

Studi Eksperimental Kinerja Turbin Angin Savonius yang Terintegrasi dengan Gedung dengan Posisi Sudu Advancing Dekat Dinding pada Jarak $G/D = 1,58$

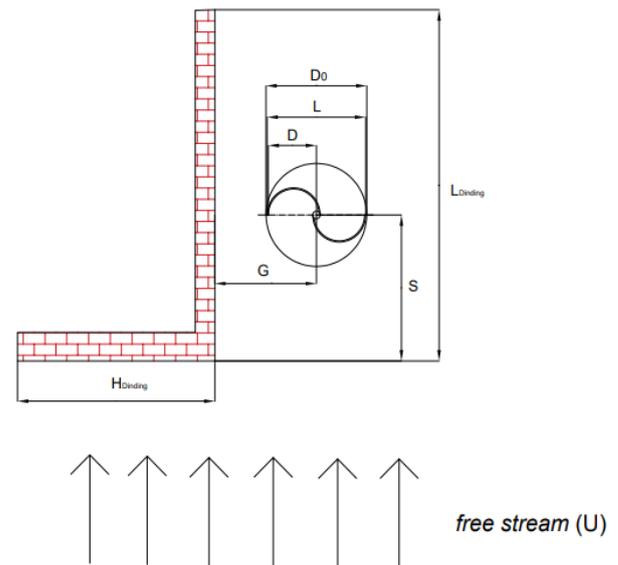
Anisah Nurul Izzah dan Tri Yogi Yuwono
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Konsumsi energi di Indonesia semakin meningkat sedangkan ketersediaan sumber energi yang tidak terbarukan semakin menipis. Indonesia memiliki potensi yang cukup besar terutama sumber energi angin untuk digunakan sebagai sumber pembangkit listrik. Turbin angin Savonius yang diletakkan di dekat bangunan mampu menjadi media untuk menghasilkan tenaga listrik. Turbin angin Savonius berputar karena adanya selisih torsi pada *advancing blade* dan *returning blade* sehingga menghasilkan energi mekanik yang berubah menjadi energi listrik. Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki 2 sudu dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 165,2 mm, diameter end plate (D_0) 320 mm, dan diameter poros turbin (b) sebesar 19 mm. Model dinding untuk mensimulasikan dinding dari gedung yang terbuat dari kayu multiplies dengan panjang 1550 mm, lebar 450 mm, dan tinggi 705 mm diletakkan di dekat *advancing blade*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan $G/D = 1,58$; $H/L = 1$; $S/D = 4,91$; $T/D = 1,16$; $K/D = 1,31$ dengan menggunakan variasi kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Hasil yang didapatkan dari eksperimen dengan memasang model dinding bangunan didekat *advancing blade* turbin angin Savonius dengan $G/D = 1,58$ adalah kecepatan optimum pada kecepatan angin 4 m/s dengan nilai Coefficient of Power sebesar 0,0596 pada $\lambda = 0,698$ dan Coefficient of Moment sebesar 0,1285 pada $\lambda = 0$. Pemberian model dinding juga meningkatkan kemampuan self starting turbin angin Savonius pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s dimana Coefficient of Static Torque yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa dinding.

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

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara dengan jumlah penduduk yang tinggi. Berdasarkan data dari hasil sensus penduduk 2020 pada september 2020 mencatat jumlah penduduk sebesar 270,20 juta jiwa. Jumlah penduduk hasil sensus penduduk 2020 bertambah sebanyak 32,56 juta jiwa dibandingkan hasil sensus penduduk 2010 [1]. Dengan jumlah penduduk yang semakin meningkat setiap tahunnya, Indonesia menjadi negara dengan konsumsi energi terbesar di Asia Tenggara dan terbesar kelima di kawasan Asia Pasifik setelah China, India, Jepang, dan Korea [2]. Total kapasitas yang terpasang mengalami peningkatan sebesar 5,18% dibandingkan dengan kapasitas yang terpasang pada akhir Desember 2018. Pada akhir Desember 2018, total kapasitas yang terpasang dan jumlah unit pembangkit PLN (Holding dan Anak Perusahaan) mencapai 43.856,58 MW dan 5.987 unit, dengan 30.368,23 MW (69,24%) berada di Jawa. Sedangkan pada tahun 2019, terjadi peningkatan dengan

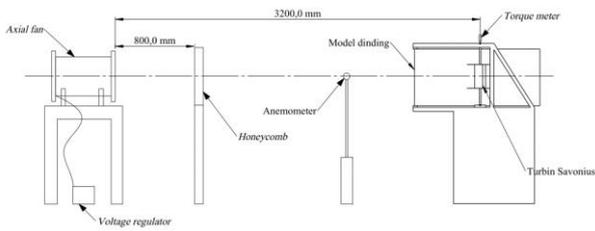


Gambar 1. Skema dan parameter penelitian.
Keterangan:

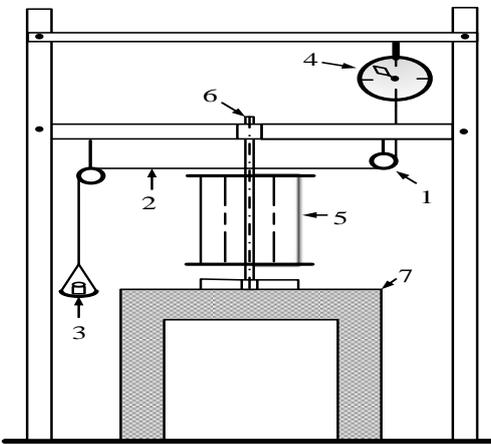
1. D : Diameter sudu turbin (m)
2. L : Diameter turbin (m)
3. D_0 : Diameter end plate (m)
4. G : Jarak dari pusat poros turbin dengan dinding (m)
5. S : Jarak dari muka depan bangunan terhadap pusat poros turbin (m)
6. $L_{Dinding}$: Panjang dinding bangunan (m)
7. $H_{Dinding}$: Lebar dinding bangunan (m)

persentase kapasitas terpasang per jenis pembangkit sebagai berikut : PLTU 20.750,50 MW (47,31%), PLTGU 10.708,76 MW (24,42%), PLTD 3.692,38 MW (8,42%), PLTMG 1.336,93 MW (3,05%), PLTA 3.583,98 MW (8,17%), PLTG 3.188,90 MW (7,27%), PLTP 597,50 (1,32%), PLT Surya dan BLT Bayu 15,62 MW (0,04%). Adapun total kapasitas terpasang nasional termasuk pembangkit sewa dan IPP adalah 62.832,70 MW [3].

Indonesia masih didominasi oleh penggunaan sumber energi yang tidak terbarukan seperti fosil, minyak bumi, dan batu bara. Namun seiring berjalannya waktu dan bertumbuhnya jumlah penduduk di Indonesia, ketersediaan sumber energi yang tidak terbarukan semakin menipis. Untuk mengatasi punahnya sumber energi yang tidak terbarukan, maka alternatif penggunaan sumber energi baru terbarukan (EBT) atau *renewable energy* digunakan. Selain mengurangi penggunaan sumber energi yang tidak terbarukan, penggunaan sumber energi baru terbarukan secara tidak langsung dapat mewujudkan energi yang bersih dan ramah lingkungan [4]. Namun, energi yang dihasilkan oleh sumber



Gambar 2. Skema penelitian.



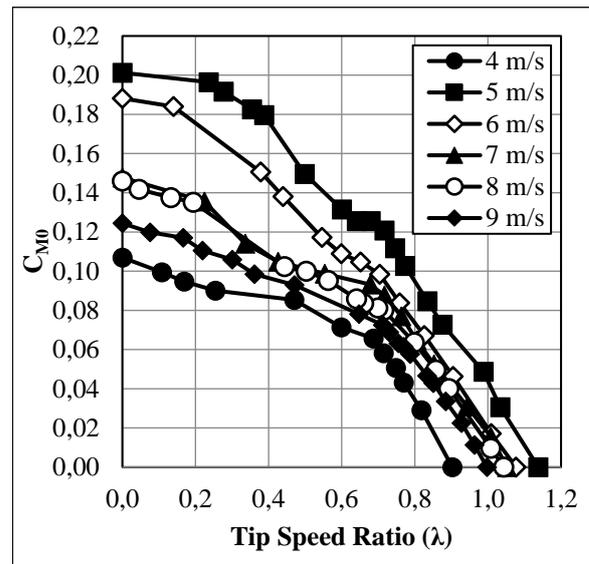
Gambar 3. Skema brake dynamometer.

Keterangan:

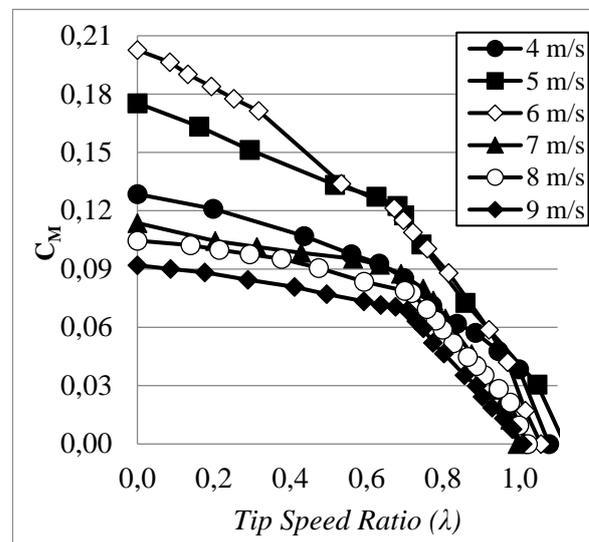
1. Katrol
2. Benang Nylon
3. Pemberat
4. Neraca Pegas
5. Turbin Angin Savonius
6. Poros
7. Penyangga Turbin

energi yang tidak terbarukan lebih tinggi daripada energi yang dihasilkan oleh sumber energi baru terbarukan. Untuk itu, seiring dengan pengoptimalan penggunaan sumber energi yang terbarukan, pemerintah Indonesia tetap menggunakan sumber energi yang tidak terbarukan. Sasaran kebijakan energi nasional terkait energi baru dan terbarukan yang ingin dicapai telah disebutkan pada Peraturan pemerintah no. 79 tahun 2014. Sasarannya yaitu peran Energi Baru dan Energi Terbarukan paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan paling sedikit 31% pada tahun 2050 sepanjang keekonomiannya terpenuhi [5].

Indonesia memiliki potensi energi baru dan terbarukan (EBT) yang cukup besar dengan berbagai berbagai jenis energi. Angin merupakan salah satu sumber energi yang dapat digunakan. Energi angin digunakan sebagai salah satu energi alternatif karena memiliki prospek yang baik. Angin selalu tersedia di alam, bersih, dan tidak pernah habis. Selain fleksibel, angin juga sering dimanfaatkan untuk bidang perikanan, bahkan bisa untuk pembangkitan energi listrik [6]. Kecepatan angin rata-rata di Indonesia antara 3-6 m/s [7]. Berdasarkan data yang telah disebutkan, dapat disimpulkan bahwa Indonesia masih kurang memaksimalkan penggunaan potensi angin yang tersedia. Potensi angin yang tersedia bisa kita manfaatkan dengan pembuatan turbin angin yang kerjanya menggunakan energi angin dan selanjutnya akan ditransmisikan ke generator dan bisa menghasilkan energi listrik. Untuk meningkatkan jumlah energi yang dapat dihasilkan, telah dilakukan banyak upaya untuk meningkatkan performa dari turbin angin agar nilai ekonomis dari turbin angin turun.

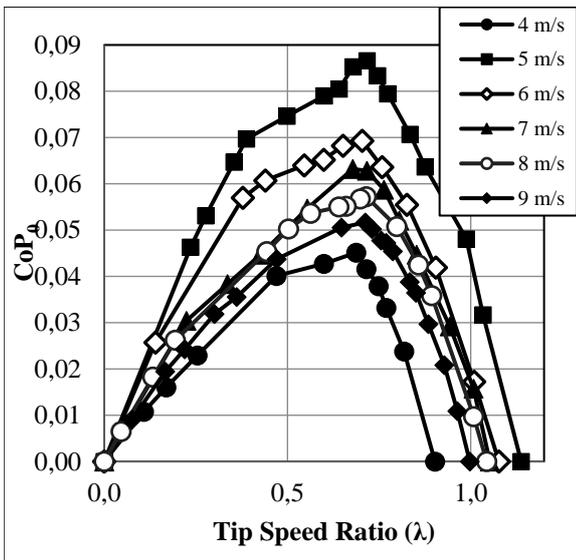


Gambar 4. Grafik coefficient of moment fungsi tip speed ratio untuk turbin tanpa dinding pada kecepatan 4-9 m/s.

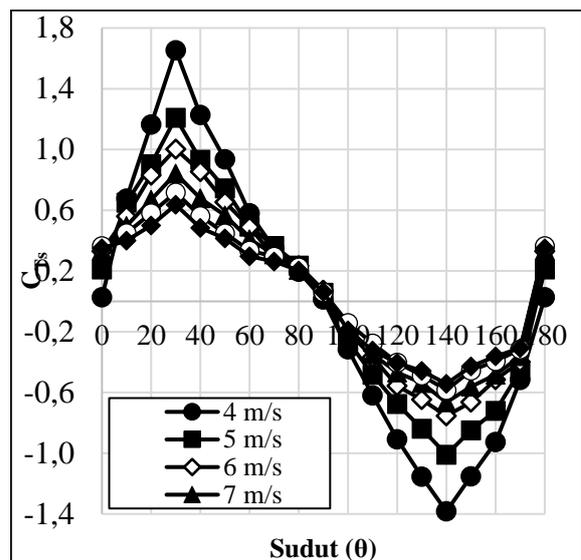


Gambar 5. Grafik coefficient of moment fungsi tip speed ratio untuk turbin dengan dinding pada kecepatan 4-9 m/s.

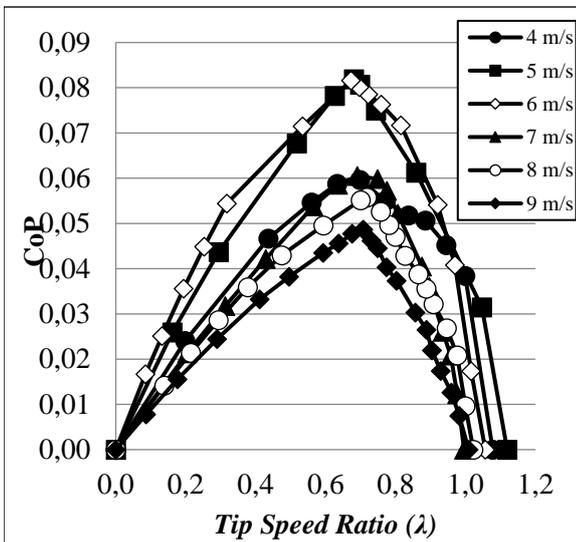
Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Mao, dkk (2020) membahas tentang kinerja turbin angin Savonius yang dipasang di tepi gedung bertingkat [8]. Penelitian ini menggunakan metode CFD transient yang digunakan untuk menyelidiki kinerja turbin dan interaksi aliran antara turbin dan gedung. Terdapat tiga parameter yang divariasikan dalam penelitian ini, yaitu *turbin gap*, *adjacent turbine*, dan sudut turbin. Kesimpulan pertama yang didapatkan dari penelitian ini, yaitu penambahan *turbine gap* akan membuat daya semakin berkurang dengan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,7390 dimana lebih tinggi 234,4% dibandingkan dengan turbin dengan *uniform flow*. Kesimpulan selanjutnya yaitu *Coefficient of Power* yang dihasilkan pada *single turbine* lebih tinggi dibandingkan dengan *multi-turbines* sehingga dapat dikatakan bahwa *single turbine* lebih efisien dibandingkan dengan *multi-turbines*. Kesimpulan terakhir, yaitu *Coefficient of Power* optimal didapatkan ketika sudut angin sebesar 292,5°. Sudut angin sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin. Turbin dengan sudut di bawah 360° memiliki *Coefficient of Power* rata-rata sebesar 0,4256 atau 92,5% lebih tinggi dibandingkan dengan



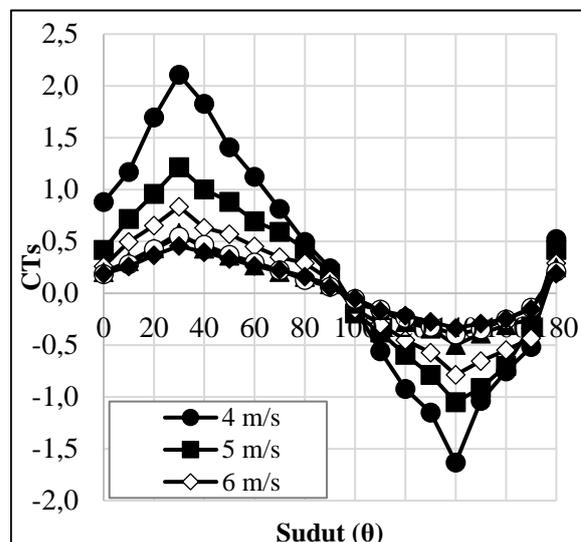
Gambar 6. Grafik *coefficient of power* fungsi *tip speed ratio* untuk turbin tanpa dinding pada kecepatan 4-9 m/s.



Gambar 8. Grafik *coefficient of static torque* fungsi sudut sudu turbin untuk turbin tanpa dinding pada kecepatan 4-9 m/s.



Gambar 7. Grafik *coefficient of moment* fungsi *tip speed ratio* untuk turbin tanpa dinding pada kecepatan 4-9 m/s.



Gambar 9. Grafik *coefficient of static torque* fungsi sudut sudu turbin untuk turbin tanpa dinding pada kecepatan 4-9 m/s.

turbin yang bekerja pada *uniform flow*. Hal itu menunjukkan bahwa turbin angin Savonius lebih baik dipasang pada gedung karena efisiensi lebih tinggi.

Fachri, dkk (2017) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mencari tahu bagaimana desain dari *guide vane* dan rotor yang baik untuk suatu sistem BIWT yang inovatif dan langsung menggunakan bagian luar bangunan [9]. Penelitian ini dilakukan dengan cara menggabungkan *guide vane* yang memiliki bentuk yang sesuai dengan kondisi yang diinginkan dan dinilai efektif dalam mengumpulkan angin yang masuk sehingga dapat meningkatkan kecepatan turbin serta rotor. Desain dari *guide vane* dan rotor yang telah diperhitungkan akan dibuat *prototype*-nya kemudian diuji menggunakan *wind tunnel*. Setelah dilakukan penelitian, *guide vane* yang dipilih adalah *guide vane* yang dirancang untuk rotor berukuran 30 cm karena memiliki kinerja terbaik saat modul dipasang didalam kubus dengan tepi 1 m. sedangkan desain akhir rotor yang yang dipilih adalah rotor tipe F dengan 8 sudu karena dinilai dapat menghasilkan kinerja yang paling tinggi dibandingkan dengan yang lain. Evaluasi kinerja dilakukan melalui percobaan dua langkah, yaitu evaluasi *guide vane* dan evaluasi rotor. Pada uji *wind tunnel* diamati

bahwa *guide vane* mampu memusatkan angin dengan efektif dan meningkatkan kecepatan rotor. Evaluasi kinerja rotor dilakukan dengan menggunakan *prototype* sehingga didapatkan rata-rata koefisien daya rotor sebesar 0,381. Sistem yang diuji diperkirakan dapat memenuhi kebutuhan listrik sebesar 6,3% dari konsumsi listrik harian.

Peneliti N.H Mahmoud, dkk (2010) juga melakukan penelitian dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius [10]. Penelitian dilakukan menggunakan beberapa variasi, yaitu variasi dari jumlah sudu yang digunakan, yaitu dua sudu, tiga sudu, dan empat sudu; variasi dari *stages* yang digunakan pada turbin, yaitu *single stage* dan *double stages*; variasi pada *overlap ratio* (β), yaitu 0; 0,2; 0,25; 0,35; variasi pada *aspect ratio* (α), yaitu 0,5; 1; 2; 4; dan 5; dan variasi pada penggunaan *end plates*. *Wind tunnel* dengan variasi kecepatan angin 0 sampai 13 m/s diletakkan berhadapan dengan turbin. Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah turbin dengan dua sudu memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan turbin dengan tiga atau empat sudu. Selain itu, turbin dengan *double stages* menghasilkan nilai *specific power* yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin *single stage*. Ketika

menggunakan *overlap ratio* 0, *power* yang dihasilkan oleh turbin lebih tinggi daripada dengan turbin yang menggunakan *overlap ratio* lebih besar. Kesimpulan yang lain adalah semakin meningkatnya *aspect ratio* maka *Coefficient of Power* juga akan meningkat. Selain itu, turbin yang menggunakan *end plates* akan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan tanpa menggunakan *end plates*.

Peneliti Marco Casini (2015) membahas tentang jenis-jenis turbin angin vertikal dan menggambarkan cara pemasangannya di gedung, serta keuntungan yang diperoleh dalam produksi energi yang didapatkan dibandingkan memakai sistem *photovoltaic* [11]. Marco Casini (2015) juga membahas kelebihan dan kelemahan VAWT daripada HAWT serta jenis dari *Building Augmented Wind Turbine* (BAWT), yaitu BAWT yang diletakkan dekat dengan bangunan, BAWT yang diletakkan di antara gedung, dan BAWT yang diletakkan pada aliran udara di dalam gedung. Jenis dari turbin angin vertikal (turbin angin Savonius dan turbin angin Darrieus) dibandingkan dengan sistem *photovoltaic* dan menghasilkan bahwa daya yang dihasilkan turbin angin vertikal lebih tinggi dibandingkan sistem *photovoltaic*. Selain itu, daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius lebih tinggi dengan turbin angin Darrieus karena pemasangan turbin angin Savonius membutuhkan jarak yang lebih rendah sehingga dalam luasan yang sama dapat dipasang lebih banyak turbin angin Savonius.

Peneliti J. H Choi & S. J Lee (2000) melakukan eksperimen untuk mengetahui interaksi antara silinder berbentuk elips dan sirkular dengan sebuah plat datar yang diletakkan saling berdekatan. Silinder elips yang digunakan dalam eksperimen memiliki *axis ratio* ($AR = A/B$) bernilai 2 [12]. Eksperimen ini menggunakan *gap ratio* atau rasio celah sebagai parameter. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan kecepatan angin yang konstan sebesar 10 m/s. Hasil yang didapatkan yaitu pada silinder sirkular menghasilkan nilai *Strodhal Number* yang besarnya identik dengan perlahan naik seiring dengan peningkatan *gap ratio* sedangkan pada silinder elips memiliki selisih yang cukup kecil pada *gap ratio* yang rendah dan semakin tinggi *gap ratio* maka selisih yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa efek dari *ground* terhadap silinder elips lebih besar dibandingkan terhadap silinder sirkular. Selain itu, didapatkan bahwa koefisien *drag* yang dihasilkan semakin naik seiring dengan peningkatan *gap ratio*. Untuk $G/B < 0,5$ memiliki nilai koefisien *drag* silinder elips yang semakin meningkat seiring dengan peningkatan *gap ratio*. Koefisien *drag* yang dihasilkan oleh silinder sirkular juga meningkat secara drastis. Seiring dengan meningkatnya G/B akan menyebabkan nilai koefisien *lift* yang dihasilkan akan semakin turun dan konvergen menuju nol. Hasil ini menunjukkan bahwa distribusi tekanan pada bagian permukaan menjadi simetrik seiring dengan peningkatan G/B .

Dapat kita lihat dari beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya bahwa penelitian terkait pemanfaatan turbin angin Savonius yang dipasang dekat gedung yang tinggi sangat penting untuk dilakukan dengan tujuan peningkatan kinerja turbin angin Savonius. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan menggunakan turbin angin Savonius yang dipasang didekat model dinding bangunan yang mensimulasikan dinding dari gedung yang tinggi yang terbuat

dari kayu *multiplies* diletakkan di dekat *advancing blade* dengan menggunakan rasio antara jarak dari pusat poros turbin angin Savonius dengan dinding terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (G/D) adalah konstan 1,58; Rasio jarak dari muka depan dinding bangunan dengan pusat poros turbin terhadap diameter turbin angin Savonius (S/D) sebesar 4,91; Rasio jarak dari *end plate* bagian atas dengan atap bangunan terhadap diameter turbin angin Savonius (T/D) sebesar 1,16; Rasio dari *end plate* bagian bawah dengan dasar penyangga turbin terhadap diameter turbin angin Savonius (K/D) sebesar 1,31; dan variasi kecepatan sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s..

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan dibandingkan performa antara turbin angin Savonius tanpa dinding dan dengan dinding. Gambar 1 menunjukkan skema penelitian dengan parameter-parameter yang digunakan. Parameter-parameter yang digunakan adalah diameter sudu turbin (D), diameter turbin (L), diameter *end plate* (D_0), jarak dari pusat poros turbin dengan dinding (G), jarak dari muka depan bangunan terhadap pusat poros turbin (S), dan kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* (U).

A. Skema Penelitian

Gambar 2 merupakan skema yang digunakan pada penelitian. *Axial fan* digunakan sebagai sumber aliran udara dimana kecepatan angin yang berhembus diatur oleh *voltage regulator* dimana jarak *axial fan* dan poros turbin angin Savonius sebesar 3200 mm. Aliran angin yang keluar dari *axial fan* akan melewati *honeycomb* yang berjarak 800 mm dari *axial fan* dimana aliran angin yang melewati *honeycomb* akan mengalir seragam. Dinding bangunan diletakkan di dekat *advancing blade* dengan rasio dari pusat poros turbin dengan dinding terhadap diameter turbin (G/D) = 1,58 dimana dinding bangunan dan turbin angin Savonius diletakkan pada penyangga turbin. Selanjutnya anemometer diletakkan di antara *honeycomb* dan turbin untuk mengukur kecepatan angin yang mengalir menuju turbin dan *torquemeter* diletakkan pada poros bagian atas turbin angin Savonius untuk mengukur besarnya torsi statis. Selain itu, *tachometer* diletakkan di dekat poros turbin angin Savonius untuk mengukur kecepatan putaran turbin.

B. Benda Uji

1) *Turbin angin Savonius dengan dimensi dan spesifikasi sebagai berikut:*

- Diameter sudu turbin (D) : 165,2 mm
- Tinggi turbin (H) : 303,4 mm
- Diameter poros turbin (b) : 19 mm
- Diameter turbin (L) : 303,4 mm
- Diameter *end plate* (D_0) : 321 mm
- Tebal *end plate* : 1 mm
- Tebal sudu turbin (t) : 4 mm
- Material sudu turbin : PVC
- Material *end plate* : Aluminium *cladding* 2024

2) *Model dinding bangunan yang digunakan memiliki dimensi sebagai berikut*

- Panjang dinding : 1550 mm
- Lebar dinding : 450 mm
- Tinggi dinding : 705 mm

C. Alat Ukur

1) Anemometer

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer yang digunakan pada penelitian ini adalah anemometer model Omega HHF-92A Digital Anemometer yang mampu mengukur dalam satuan mph, knots, m/s, dan km/h. Anemometer ini juga dapat digunakan untuk mengukur suhu udara dengan satuan °C.

2) Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi poros turbin angin Savonius yang berputar. Penelitian ini menggunakan tachometer OMEGA seri HHT12 yang dapat membaca 0,05 m sampai 7,6 m seta akurasi pembacaan 0,01% ± 1 digit.

3) Torquemeter

Torquemeter adalah suatu alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur torsi statis pada poros turbin angin Savonius. Penelitian ini menggunakan Torque meter LUTRON TQ-8800 dengan high resolution 0,1 N.cm.

4) Brake Dynamometer

Brake Dynamometer berfungsi untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilkan oleh putaran suatu objek. Nilai torsi dinamis didapatkan dengan melakukan perhitungan selisih dari massa pemberat dan nilai yang terbaca pada neraca pegas. Skema dari Brake dynamometer ditunjukkan pada gambar 3

5) Voltage regulator

Voltage Regulator merupakan alat ukur yang memiliki fungsi untuk mengatur besarnya kecepatan aliran udara dengan cara mengatur tegangan yang dikeluarkan sesuai yang dibutuhkan. Kecepatan angin axial fan dapat diperbesar dengan meningkatkan tegangan voltage regulator dan sebaliknya. Voltage regulator yang digunakan pada penelitian ini merupakan model TDGC 2J-3.

6) Neraca Pegas dan Pemberat

Penelitian ini menggunakan neraca pegas yang berfungsi untuk mengukur nilai S (gram) untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada brake dynamometer. Penelitian ini menggunakan pemberat yang berfungsi untuk memperoleh nilai torsi dinamis dan variasi TSR pada brake dynamometer. Penelitian ini menggunakan massa pemberat dengan anak timbangan NHK tipe M1 yaitu 1g, 2g, 5g, 10g, 20g, 50g, 100g, dan 200g.

D. Metode Pengukuran Data

Penelitian pada turbin angin Savonius ini menggunakan kecepatan angin yang sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Daya aktual pada penelitian ini diukur menggunakan mekanisme brake dynamometer pada saat turbin berputar dimana beban berupa massa pemberat ditambahkan hingga turbin berhenti berputar.

Torsi dinamis (T_D) dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$T_D = \{ |s - m| \cdot g \} \cdot r \quad (1)$$

dimana s merupakan pembacaan massa pada neraca pegas (Kg), m merupakan massa yang diberikan pada poros turbin (Kg), g merupakan percepatan gravitasi, dan r merupakan besarnya jari-jari poros turbin yang menerima beban.

Tip speed ratio (λ) dapat dihitung melalui persamaan berikut:

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

dimana R merupakan jari-jari turbin angin, U merupakan kecepatan sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s, dan ω merupakan kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s) yang dihitung dengan cara sebagai berikut:

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

Coefficient of moment (C_M) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_M = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R} \quad (4)$$

dimana T_D merupakan nilai dari torsi dinamis (N.m), ρ merupakan massa jenis udara, U adalah kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s, R merupakan besarnya jari-jari turbin angin Savonius, dan A merupakan cross sectional area yang terkena aliran angin yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$A = L H \quad (5)$$

dimana L merupakan panjang karakteristik turbin angin Savonius dan H merupakan tinggi turbin angin Savonius.

Coefficient of power (C_oP) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_oP = \frac{\{ (|s - m|) g \} \cdot r \cdot \pi \cdot \omega}{15 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \quad (6)$$

dimana s merupakan pembacaan massa pada neraca pegas (Kg), m merupakan besarnya massa beban yang diberikan pada poros turbin (Kg), g merupakan percepatan gravitasi bumi, r merupakan besarnya jari-jari poros turbin yang menerima beban, ω merupakan kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s), ρ merupakan massa jenis udara, A adalah luas cross sectional sebesar, dan U adalah kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s.

Coefficient of Static Torque (C_{Ts}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_{Ts} = \frac{4T_s}{\rho A U^2 L} \quad (7)$$

dimana T_s merupakan torsi statis turbin (Nm), ρ merupakan massa jenis udara (kg/m^3), A merupakan cross sectional area (m^2), U merupakan kecepatan angin (m/s), dan L merupakan panjang karakteristik turbin (m)

Data yang didapatkan dari penelitian akan diolah untuk memperoleh grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap tip speed ratio (λ), grafik Coefficient of Moment (C_M) terhadap tip speed ratio (λ), dan grafik Coefficient of Static Torque (C_{Ts}) terhadap sudut sudu turbin angin Savonius (θ).

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Coefficient of Moment (C_M)

Data yang diperoleh dari eksperimen kemudian diolah sehingga menjadi nilai Coefficient of Moment (C_M) yang selanjutnya dianalisa dan ditunjukkan pada gambar 4 dan gambar 5. Nilai dari Coefficient of Moment dihitung menggunakan persamaan (4). Nilai dari Coefficient of Moment didapatkan dengan menggunakan brake

dynamometer yang akan menghasilkan nilai torsi dinamis dan akan dibandingkan dengan nilai torsi teoritis untuk menghasilkan nilai *Coefficient of Moment*. Pada gambar 4 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) fungsi *tip speed ratio* untuk turbin tanpa dinding pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Turbin tanpa dinding menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* (C_{M0}) maksimum pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,2013 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0 dan *Coefficient of Moment* (C_{M0}) minimum pada kecepatan 4 m/s sebesar 0,1445 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0.

Pada gambar 5 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) fungsi *tip speed ratio* untuk turbin dengan dinding pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. *Coefficient of Moment*. Turbin dengan dinding menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* (C_M) maksimum pada kecepatan 6 m/s sebesar 0,203 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0 dan *Coefficient of Moment* (C_M) minimum pada kecepatan 9 m/s sebesar 0,092 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0.

Pada gambar 4 dan gambar 5 menunjukkan bahwa seiring meningkatnya nilai *tip speed ratio* maka nilai *Coefficient of Moment* (C_M) akan semakin menurun karena beban yang diberikan kepada poros semakin rendah yang membuat selisih beban pada neraca pegas dengan beban yang diberikan semakin kecil. Begitupun sebaliknya, ketika nilai *tip speed ratio* semakin rendah maka *Coefficient of Moment* (C_M) yang dihasilkan akan semakin meningkat dikarenakan beban yang diberikan kepada poros semakin besar yang membuat selisih beban pada neraca pegas dengan beban yang diberikan semakin tinggi sehingga nilai *Coefficient of moment* (C_M) akan meningkat.

B. Analisa *Coefficient of Power* (CoP)

Data yang diperoleh dari eksperimen kemudian diolah sehingga menjadi nilai *Coefficient of Power* (CoP) yang dianalisa dan ditunjukkan pada gambar 6 dan gambar 7. Besarnya nilai *Coefficient of Power* dihitung menggunakan persamaan (6). Nilai dari *Coefficient of Power* didapatkan dengan menggunakan *brake dynamometer* yang akan menghasilkan nilai torsi dinamis dan akan dibandingkan dengan nilai torsi teoritis untuk menghasilkan nilai *Coefficient of Power*. Terlihat pada gambar 6 dan gambar 7 bahwa grafik *Coefficient of Power* yang berbentuk parabolik. Nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan akan meningkat hingga mencapai nilai *Coefficient of Power* maksimum pada *tip speed ratio* tertentu dan akan turun setelah melewati titik optimumnya. Hal tersebut disebabkan oleh kecepatan angin yang semakin tinggi akan menyebabkan *losses* karena angin yang berhembus tidak mengenai sudu turbin angin Savonius dengan sempurna.

Grafik *Coefficient of Power* (CoP_0) fungsi *tip speed ratio* pada turbin tanpa dinding ditunjukkan pada gambar 6. Turbin tanpa dinding menghasilkan nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,0866 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,717 sehingga dapat dikatakan kecepatan 5 m/s menjadi kecepatan optimum karena menghasilkan nilai CoP_{max} tertinggi dengan $\lambda_{max}=0,903$. Untuk kecepatan 4 m/s nilai CoP_0 sebesar 0,0451 pada $\lambda = 0,687$ dengan $\lambda_{max} = 1,138$, untuk kecepatan 6 m/s nilai CoP_0 sebesar 0,0693 pada $\lambda = 0,704$ dengan $\lambda_{max} = 1,077$, untuk kecepatan 7 m/s nilai CoP_0 sebesar 0,0632 pada $\lambda = 0,678$ dengan $\lambda_{max} = 1,052$, untuk kecepatan 8 m/s nilai CoP_0

sebesar 0,0572 pada $\lambda = 0,715$ $\lambda_{max} = 1,043$, dan untuk kecepatan 9 m/s nilai CoP_0 sebesar 0,0517 pada $\lambda = 0,712$ dengan $\lambda_{max} = 0,997$. Dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan tidak selalu meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin.

Dapat dilihat pada gambar 6 bahwa peningkatan nilai kecepatan angin tidak selalu menyebabkan *Coefficient of Power* (CoP_0) meningkat. Berdasarkan gambar 6 dapat diketahui bahwa turbin tanpa dinding dengan kecepatan angin 5 m/s dapat bekerja sangat baik karena kecepatan 5 m/s merupakan kecepatan optimum pada turbin angin Savonius tanpa dinding.

Terlihat pada gambar 6 grafik *Coefficient of Power* yang berbentuk parabolik. Nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan akan meningkat hingga mencapai nilai *Coefficient of Power* maksimum pada *tip speed ratio* tertentu dan akan turun setelah melewati titik optimumnya. Hal tersebut disebabkan oleh kecepatan angin yang semakin tinggi akan menyebabkan *losses* karena angin yang berhembus tidak mengenai sudu turbin angin Savonius dengan sempurna. Kemudian hal itu menyebabkan daya yang dihasilkan akan terpengaruh oleh *losses* yang terjadi sehingga nilai daya yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan daya *input* yang diberikan oleh angin sehingga nilai CoP yang dihasilkan juga akan semakin rendah seiring meningkatnya kecepatan angin. Hal tersebut disebabkan oleh fenomena *solid wall* yang akan menghalangi angin menuju sudu turbin angin Savonius yang terjadi karena putaran angin yang dihasilkan akan terlalu tinggi ketika kecepatan angin semakin besar. Namun apabila turbin bekerja pada kecepatan angin yang terlalu rendah menyebabkan nilai putaran turbin akan sangat kecil dan nilai CoP rendah pula.

Grafik *Coefficient of Power* (CoP) fungsi *tip speed ratio* pada turbin dengan dinding ditunjukkan pada gambar 7. Turbin tanpa dinding menghasilkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,0818 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,681 sehingga dapat dikatakan kecepatan 5 m/s menjadi kecepatan optimum karena menghasilkan nilai CoP_{max} tertinggi dengan $\lambda_{max}=0,119$. Untuk kecepatan 4 m/s nilai CoP sebesar 0,0596 pada $\lambda = 0,698$ dengan $\lambda_{max} = 1,078$, untuk kecepatan 6 m/s nilai CoP sebesar 0,0801 pada $\lambda = 0,696$ dengan $\lambda_{max} = 1,056$, untuk kecepatan 7 m/s nilai CoP sebesar 0,0605 pada $\lambda = 0,69$ dengan $\lambda_{max} = 0,995$, untuk kecepatan 8 m/s nilai CoP sebesar 0,0557 pada $\lambda = 0,718$ $\lambda_{max} = 1,022$, dan untuk kecepatan 9 m/s nilai CoP sebesar 0,0486 pada $\lambda = 0,707$ dengan $\lambda_{max} = 1,009$. Dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan tidak selalu meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin.

Dapat dilihat pada gambar 7 bahwa peningkatan nilai kecepatan angin tidak selalu menyebabkan *Coefficient of Power* (CoP) meningkat. Berdasarkan gambar 7 dapat diketahui bahwa turbin tanpa dinding dengan kecepatan angin 5 m/s dapat bekerja sangat baik karena kecepatan 5 m/s merupakan kecepatan optimum pada turbin angin Savonius dengan dinding.

Dari gambar 7 dapat dilihat bahwa rentang *tip speed ratio* terbaik berada di *tip speed ratio* sebesar 0,6 – 0,8. Pada rentang *tip speed ratio* tersebut memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimum pada setiap kecepatan angin. Peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum terbesar setelah

penggunaan dinding terdapat pada kecepatan 4 m/s dengan peningkatan sebesar 32% yang memiliki nilai CoP sebesar 0,0596 pada $\lambda = 0,698$.

Grafik pada gambar 6 dan gambar 7 berbentuk parabolik dimana telah sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Mao, dkk (2020) dan N. H. Mahmoud, dkk (2010). Nilai dari *Coefficient of Power* didekati secara matematik dengan cara mengalikan antara nilai *Coefficient of Moment* dan *tip speed ratio* sehingga nilai *Coefficient of Power* fungsi *tip speed ratio* yang berbentuk parabolik didapatkan. *Coefficient of Moment* merupakan fungsi dari *tip speed ratio* pangkat satu yang menyebabkan grafik *Coefficient of Power* berbentuk parabolik.

C. Analisa *Coefficient of Static Torque* (C_{Ts})

Data torsi statis pada turbin tanpa dinding dan torsi statis pada turbin dengan dinding yang diperoleh dari eksperimen kemudian diolah sehingga menjadi nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{Ts} dan C_{Ts0}) yang dianalisa dan ditunjukkan pada gambar 8 dan gambar 9. Nilai torsi statis didapatkan dengan cara mengukur menggunakan *torquemeter* pada sudut 0° - 180° dengan kenaikan tiap 10° . Pengambilan data dilakukan ketika turbin angin Savonius berada pada posisi diam dan dicekam pada bagian poros turbinnya kemudian diberikan aliran udara sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Nilai torsi statis kemudian akan dibandingkan dengan nilai torsi teoritis sehingga didapatkan nilai dari *Coefficient of Static Torque*. Nilai dari *Coefficient of Static Torque* dihitung menggunakan persamaan (7).

Gambar 8 menunjukkan grafik *Coefficient of Static Torque* (C_{Ts0}) dengan fungsi sudut sudu turbin angin Savonius pada turbin tanpa dinding dengan kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Pada kecepatan 4 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 1,65 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -1,38 pada sudut 140° , pada kecepatan 5 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 1,21 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -1,01 pada sudut 140° , pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 1,003 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,754 pada sudut 140° , kecepatan 7 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 0,84 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,665 pada sudut 140° , kecepatan 8 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 0,72 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,58 pada sudut 140° , dan pada kecepatan 9 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 0,64 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,54 pada sudut 140° . Berdasarkan grafik pada gambar 8 dapat dilihat bahwa kecepatan 9 m/s memiliki kemampuan *self starting* yang paling baik karena memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* negatif yang paling rendah.

Gambar 9 menunjukkan grafik *Coefficient of Static Torque* (C_{Ts}) dengan fungsi sudut sudu turbin angin Savonius pada turbin dengan dinding dengan kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Pada kecepatan 4 m/s memiliki nilai C_{Ts} maksimum sebesar 2,11 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -1,63 pada sudut 140° , pada kecepatan 5 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 1,22 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -1,05 pada sudut 140° , pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 0,84 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,79 pada sudut 140° , kecepatan 7 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 0,58 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,5 pada sudut

140° , kecepatan 8 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 0,55 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,4 pada sudut 140° , dan pada kecepatan 9 m/s memiliki nilai C_{Ts0} maksimum sebesar 0,46 pada sudut 30° dan C_{Ts0} minimum sebesar -0,33 pada sudut 140° . Berdasarkan grafik pada gambar 9 dapat dilihat bahwa kecepatan 9 m/s memiliki kemampuan *self starting* yang paling baik karena memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* negatif yang paling rendah.

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

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari eksperimen kinerja turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan gedung yang diletakkan di dekat *advancing blade* dengan rasio jarak G/D bernilai 1,58, dengan variasi kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 (m/s) didapatkan beberapa kesimpulan dari eksperimen tersebut. Beberapa kesimpulan tersebut yaitu: (1) Peningkatan *Coefficient of Power* maksimum yang dihasilkan dengan peletakan dinding di dekat *advancing blade* turbin angin Savonius dengan G/D = 1,58 adalah pada kecepatan 4 m/s yaitu sebesar 32% dengan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,0596 pada $\lambda = 0,698$ dan *Coefficient of Moment* sebesar 0,1285 pada $\lambda = 0$. (2) Peletakan dinding di dekat *advancing blade* turbin angin Savonius dengan G/D = 1,58 dapat meningkatkan nilai *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* pada kecepatan angin 4 dan 6 m/s dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa dinding. Nilai *Coefficient of Power* meningkat sebesar 32% untuk kecepatan 4 m/s dan 15,6% untuk kecepatan 6 m/s dibandingkan nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin tanpa dinding. Nilai *Coefficient of Moment* meningkat sebesar 20% untuk kecepatan 4 m/s dan 7,7% untuk kecepatan 6 m/s dibandingkan nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan oleh turbin tanpa dinding. (3) Peletakan dinding di dekat *advancing blade* turbin angin Savonius dengan G/D = 1,58 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* turbin pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik. 2019. "Berita Resmi Statistik." Jakarta: Badan Pusat Statistik, [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/pressrelease/2021/01/21/1854/hasil-sensus-penduduk-2020.html>
- [2] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). 2018. Outlook

- Energi Indonesia 2018 "Energi Berkelanjutan untuk Transportasi Darat". Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).
- [3] Sekretariat Perusahaan PT PLN. 2020. "Statistik PLN 2019." Indonesia: Sekretariat Perusahaan PT PLN.
- [4] Azhar, Muhamad, and Dendy Adam Satriawan. 2018. "Implementasi kebijakan energi baru dan energi terbarukan dalam rangka ketahanan energi nasional." *Administrative Law and Governance Journal* 1 (4): 398–412.
- [5] Badan Pemeriksaan Keuangan Republik Indonesia. 2014. "Kebijakan Energi Nasional". Jakarta: Badan Pemeriksaan Keuangan Republik Indonesia, [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/5523/pp-no-79-tahun-2014>.
- [6] Fachri, Muhammad Rizal, dan Hendrayana. 2017. "Analisa potensi energi angin dengan distribusi weibull untuk pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) Banda Aceh." *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro* 1 (1): 1–8.
- [7] Dewan Energi Nasional (DEN). 2019. Ketahanan Energi Indonesia 2019. Jakarta: Dewan Energi Nasional (DEN).
- [8] Mao, Zhaoyong, Guangyong Yang, Tianqi Zhang, and Wenlong Tian. 2020. "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine." *Energies* 13 (10).
- [9] Park, Jeongsu, Hyung Jo Jung, Seung Woo Lee, and Jiyoun Park. 2015. "A new building-integrated wind turbine system utilizing the building." *Energies* 8 (10): 11846–70.
- [10] N.H. Mahmoud, EL-Haroun, A.A, Wahba, E, dan Nasef, M.H. 2010. An experimental study on improvement of savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal* 51 (1): 19–25.
- [11] Casini, Marco. 2015. "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings." *Journal of Clean Energy Technologies* 4 (1): 56–65.
- [12] Choi, J.H. & Lee, S.J. 2000. "Ground effect of flow around an elliptic cylinder in a turbulent boundary layer." *Journal of Fluids and Structures* 14: 697-709.