

Studi Eksperimental Peletakan Sudu *Returning* Dekat Bangunan pada Jarak G/D 1,6970 terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius

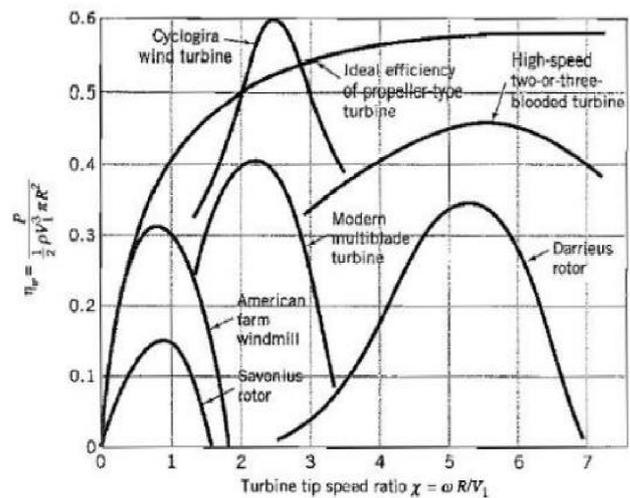
Rachmat Dhany Garijani dan Tri Yogi Yuwono
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Sebagai negara kepulauan Indonesia tergolong masih sangat bergantung dengan bahan bakar fosil sebagai sumber utama penghasil tenaga listrik yang dibuktikan dengan kecenderungan peningkatan konsumsi tenaga listrik yakni sebesar 282.031,11 GWH pada tahun 2018 dan 289.340,82 GWH pada tahun 2019. Ketersediannya yang terbatas dan tidak dapat diperbarui serta dampak negatif terhadap lingkungan menjadikan penggunaan energi baru terbarukan menjadi opsi yang harus ditempuh. Salah satu energi terbarukan tersebut adalah energi angin. Upaya pemanfaatan energi angin sebagai sumber tenaga listrik umumnya dilakukan dengan menggunakan turbin angin yang salah satunya adalah turbin angin Savonius yang dapat diintegrasikan dengan bangunan. Akan tetapi pemasangan turbin angin Savonius ini perlu mempertimbangkan beberapa hal guna mendapatkan performa paling optimal dari turbin angin ini. Guna mengetahui performa paling optimal dari turbin angin Savonius maka diperlukannya penelitian terhadap turbin angin Savonius yang diintegrasikan dengan bangunan dengan memposisikan *returning blade* turbin Savonius berada di dekat dinding gedung. Studi eksperimen dilakukan dengan menggunakan turbin angin Savonius berdiameter (D) = 165,2 mm dengan memvariasikan kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s pada jarak celah antara model dinding dengan turbin sebesar (G/D) 1,6970. Pengukuran dilakukan dengan menghitung torsi dinamis, torsi statis, nilai coefficient of power (C_P), dan nilai coefficient of moment (C_M). Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah turbin angin Savonius dengan menggunakan dinding dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius pada seluruh kecepatan uji dengan nilai peningkatan coefficient of power tertinggi pada kecepatan 6 m/s sebesar 0,0278 pada rentang TSR 0,0476-0,0826. Peningkatan coefficient of moment paling optimum pada kecepatan angin 7 m/s dengan nilai sebesar 0,1302. Penggunaan model dinding juga meningkatkan kemampuan self starting pada semua kecepatan uji di mana nilai coefficient of static torque minimum mendekati nilai 0.

Kata Kunci—Turbin Angin Savonius, Dinding Gedung, Kecepatan Angin, Coefficient of Power, Coefficient of Moment.

I. PENDAHULUAN

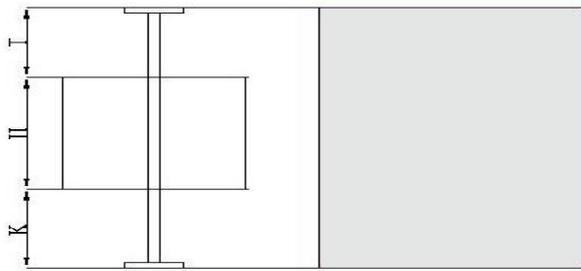
SUMBER energi listrik pada tahun 2019 mayoritas dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yakni sebesar 118.969,86 GWH, disusul dengan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) sebesar 9.877,06 GWH [1]. Sebagai negara kepulauan dengan sumber daya angin dan panas bumi yang besar, Indonesia tergolong masih sangat bergantung dengan bahan bakar fosil sebagai sumber utama penghasil tenaga listrik. Ketersediaan yang terbatas dan tidak dapat diperbarui serta dampak negatif terhadap lingkungan yang membayangi energi fosil menjadikan penggunaan energi baru terbarukan menjadi opsi yang mulai harus ditempuh oleh masyarakat dunia. Berdasarkan hal tersebut maka perlu



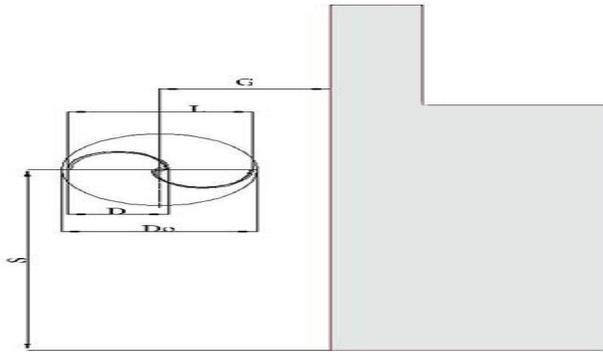
Gambar 1. Karakteristik turbin angin.

dilakukan peralihan menuju salah satu energi alternatif terbarukan yaitu energi angin yang dapat digunakan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil karena energi angin merupakan salah satu jenis energi ramah lingkungan, dan tersedia dalam jumlah besar. Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin angin vertikal yang mengubah energi horizontal angin menjadi energi kinetik rotasi. Turbin angin yang ditemukan oleh Sigurd J yang merupakan turbin dengan sumbu vertikal sederhana berbentuk setengah silinder yang menempel pada sisi berlawanan dari poros vertikal (pada susunan dua bilah) dan beroperasi dengan menggunakan gaya *drag*. Namun salah satu kelemahan yang dimiliki oleh turbin Savonius adalah tingkat efisiensi yang rendah dibandingkan jenis turbin lainnya. Seperti yang terlihat pada Gambar 1 turbin yang memiliki efisiensi tertinggi adalah turbin angin Cyclogira sedangkan turbin Savonius menjadi yang terendah.

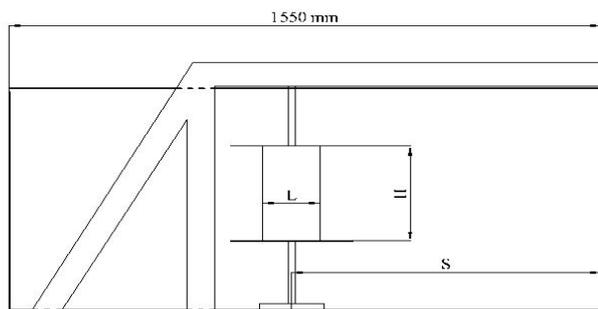
Turbin angin yang diintegrasikan terhadap bangunan menjadi teknologi yang cukup baru dalam pemanfaatan energi angin pada kota dengan karakteristik bangunan tinggi. Pada daerah perkotaan, turbin angin yang diintegrasikan dengan bangunan tinggi dengan desain atap tertentu yang mampu memperbesar kecepatan angin. Meski instalasi turbin angin terhadap bangunan dapat dilakukan sebagai alternatif sumber penghasil energi, namun masalah efisiensi serta suara bising dari putaran turbin masih menjadi masalah yang harus diperhatikan dan ditingkatkan kinerjanya [2]. Penempatan turbin angin di lokasi yang tidak tepat dapat menyebabkan output dari daya turbin tersebut berkurang hingga nol bahkan pada kondisi angin yang sedang bertiup kencang sekalipun [3].



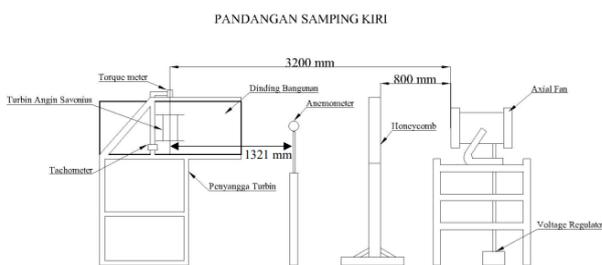
Gambar 2. Skema topik penelitian tampak depan.



Gambar 3. Skema topik penelitian tampak atas.

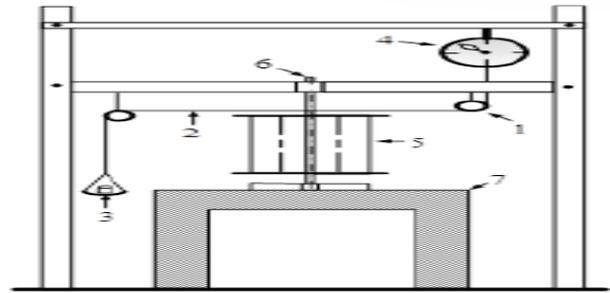


Gambar 4. Skema topik penelitian tampak samping.

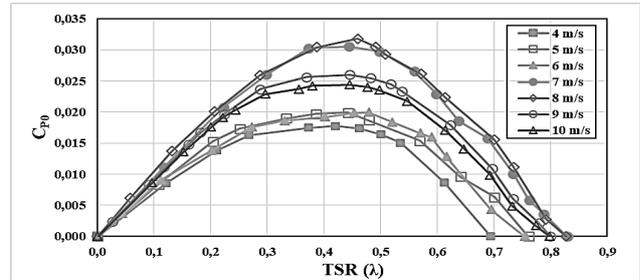


Gambar 5. Skema instalasi peralatan.

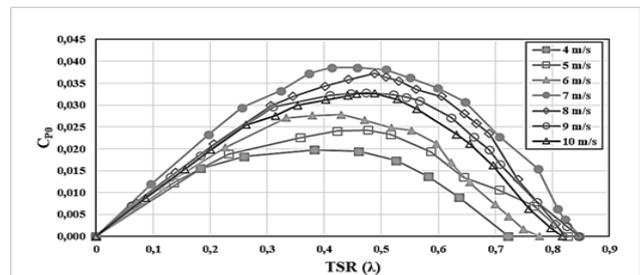
Berdasarkan beberapa penelitian tersebut maka turbin angin Savonius yang bekerja dalam kecepatan angin rendah serta memiliki efisiensi yang rendah dalam peningkatan kinerjanya dapat dilakukan dengan mengintegrasikan turbin terhadap gedung. Pengintegrasian turbin angin Savonius terhadap gedung dapat dilakukan mengingat turbin angin Savonius memiliki kecepatan awal yang rendah serta biaya perawatan yang rendah [2]. Sebagai alternatif cara untuk memperoleh tenaga listrik melalui sumber daya yang lebih ramah lingkungan, penggunaan turbin Savonius sebagai penghasil daya dapat dipertimbangkan merujuk kepada beberapa kelebihan turbin angin Savonius yakni konstruksinya yang lebih sederhana dan biaya instalasi yang



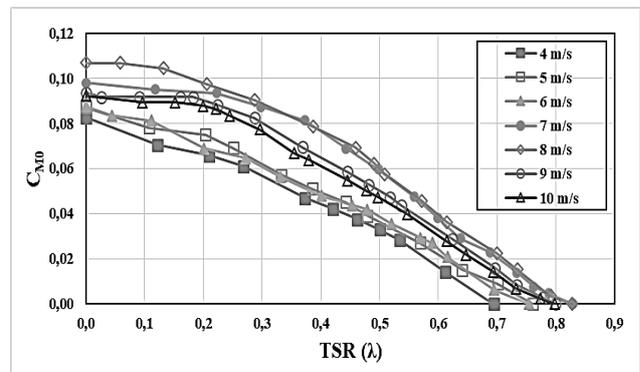
Gambar 6. Skema *brake dynamometer*.



Gambar 7. Grafik C_{p0} sebagai fungsi dari tip speed ratio (λ) tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan.



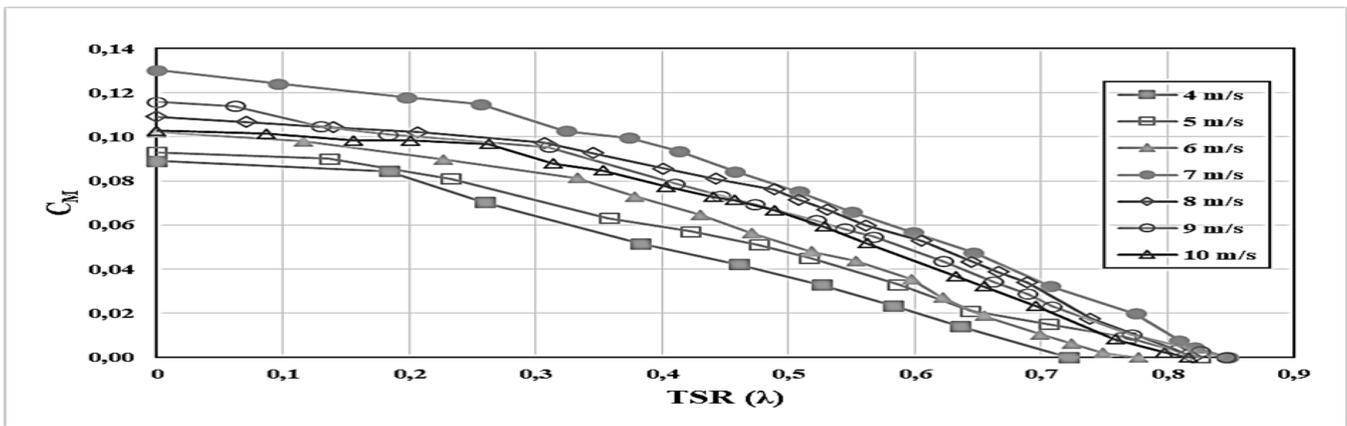
Gambar 8. Grafik C_p sebagai fungsi dari tip speed ratio (λ) dengan dinding $g/d = 1,6970$ pada setiap variasi kecepatan.



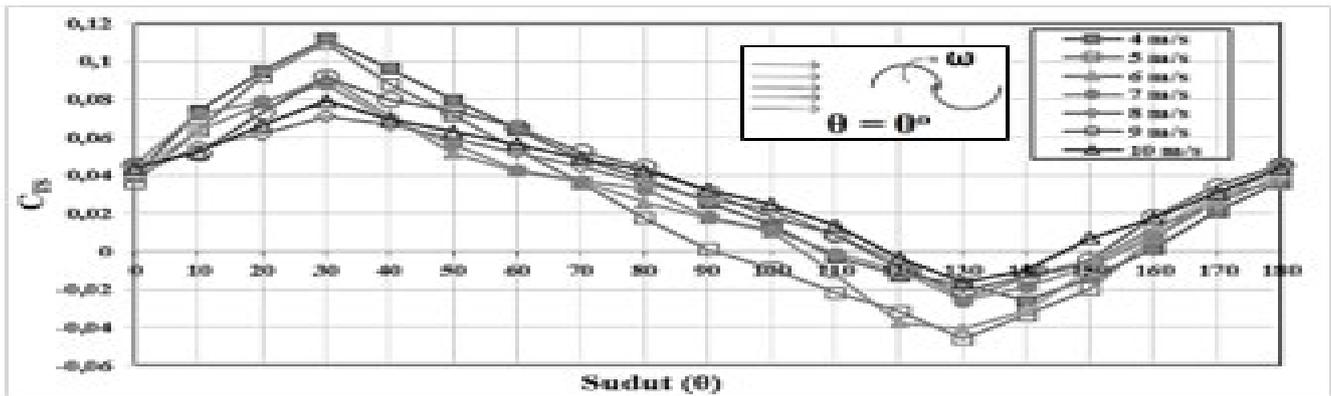
Gambar 9. Grafik C_{M0} sebagai fungsi dari tip speed ratio (λ) tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan.

lebih rendah. Selain kedua hal tersebut, keunggulan lain yang dimiliki oleh turbin Savonius adalah kinerja turbinnya tidak bergantung kepada arah angin serta torsi awal bisa didapatkan pada kecepatan angin yang rendah [4].

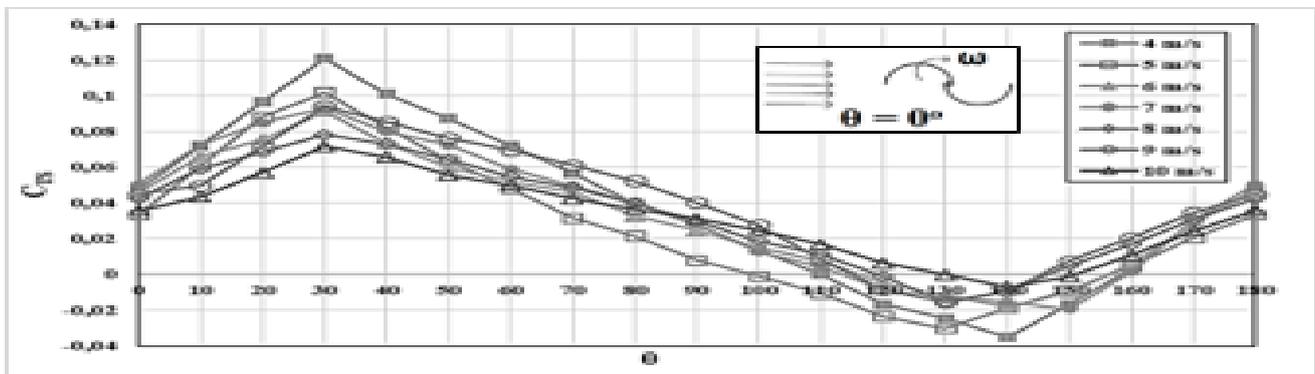
Rujukan serupa menggunakan simulasi CFD dengan memasang turbin Savonius di bagian sudut (edge) bangunan, dengan judul Aerodynamic Performance Analysis of a Building-Integrated Savonius Turbine [3]. Hasil dari penelitian ini adalah turbin Savonius yang dipasang di tepi memiliki koefisien daya yang lebih tinggi daripada yang beroperasi dalam aliran seragam. C_p rata-rata turbin di bawah sudut angin 360 derajat adalah 92.5% lebih tinggi dari turbin yang beroperasi dalam aliran seragam. Ditemukan juga bahwa aliran di sekitar gedung memiliki dampak yang besar



Gambar 10. Grafik C_{M0} sebagai fungsi dari tip speed ratio (λ) dengan dinding $g/d = 1,6970$ pada setiap variasi kecepatan.



Gambar 11. Grafik C_{TS0} sebagai fungsi dari sudut (θ) tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan.



Gambar 12. Grafik C_{TS} sebagai fungsi dari sudut (θ) dengan dinding $g/d = 1,6970$ pada setiap variasi kecepatan.

pada kinerja turbin, terutama ketika turbin terletak di bawah arah angin gedung.

Rujukan serupa menggunakan penelitian deskriptif, dengan judul Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings [5]. Hasil dari penelitian ini adalah Jenis turbin yang digunakan untuk setiap metode BAWT adalah sebagai berikut, untuk BAWT dekat bangunan (roof top atau sides of building) digunakan jenis VAWT, untuk penggunaan diantara 2 bangunan dipakai jenis HAWT, sementara untuk penggunaan di dalam bangunan lebih tepat digunakan turbin dengan ukuran kecil.

Penelitian tentang turbin Savonius dengan menggunakan parameter jumlah stage, blade, overlap ratio, dan penambahan end plate [6]. Penelitian ini berjudul Aerodynamic Performance Analysis of a Building-Integrated Savonius Turbine. Dari penelitian ini menghasilkan rotor dengan 2 buah blade lebih efektif dibandingkan dengan rotor yang memiliki 3 atau 4 buah blade. Double stage rotor

memiliki performa yang lebih tinggi dibandingkan single stage rotor, selain itu rotor yang tidak memiliki overlap ratio ditemukan mempunyai kemampuan operasi yang lebih baik daripada rotor dengan overlap ratio.

Pada studi eksperimental yang dilakukan oleh rujukan sebelumnya mengenai kinerja turbin Savonius yang terintegrasi pada gedung dengan variasi kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s menemukan bahwa peletakan advancing blade di dekat dinding bangunan turbin dengan rasio ($G/D - 1,697$) efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius pada kecepatan 4 m/s, 7 m/s, dan 8 m/s [7]. Meski demikian coefficient of power dan coefficient of moment tertinggi hanya terjadi pada kecepatan angin 4 m/s sehingga kinerja paling optimum dari turbin angin Savonius hanya terjadi pada kecepatan tersebut. Hal tersebut terjadi karena pada kecepatan angin 4 m/s aliran udara terdefleksi menuju advancing blade sehingga turbin bergerak pada daerah high velocity.

Berdasarkan uraian penelitian terdahulu dapat disimpulkan bahwa masih dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan dengan menggunakan turbin angin Savonius yang diletakkan di bagian luar gedung dengan memposisikan returning blade turbin Savonius di dekat gedung. Turbin angin Savonius diletakkan dengan rasio jarak gedung ke pusat turbin dengan diameter turbin (G/D) sebesar 1,6970 dan dengan variasi kecepatan angin yaitu 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s.

II. METODE PENELITIAN

Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan angin (U), massa jenis udara (ρ), viskositas udara (μ), diameter sudu turbin (D), diameter *end plate* (D_o) 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 plat dasar penyangga turbin (K), dan kecepatan sudut turbin (ω). Skema instalasi peralatan dan parameter yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2, Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5. Pengukuran dilakukan dalam kondisi: $G/D = 1,6970$, $S/D = 4,91$, $T/D = 1,16$, $H/L = 1$, $K/D = 1,31$, Variasi kecepatan angin (U) = 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s.

Dimana:

U : kecepatan angin (m/s)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

μ : viskositas udara (N.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)

A. Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: diameter sudu (D) (mm): 165,2 mm, tinggi turbin (H): 303,4 mm, diameter turbin (L): 303,4 mm, diameter poros turbin (b): 19 mm, diameter *end plate* (D_o): 321 mm, tebal *end plate* : 1 mm, tebal sudu turbin (x): 4 mm, material Sudu : Pipa PVC, material *end plate*: Aluminium clad 2024.

Spesifikasi yang dimiliki oleh model dinding bangunan yang akan digunakan dalam eksperimen ini memiliki dimensi panjang sebesar 1550 mm, lebar 450 mm, dan tinggi 705 mm dengan tebal sebesar 12 mm. Material dari dinding bangunan tersebut adalah multiply wood dan diletakkan di dekat sisi returning blade dengan rasio jarak antar pusat poros turbin terhadap dinding dengan diameter turbin angin (G/D) sebesar 1.6970.

B. Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1) Anemometer

Anemometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Pada penelitian ini digunakan

anemometer merk OMEGA dengan model HHF141A. alat ini mempunyai akurasi sebesar ± 1 digit.

2) Tachometer

Tachometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi suatu benda yang berputar. Pada penelitian ini *tachometer* digunakan untuk mengukur kecepatan poros turbin angin Savonius. *Tachometer* yang digunakan pada penelitian ini adalah model OMEGA seri HHT 12 alat ini mempunyai akurasi sebesar ± 1 digit.

3) Voltage Regulator

Voltage regulator digunakan untuk mengatur dan mengukur 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) Torque Meter

Torque meter merupakan alat untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Pada penelitian ini digunakan torque meter model LUTRON tipe TQ-8800. *Torque meter* yang digunakan pada penelitian adalah *Torque meter* LUTRON model TQ-8800 dengan *high resolution* 0,1 N.cm.

5) Brake Dynamometer

Gambar 6 menunjukkan skema *brake dynamometer* yang merupakan alat dengan fungsi untuk mengukur nilai torsi dinamis turbin. Nilai torsi dinamis didapatkan dengan menghitung selisih beban pemberat dengan nilai yang terbaca pada neraca pegas.

Keterangan pada Gambar 6:

1 = Katrol

2 = Benang nilon

3 = Pemberat

4 = Neraca pegas

5 = Turbin angin Savonius

6 = Poros turbin angin Savonius

7 = Penyangga turbin angin Savonius

C. Data Reduction

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan turbin angin Savonius yang diletakkan di bagian luar gedung dan diletakkan dengan rasio jarak gedung ke pusat turbin dengan diameter turbin (G/D) sebesar 1,697 dan dengan variasi kecepatan angin yaitu 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s.

Sehingga, bilangan Reynolds yang didapatkan sebesar $7,7 \times 10^4$, $9,6 \times 10^4$, $11,5 \times 10^4$, $13,5 \times 10^4$, $15,4 \times 10^4$, $17,3 \times 10^4$ dan $19,3 \times 10^4$. Bilangan Reynolds dihitung berdasarkan panjang karakteristik dan kecepatan angin yang diukur dengan menggunakan *anemometer* pada jarak $8D$ dari poros turbin yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$Re_L = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Dimana ρ adalah massa jenis udara bernilai $1,177 \text{ kg/m}^3$, U adalah kecepatan angin sebesar 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s, L adalah panjang karakteristik dari turbin ($L=2D-b-2x$) (m), dan μ adalah viskositas udara dengan nilai $1,85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$. *Tip speed ratio* untuk putaran tanpa dinding dapat dihitung

menggunakan persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U}$$

Di mana pada data yang didapatkan dari penelitian pada kecepatan 6 m/s, maka nilai dari *tip speed ratio* adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{20,481 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1517 \text{ m}}{6 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,518$$

Coefficient of moment (C_M) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_M = \frac{2T_d}{\rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R}$$

Dimana T_D adalah torsi dinamis (N.m), ρ adalah massa jenis udara sebesar 1,17 Kg/m³, U adalah kecepatan angin sebesar 4-10 m/s, A adalah luas permukaan turbin dan R adalah jari-jari turbin angin Savonius sebesar 0,1517 m. *Coefficient of power* (C_P) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_P = \frac{\{(s - m|)g\} \times r \times \pi \times \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3}$$

Dimana m adalah massa beban yang ditanggung poros turbin (Kg), s adalah pembacaan neraca pegas (kg), g adalah percepatan gravitasi bumi sebesar 9,81 m/s², 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 1,7096 Kg/m³, A adalah luas permukaan turbin angin sebesar 0,09205 m², dan U adalah kecepatan angin sebesar 4-10 m/s.

Nilai *coefficient of static torque* (C_{TS}) pada kecepatan aliran udara tanpa dinding dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_M = \frac{2T_s}{\rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R}$$

Dimana T_s adalah torsi Statis (N.m), ρ adalah massa jenis udara sebesar 1,17 Kg/m³, U adalah kecepatan aliran udara sebesar 4-10 m/s, A adalah luas permukaan turbin angin senilai 0,09205 m² dan R adalah jari-jari turbin angin Savonius sebesar 0,1517 m.

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. Analisis Coefficient of Power (C_P)

Nilai *coefficient of power* (C_P) akan ditampilkan dalam bentuk grafik C_P fungsi *tip speed ratio* (λ). Pengukuran torsi dinamis dan kecepatan sudut turbin dilakukan untuk turbin tanpa dinding dan dengan dinding pada jarak $G/D = 1,6970$ menggunakan brake dynamometer dan tachometer. Torsi dinamis dan kecepatan sudut turbin diukur pada kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Gambar 7 dan 8 menunjukkan grafik *coefficient of power* (C_P) sebagai fungsi

tip speed ratio (λ) untuk turbin tanpa dan dengan dinding pada setiap variasi kecepatan angin dengan jarak $G/D = 1,6970$. Pada kedua grafik *coefficient of power* (C_P) memiliki bentuk parabolik. Hal tersebut diakibatkan terdapat dua variabel tidak diketahui pada persamaan C_P yaitu torsi dinamis dan kecepatan sudut turbin.

Pada Gambar 7, turbin tanpa dinding memiliki nilai *coefficient of power* (C_P) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 8 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja turbin angin Savonius maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai maksimum dari *coefficient of power* (C_P) untuk setiap kecepatan adalah 0,0177 (untuk $U=4$ m/s dan $\lambda=0,420$); 0,0199 (untuk $U=5$ m/s dan $\lambda=0,442$); 0,0200 (untuk $U=6$ m/s dan $\lambda=0,479$); 0,0305 (untuk $U=7$ m/s dan $\lambda=0,0443$); 0,0318 (untuk $U=8$ m/s dan $\lambda=0,459$); 0,0260 (untuk $U=9$ m/s dan $\lambda=0,446$); 0,0244 (untuk $U=10$ m/s dan $\lambda=0,445$). Berdasarkan Gambar 7, nilai C_P maksimum terendah hingga tertinggi pada kecepatan angin sebesar 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 9 m/s, 7 m/s, dan 8 m/s. Penurunan nilai C_P pada kecepatan angin >8 m/s diakibatkan adanya kerugian mekanis dan efek solidwall. Solid wall terjadi ketika semakin meningkatnya kecepatan aliran angin maka seakan-akan aliran udara tidak dapat menyentuh luasan sudu turbin angin Savonius dan membuat putaran turbin menjadi rendah. Maka nilai C_P yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius menjadi kurang optimal pada kecepatan yang terlalu tinggi.

Pada Gambar 8, turbin dengan dinding ($G/D=1,6970$) memiliki nilai *coefficient of power* (C_P) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 7 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja turbin angin Savonius maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai maksimum dari *coefficient of power* (C_P) untuk setiap kecepatan adalah 0,0197 (untuk $U=4$ m/s dan $\lambda=0,382$); 0,0243 (untuk $U=5$ m/s dan $\lambda=0,476$); 0,0278 (untuk $U=6$ m/s dan $\lambda=0,430$); 0,0386 (untuk $U=7$ m/s dan $\lambda=0,413$); 0,0372 (untuk $U=8$ m/s dan $\lambda=0,489$); 0,0329 (untuk $U=9$ m/s dan $\lambda=0,473$); 0,0327 (untuk $U=8$ m/s dan $\lambda=0,489$). Berdasarkan Gambar 8, nilai C_P maksimum dari yang terendah ke yang tertinggi berdasarkan kecepatan angin adalah 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 9 m/s, 8 m/s, dan 7 m/s. Terjadi peningkatan nilai *coefficient of power* (C_P) maksimum dengan dinding dibandingkan dengan tanpa dinding yang terjadi pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s di mana besar nilai peningkatan secara berturut-turut yaitu 11,27%; 22,06%; 39,12%; 26,28% ; 17,17%; 26,40%; dan 33,86%. Peningkatan nilai tersebut diduga terjadi akibat turbin terkena sebagian pengaruh dari defleksi aliran di daerah high velocity pada sudu advancing turbin angin Savonius dan mengindikasikan bahwa dengan meletakkan dinding di dekat sudu returning mengakibatkan sudu returning berada pada daerah low velocity [3].

B. Analisa Coefficient of Moment (C_M)

Nilai dari *coefficient of moment* (C_M) berupa grafik C_M fungsi *tip speed ratio* (λ). Pengukuran torsi dinamis dilakukan untuk turbin tanpa dinding dan turbin dengan dinding pada jarak $G/D=1,6970$ menggunakan brake dynamometer. Kedua nilai tersebut menghasilkan grafik C_M untuk turbin tanpa dinding dan dengan dinding. Gambar 9 menunjukkan grafik C_M turbin tanpa dinding. Sedangkan, Gambar 10 menunjukkan grafik C_M dengan dinding pada $G/D=1,6970$. Grafik C_M fungsi λ berbentuk linear dikarenakan hanya

terdapat satu variabel yang tidak diketahui pada persamaan CM. Nilai CM maksimum didapatkan saat turbin berhenti berputar akibat penambahan beban untuk setiap variasi kecepatan angin atau saat tip speed ratio (λ) sama dengan 0.

Pada Gambar 9, turbin tanpa dinding memiliki nilai coefficient of moment (CM0) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 8 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja turbin angin Savonius maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai maksimum dari coefficient of moment (CM0) untuk setiap kecepatan adalah 0,0826 (untuk $U=4$ m/s dan $\lambda=0$); 0,0871 (untuk $U=5$ m/s dan $\lambda=0$); 0,0876 (untuk $U=6$ m/s dan $\lambda=0$); 0,0980 (untuk $U=7$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1067 (untuk $U=8$ m/s dan $\lambda=0$); 0,0936 (untuk $U=9$ m/s dan $\lambda=0$); 0,0923 (untuk $U=10$ m/s dan $\lambda=0$). Berdasarkan Gambar 9, nilai CM0 maksimum terendah hingga tertinggi pada kecepatan angin sebesar 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 9 m/s, 7 m/s, dan 8 m/s. Penurunan nilai CM0 pada kecepatan angin >8 m/s diakibatkan adanya kerugian mekanis dan efek solidwall. Solid wall terjadi ketika semakin meningkatnya kecepatan aliran angin maka seakan-akan aliran udara tidak dapat menyentuh luasan sudu turbin angin Savonius dan membuat putaran turbin menjadi rendah. Maka nilai CM0 yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius menjadi kurang optimal pada kecepatan yang terlalu tinggi.

Pada Gambar 10, turbin tanpa dinding memiliki nilai coefficient of moment (CM) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 7 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja turbin angin Savonius maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai maksimum dari coefficient of moment (CM) untuk setiap kecepatan adalah 0,0891 (untuk $U=4$ m/s dan $\lambda=0$); 0,0931 (untuk $U=5$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1022 (untuk $U=6$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1302 (untuk $U=7$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1091 (untuk $U=8$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1158 (untuk $U=9$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1028 (untuk $U=10$ m/s dan $\lambda=0$). Berdasarkan Gambar 10, nilai CM0 maksimum terendah hingga tertinggi pada kecepatan angin sebesar 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 8 m/s, 9 m/s, dan 7 m/s. Terjadi peningkatan nilai coefficient of moment (CM) maksimum dengan dinding dibandingkan dengan tanpa dinding yang terjadi pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s di mana besar nilai peningkatan secara berturut-turut yaitu 7,86%; 6,88%; 16,66%; 32,85%; 2,24%; 23,71%; dan 11,37%. Peningkatan nilai tersebut diduga terjadi akibat turbin terkena sebagian pengaruh dari defleksi aliran di daerah high velocity pada sudu advancing turbin angin Savonius dan mengindikasikan bahwa dengan meletakkan dinding di dekat sudu returning mengakibatkan sudu returning berada pada daerah low velocity [3].

C. Analisis Coefficient of Static Torque (C_{TS})

Pengambilan data torsi statis dilakukan untuk turbin tanpa dinding dan turbin dengan dinding ($G/D=1,6970$) untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10. Untuk mengukur nilai selisih torsi pada sudu advancing dan sudu returning saat turbin angin Savonius tidak berputar menggunakan torque meter. Pengukuran torsi statis sebagai fungsi sudut sudu turbin ini dilakukan berdasarkan konfigurasi sudut sudu turbin (θ) yang terlihat pada Gambar 11 dan 12. Data torsi statis akan diolah menjadi grafik coefficient of static torque (CTS) fungsi sudut sudu turbin (θ). Gambar 11 menunjukkan grafik coefficient of static torque (CTS0) untuk turbin tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan angin. Sedangkan,

Gambar 12 menunjukkan coefficient of static torque (CTS) untuk turbin dengan dinding ($G/D=1,6970$) pada setiap variasi kecepatan angin.

Pada Gambar 11, nilai coefficient of static torque (CTS0) mengalami nilai positif dan negatif untuk setiap variasi kecepatan, yaitu coefficient of static torque (CTS0) positif pada rentang sudut $0^\circ-100^\circ$ dan coefficient of static torque (CTS0) negatif pada rentang sudut ($110^\circ-150^\circ$). Nilai coefficient of static torque (CTS0) positif menunjukkan bahwa turbin angin Savonius memiliki kemampuan self-starting yang baik. Semakin besar nilai coefficient of static torque (CTS0) positif maka akan semakin baik kemampuan self-starting turbin. Sedangkan, coefficient of static torque (CTS0) negatif menunjukkan turbin memiliki kemampuan self-starting yang buruk pada sudut sudu turbin (θ) tersebut. Semakin besar nilai coefficient of static torque (CTS0) negatif atau semakin mendekati nol nilai coefficient of static torque (CTS0), maka kemampuan self-starting turbin akan semakin baik. Nilai coefficient of static torque (CTS0) maksimum didapatkan pada sudut 30° untuk setiap variasi kecepatan, sedangkan nilai coefficient of static torque (CTS0) minimum didapatkan pada sudut 130° untuk setiap variasi kecepatan.

Nilai dari coefficient of static torque (CTS0) maksimum, untuk turbin tanpa dinding, pada setiap variasi kecepatan adalah 0,112 ($U=4$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,110 ($U=5$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,092 ($U=6$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,088 ($U=7$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,071 ($U=8$ m/s dan $\theta=30^\circ$), 0,092 ($U=9$ m/s dan $\theta=30^\circ$), dan 0,079 ($U=10$ m/s dan $\theta=30^\circ$). Sedangkan nilai dari coefficient of static torque (CTS0) minimum untuk turbin tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan adalah -0,026 ($U=4$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,046 ($U=5$ m/s dan $\theta=130^\circ$); -0,041 ($U=6$ m/s dan $\theta=130^\circ$); -0,026 ($U=7$ m/s dan $\theta=130^\circ$); -0,024 ($U=8$ m/s dan $\theta=130^\circ$), -0,021 ($U=9$ m/s dan $\theta=130^\circ$), dan -0,016 ($U=10$ m/s dan $\theta=130^\circ$). Nilai dari coefficient of static torque (CTS0) maksimum tertinggi ada pada kecepatan angin 4 m/s. Sedangkan, nilai dari coefficient of static torque (CTS0) minimum tertinggi ada pada kecepatan angin 10 m/s.

Pada Gambar 12, nilai dari coefficient of static torque (CTS) maksimum, untuk turbin dengan dinding ($G/D=1,6970$), pada setiap variasi kecepatan adalah 0,121 ($U=4$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,102 ($U=5$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,091 ($U=6$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,093 ($U=7$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,078 ($U=8$ m/s dan $\theta=30^\circ$), 0,094 ($U=9$ m/s dan $\theta=30^\circ$), dan 0,072 ($U=10$ m/s dan $\theta=30^\circ$). Sedangkan nilai dari coefficient of static torque (CTS) minimum, untuk turbin dengan dinding ($G/D=1,6970$), pada setiap variasi kecepatan adalah -0,035 ($U=4$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,030 ($U=5$ m/s dan $\theta=130^\circ$); -0,018 ($U=6$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,019 ($U=7$ m/s dan $\theta=150^\circ$); -0,016 ($U=8$ m/s dan $\theta=130^\circ$), -0,015 ($U=9$ m/s dan $\theta=130^\circ$), dan -0,007 ($U=10$ m/s dan $\theta=140^\circ$). Kecepatan angin untuk menghasilkan nilai coefficient of static torque (CTS) maksimum dan minimum tertinggi untuk turbin dengan dinding yaitu pada kecepatan angin 4 m/s. Dari Gambar 11 dan Gambar 12 dapat disimpulkan bahwa kemampuan turbin angin Savonius dengan meletakkan sudu returning blade di dekat dinding mempunyai kemampuan untuk melakukan self starting lebih baik dibandingkan dengan tanpa dinding.

Pada Gambar 12 terjadi pergeseran nilai sudut pada CTS minimum pada kecepatan 6, 7, dan 10 m/s. Hal ini diduga terjadi karena pada sudut turbin 130° dengan pemasangan

dinding akan terbentuk celah kecil antara returning blade dengan dinding gedung, dimana pada celah tersebut akan terjadi blockage effect yang akan menyebabkan aliran angin seolah-olah tidak melewati celah tersebut dan mengakibatkan turbin Savonius pada sudut tersebut belum mencapai nilai $C_{T\text{min}}$. Adapun ketika sudut turbin diperbesar maka akan memperbesar celah dan memberikan effect nozzle. Dimana kecepatan aliran angin akan meningkat dan akan meningkatkan gaya drag pada returning blade. Sehingga nilai dari torsi statis menurun dan membuat turbin Savonius mengalami pergeseran nilai sudut untuk menghasilkan nilai $C_{T\text{min}}$ yang terkecil.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan pada hasil penelitian mengenai pengaruh penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D=1,6970$ dengan variasi kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s terhadap performa turbin, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut: (1) Penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D= 1,6970$ efektif dalam meningkatkan performa turbin pada semua kecepatan uji, dengan nilai *coefficient of power* maksimum ($C_{P\text{max}}$) dengan peningkatan tertinggi pada kecepatan 6, 10, dan 9 m/s berturut-turut sebesar 0,0278, 0,0327, dan 0,0329. Nilai tersebut memberikan peningkatan secara berturut-turut sebesar 39,12%, 33,86%, dan 26,40%. Sehingga, kecepatan yang paling optimum pada pemasangan dinding di dekat *returning blade* dengan $G/D 1,6970$ adalah pada kecepatan 6 m/s dan rentang operasi nilai TSR sebesar 0,0476-0,826. (2) Penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin

angin Savonius pada jarak $G/D = 1,6970$ efektif dalam meningkatkan nilai *coefficient of moment* turbin pada kecepatan optimum angin 7 m/s, dengan nilai *coefficient of moment* ($C_{M\text{max}}$) sebesar 0,1302. Nilai tersebut memberikan peningkatan sebesar 32,85% dari nilai *coefficient of moment* maksimum pada turbin tanpa dinding ($C_{M0\text{max}}$). (3) Penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak $G/D = 1,6970$ efektif dalam meningkatkan kemampuan *self starting* turbin pada seluruh kecepatan uji yang ditunjukkan oleh peningkatan koefisien torsi statis minimum ($C_{T\text{min}}$) mendekati nilai 0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal and Ketenagalistrikan, *Statistik Ketenagalistrikan 2019*, 33rd ed. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2020.
- [2] S. I. Cahyono, N. S. Roziqin, and D. D. D. P. Tjahjana, "The study of the savonius wind turbine blade performance integrated on the doom roof type building," *Int. J.*, vol. 8, no. 6, 2020, doi: 10.30534/ijeter/2020/65862020.
- [3] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, "An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades," *Energy procedia*, vol. 68, pp. 297–304, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.259.
- [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, doi: 10.7763/jocet.2016.v4.254.
- [5] 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.
- [6] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2636, 2020, doi: 10.3390/en13102636.
- [7] N. H. Laksita, "Studi Eksperimental Kinerja Turbin Angin Savonius yang Terintegrasi dengan Gedung Studi Kasus untuk Sudu Advancing Dekat Dinding Gedung pada Jarak $G/D 1,697$," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2021.