisien torsi statis saat turbin angin Savonius tanpa diberikan dinding (CT_{s0}) yang ditunjukkan pada Gambar 8 dan turbin angin Savonius dengan pemasangan dinding dekat *advancing blade* pada $G/D = 1,7$ (CT_s) yang ditunjukkan pada Gambar 9. Torsi statis didapatkan dengan digunakan alat ukur *torquemeter*. Data torsi statis dihasilkan data yang berbeda di setiap sudut (θ).

Metode pengambilan data dimulai dengan dilakukan pada saat turbin dalam kondisi diam yaitu dengan dicekam pada bagian poros atas turbin, kemudian dialiri udara pada variasi kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* (U) sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 (m/s). Torsi statis yang diukur pada penelitian ini yaitu torsi pada saat *blade* dari turbin ini berada mulai pada posisi angular sudut 0° searah dengan aliran udara sampai dengan posisi angular sudut 180° dengan kenaikan 10° .

Dari grafik yang terlihat pada Gambar 8 menunjukkan *trendline* berbentuk sinusoidal. Titik torsi statis maksimum terjadi pada sudut sudu turbin angin (θ) sebesar 30° dan titik torsi dinamis minimum terjadi pada saat sudut sudu turbin angin (θ) sebesar 140° di setiap variasi kecepatan.

Didapatkan hasil bahwa nilai kecepatan angin 4 m/s memiliki nilai *coefficient of static torque* maksimum sebesar 1,654 dan nilai *coefficient of static torque* minimum sebesar -1,380. Pada kecepatan angin 5 m/s memiliki nilai *coefficient of static torque* maksimum sebesar 1,209 dan nilai *coefficient of static torque* minimum sebesar -1,01. Pada kecepatan angin 6 m/s memiliki nilai *coefficient of static torque* maksimum sebesar 1,003 dan nilai *coefficient of static torque* minimum sebesar -0,75. Pada kecepatan angin 7 m/s memiliki nilai *coefficient of static torque* maksimum sebesar 0,842 dan nilai *coefficient of static torque* minimum sebesar -0,75. Pada kecepatan angin 8 m/s memiliki nilai *coefficient of static torque* maksimum sebesar 0,717 dan nilai *coefficient of static torque* minimum sebesar -0,49. Pada kecepatan angin 9 m/s memiliki nilai *coefficient of static torque* maksimum sebesar 0,636 dan nilai *coefficient of static torque* minimum sebesar -0,46.

Pada grafik di Gambar 8 menunjukkan adanya peningkatan nilai CT_{s0} pada θ sebesar $0^\circ - 30^\circ$ dan $140^\circ - 180^\circ$. Hal ini terjadi karena adanya peningkatan nilai dari torsi statis akibat gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat akibat lebih dekat dengan arah datangnya angin dan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang akibat menjauhi arah datang angin. Sehingga selisih kedua gaya *drag* tersebut meningkat yang kemudian nilai torsi statis juga akan meningkat. Sedangkan penurunan nilai dari torsi statis pada sudut sebesar $40^\circ - 130^\circ$

mengindikasikan bahwa sisi dari posisi *advancing blade* semakin tidak terkena dengan arah datangnya angin. Sehingga akan menurunkan nilai gaya *drag* di *advancing blade*. Di sisi lain, arah datang angin lebih mengenai sisi *returning blade* sehingga memiliki nilai gaya *drag* yang meningkat. Nilai torsi statis yang bernilai negatif pada sudut susu 100° hingga 170° menunjukkan bahwa turbin memiliki kemampuan yang taidak baik dalam melakukan *self starting*.

Dapat disimpulkan dari Gambar 8 bahwa semakin besar nilai kecepatan, maka semakin meningkatnya nilai torsi minimum yang menuju nilai torsi statis sebesar 0. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai torsi minimum yang mengalami peningkatan akan memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik. Sehingga, kecepatan 4 m/s memiliki kemampuan *self starting* yang paling buruk.

Trendline yang dapat dilihat pada Gambar 9 menunjukkan *trendline* berbentuk sinusoidal. Koefisien Torsi statis turbin angin Savonius pada pemasangan dinding (CT_s) pada kecepatan angin (U) 4 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 1,27 pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,93 pada sudut 130° . Pada kecepatan angin (U) 5 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 0,68 pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,65 pada sudut 130° . Pada kecepatan angin (U) 6 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 0,63 pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,33 cm pada sudut 140° . Pada kecepatan angin (U) 7 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 0,62 pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,269 pada sudut 130° . Pada kecepatan angin (U) 8 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 0,46 pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,278 pada sudut 130° . Pada kecepatan angin (U) 9 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 0,38 pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,14 pada sudut 130° .

Nilai CT_s yang bernilai negatif dihindari karena dapat menghambat arah putar turbin angin Savonius. Sehingga tidak memiliki kemampuan untuk *self starting*. Pada hasil dari grafik pada Gambar 9, dapat dilihat bahwa nilai CT_s minimum yang bernilai negatif paling besar terjadi pada kecepatan 4 m/s. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan ini memiliki kemampuan *self starting* yang paling buruk.

Namun, apabila dibandingkan dengan CT_{s0} pada semua kecepatan, nilai torsi negative CT_s dengan pemberian dinding $G/D = 1,7$ masih lebih rendah atau dengan kata lain menuju nilai 0. Dimana, artinya kemampuan *self starting* turbin angin Savonius dengan pemberian dinding masih lebih baik dibandingkan tanpa pemasangan dinding pada kecepatan 4 hingga 9 m/s.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada hasil penelitian mengenai pengaruh penempatan model dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,697$ 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 $G/D = 1,697$ efektif dalam meningkatkan peforma turbin pada kecepatan angin 4, 7, dan 8 m/s, dengan nilai *Coefficient of Power* maksimum (C_{Pmax}) berturut – turut sebesar 0,0524; 0,0668; dan 0,0582. Nilai tersebut memberikan peningkatan berturut – turut sebesar 16%; 5,6%; dan 1,75% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum pada turbin tanpa dinding (C_{P0max}). Sehingga, kecepatan yang paling optimum pada pemasangan dinding di dekat *advancing blade* dengan $G/D = 1,7$ adalah pada kecepatan 4 m/s dan rentang operasi TSR sebesar 0,687 – 1,00. (2) Penempatan model dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,697$ efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* turbin pada kecepatan optimum angin 4 m/s, dengan nilai *Coefficient of Moment* maksimum (C_{Mmax}) sebesar 0,1135. Nilai tersebut memberikan peningkatan sebesar 6,07% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada turbin tanpa dinding (C_{M0max}). (3) Penempatan model dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,697$ efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9, m/s yang ditunjukkan oleh peningkatan Koefisien Torsi Statis minimum (CT_{smin}) mendekati nilai 0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Arinaldo and J. C. Adiatma, "Dinamika batu bara Indonesia: menuju transisi energi yang adil," *J. Inst. Essent. Serv. Reform*, 2019.
- [2] K. L. H. dan Kehutanan, "Inventarisasi Gas Rumah Kaca dan Monitoring, Pelaporan Verifikasi Tahun 2018." Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim, Jakarta, 2018.
- [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.-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.