

# Studi Eksperimen Efek Penempatan Dinding di Samping Sudu *Returning* Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius Pada Jarak $G/D=1,0018$

Hilmi Rahmat Fauzi dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

**Abstrak**—Seiring meningkatnya kebutuhan listrik dan terbatasnya ketersediaan energi tidak terbarukan, maka pentingnya beralih ke energi baru terbarukan (EBT). Salah satu potensi energi baru terbarukan yang ada di Indonesia adalah energi angin. Pemasangan turbin angin Savonius pada gedung di perkotaan diharapkan mampu memanfaatkan aliran angin yang bebas hambatan dan meningkatkan peran energi baru terbarukan. Penelitian ini dilakukan dengan menempatkan sudu *returning* turbin angin Savonius di samping model dinding bangunan dengan rasio jarak antara pusat turbin dan dinding terhadap diameter sudu turbin ( $G/D$ ) sebesar 1,0018 dan variasi kecepatan angin yang digunakan sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini menunjukkan bahwa penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak  $G/D = 1,0018$  tidak efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* pada semua kecepatan. Selain itu, penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak  $G/D = 1,0018$  efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin pada kecepatan 5 dan 6 m/s yang ditunjukkan oleh peningkatan Koefisien Torsi Statis minimum ( $CT_{Smin}$ ).

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

## I. PENDAHULUAN

BERDASARKAN data sensus penduduk Indonesia tahun 2020, jumlah penduduk Indonesia sebesar 270.20 juta jiwa, meningkat sebesar 32,56 juta jiwa dari data sensus penduduk tahun 2010 dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,25 persen per tahun selama kurun waktu sepuluh tahun terakhir [1]. Jumlah penduduk yang terus meningkat dan bertumbuhnya ekonomi menyebabkan meningkatnya kebutuhan listrik di Indonesia. Kebutuhan listrik Indonesia diperkirakan akan mencapai angka 4.425 kWh/kapita pada tahun 2050, meningkat lebih dari 5 kali lipat dibanding kebutuhan listrik pada tahun 2017 [2]. Pasokan energi yang ada di Indonesia masih didominasi oleh energi yang tidak terbarukan. Dari total pasokan energi primer Indonesia pada tahun 2019 sebesar 226, 9 juta TOE, pasokan energi terbesar berasal dari batu bara yaitu sebesar 35,9%, diikuti minyak sebesar 33,7%, dan gas sebesar 17,8% [3]. Melihat ketersediaan energi tidak terbarukan yang sewaktu-waktu bisa habis, maka pentingnya beralih ke energi baru terbarukan (EBT) yang salah satunya adalah energi angin. Potensi energi angin di sejumlah wilayah di Indonesia bisa mencapai kecepatan  $\geq 4$  m/s dengan kecepatan angin rata-rata berkisar 3-6 m/s [3]. Maka, dengan memasang turbin angin Savonius pada gedung di perkotaan diharapkan mampu untuk memanfaatkan keuntungan pemasangan berupa turbin angin

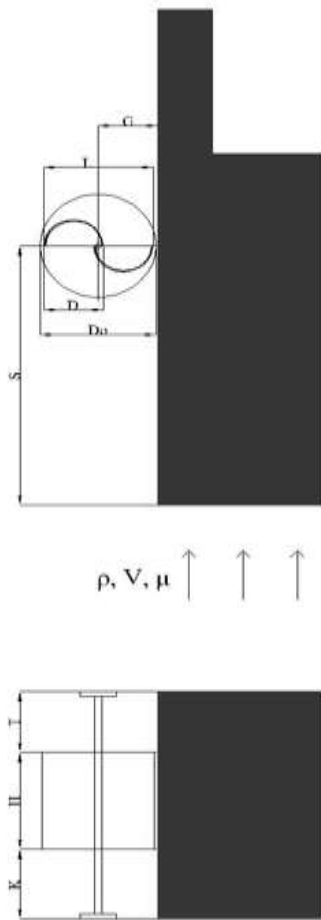
Savonius mampu berputar pada kecepatan angin yang rendah serta aliran angin yang mengalir bebas hambatan.

Geometri yang berbeda dari turbin Savonius dipelajari secara eksperimental untuk menentukan parameter operasi yang paling efektif. Parameter operasi yang dipakai pada penelitian ini adalah jumlah sudu (dua sudu, tiga sudu, dan empat sudu), variasi *stages* (*single stage* dan *double stages*), keberadaan *end plate*, *aspect ratio* (0,5, 1, 2, 4, dan 5) [4]. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa turbin dengan dua sudu lebih efisien daripada turbin dengan tiga dan empat sudu. Turbin *double stage* memiliki efisiensi yang lebih baik daripada *single stage*. Performa turbin dengan *end plate* lebih baik daripada tanpa *end plate*. Turbin tanpa *overlap ratio* bekerja lebih baik daripada turbin dengan *overlap*. Peningkatan pada *aspect ratio* menyebabkan performa turbin meningkat.

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk memberikan analisis dari berbagai turbin angin vertikal yang tersedia di pasaran serta ilustrasi bagaimana pemanfaatan turbin angin yang dipasang di gedung tinggi (*Building Augmented Wind Turbine*). Hasil dari penelitian tersebut mengungkapkan bahwa pemanfaatan turbin vertikal di daerah perkotaan bisa menjadi solusi efektif dalam produksi energi terbarukan [5]. Dalam aplikasinya, pemasangan *Building Augmented Wind Turbine* (BAWT) perlu melalui proses analisis lingkungan terhadap sumber daya angin di sekitar untuk menentukan lokasi optimal serta menentukan model turbin yang sesuai. Interaksi antara bentuk bangunan dengan intensitas dan arah angin juga perlu diperhatikan sehingga produksi energi bisa maksimal.

Penelitian lainnya yang mempelajari tentang pemanfaatan pemasangan turbin angin pada bangunan [6]. Pada penelitian ini mempelajari tentang kinerja turbin angin Savonius yang dipasang pada tepi gedung tinggi. Penelitian ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) transien dan menggunakan tiga parameter utama yaitu gap turbin dengan gedung, arah angin, dan pengaruh turbin yang berdekatan untuk mengetahui interaksi aliran antara gedung dan turbin angin. Hasil pada penelitian ini didapatkan bahwa semakin kecil gap turbin dengan gedung, semakin besar *coefficient of power* ( $C_p$ ). Pemasangan turbin yang berdekatan memberikan efek negatif pada kinerja turbin. Sudut arah angin memberikan pengaruh yang paling signifikan terhadap kinerja turbin angin dengan daerah yang menghasilkan  $C_p$  tertinggi pada daerah samping kiri dan kanan dengan nilai maksimum  $C_p$  sebesar 1,2093.

Penelitian selanjutnya yang mempelajari tentang turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan gedung [7]. Pada penelitian ini, dilakukan studi eksperimen yang bertujuan

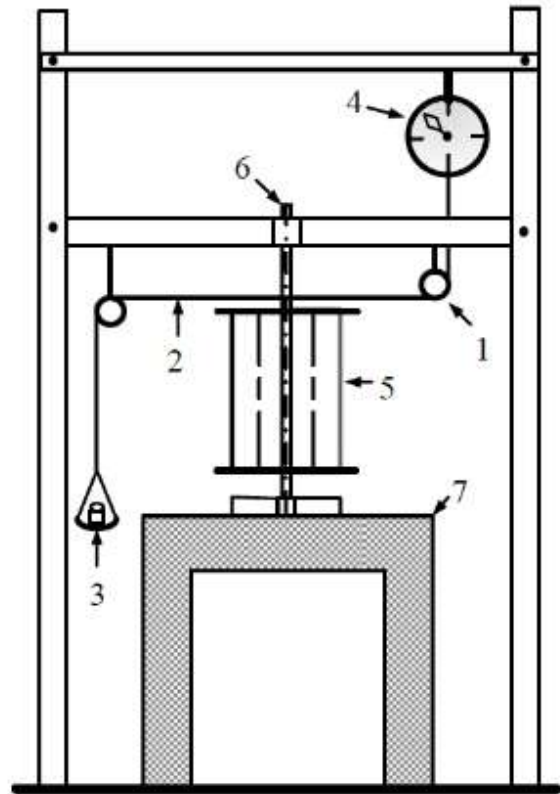


Gambar 2. Parameter penelitian.

Keterangan:

- U : kecepatan angin (m/s)
- $\rho$  : massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)
- $\mu$  : viskositas udara (N.s/m<sup>2</sup>)
- D : diameter sudu turbin (m)
- Do: 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)

untuk mencari kecepatan angin optimum yang dapat memberikan kinerja turbin terbaik pada turbin angin Savonius yang dipasang pada sisi gedung dengan memposisikan *advancing blade* di dekat dinding. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s dan menggunakan rasio jarak pusat turbin ke dinding terhadap diameter sudu turbin ( $G/D$ ) sebesar 1,0018. Kinerja turbin ditentukan dengan menghitung *Coefficient of Power* (CoP) dan *Coefficient of Moment* ( $C_m$ ) yang dihasilkan turbin. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa kecepatan angin optimum yang dapat memberikan performa terbaik pada turbin adalah sebesar 4 m/s dengan nilai  $CoP_{max}$  yang didapatkan sebesar 0,071 dan nilai  $C_{m,max}$  sebesar 0,1557. Kedua nilai tersebut menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* maksimum pada turbin tanpa dinding. Dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini, kinerja turbin dengan dinding lebih tinggi dibandingkan kinerja turbin tanpa dinding hanya terjadi pada variasi kecepatan angin 4 m/s saja.



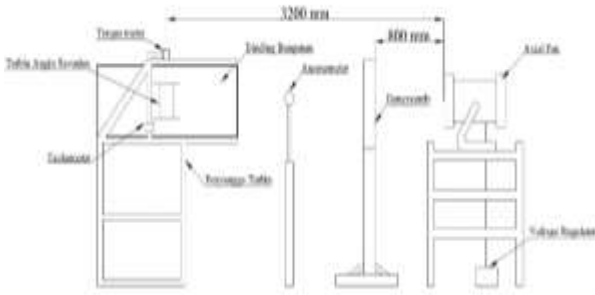
Gambar 1. Skema brake dynamometer.

Dimana :

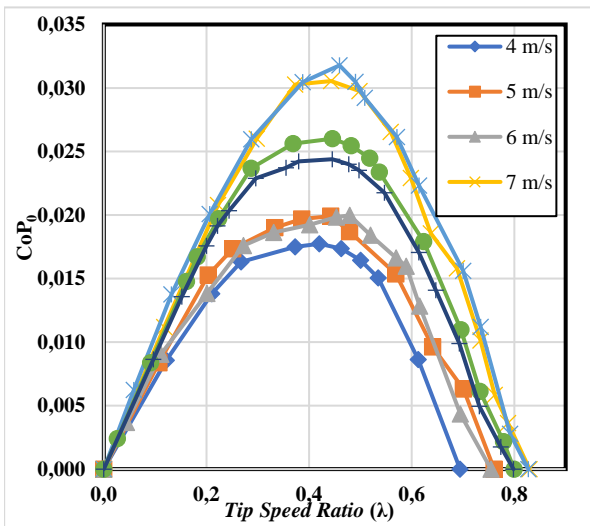
- 1 = Katrol
- 2 = Benang
- 3 = Pemberat
- 4 = Timbangan Pegas
- 5 = Turbin Angin Savonius
- 6 = Poros
- 7 = Penyangga turbin angin Savonius

Dalam penelitian, efek pemasangan *circular cylinder* di depan *returning blade* terhadap kinerja turbin angin Savonius dipelajari secara eksperimental. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan rasio jarak antara *circular cylinder* dan *returning blade* terhadap diameter sudu ( $S/D$ ) [8]. Parameter tetap yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan udara ( $U$ ) sebesar 5 m/s untuk mendapatkan bilangan Reynold ( $Re$ ) sebesar 99.000 dan rasio diameter *circular cylinder* terhadap diameter sudu turbin ( $d/D$ ) sebesar 0,54. Sedangkan, dilakukan variasi nilai rasio jarak antara sumbu *returning blade* dan sumbu *circular cylinder* terhadap diameter sudu turbin ( $S/D$ ) = 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2. Didapatkan hasil terdapat peningkatan nilai *coefficient of power* pada nilai  $S/D$  = 1,4, 1,6, dan 1,8. Hal ini disebabkan *circular cylinder* yang dipasang di depan *returning blade* bertindak sebagai kontrol pasif aliran, sehingga menyebabkan distribusi aliran di sekitar *returning blade* terganggu. Namun, ketika posisi *circular cylinder* semakin jauh, yaitu dengan nilai  $S/D > 1,8$ , nilai  $C_p$  yang didapatkan relatif sama dengan turbin tanpa *circular cylinder*.

Dari beberapa penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa penelitian turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan bangunan masih sedikit dan masih dapat dikembangkan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius untuk pemasangan pada gedung tinggi. Pada penelitian ini



Gambar 5. Skema dan instalasi peralatan.



Gambar 6. Grafik  $CoP_0$  terhadap  $tip\ speed\ ratio$  turbin angin savonius tanpa dinding.

dilakukan eksperimen dengan memasang *returning blade* turbin Savonius di samping model dinding bangunan dengan perbandingan jarak dinding ke poros turbin terhadap diameter sudu turbin ( $G/D$ ) sebesar 1,0018 dan memvariasikan kecepatan angin sebesar 4-10 m/s untuk mengetahui nilai kecepatan angin yang dapat menghasilkan kinerja turbin angin yang optimum.

## II. METODE PENELITIAN

Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan angin ( $U$ ), massa jenis udara ( $\rho$ ), viskositas udara ( $\mu$ ), 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 ( $\omega$ ). Parameter pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.

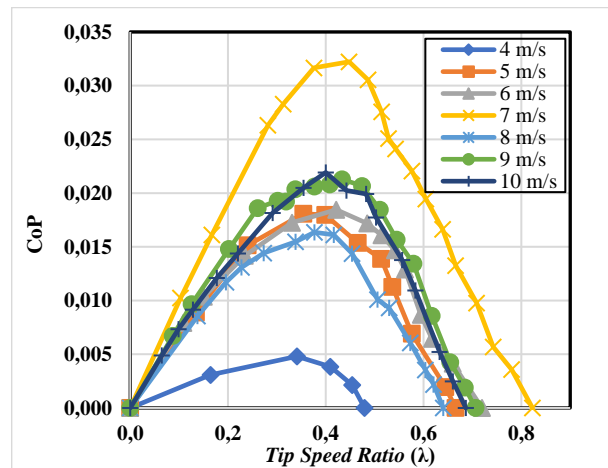
### A. Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

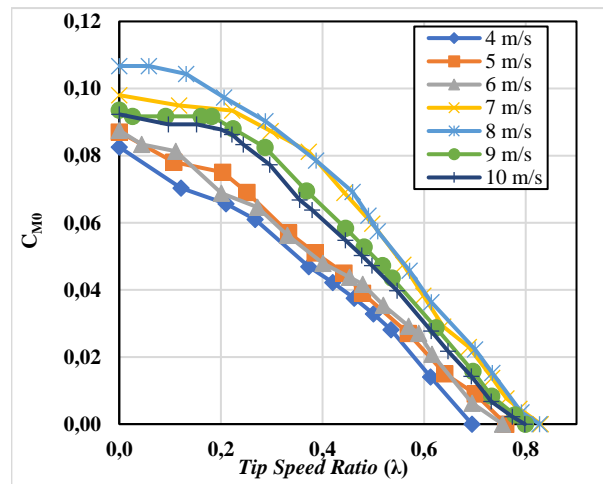
#### 1) Turbin Angin Savonius

Spesifikasi dari turbin angin Savonius yang digunakan antara lain:

- 1) Diameter Sudu ( $D$ ) : 165,2 mm
- 2) Tinggi ( $H$ ) : 303,4 mm
- 3) Diameter Turbin ( $L$ ) : 303,4 mm
- 4) Diameter Poros ( $b$ ) : 19 mm
- 5) Diameter End Plate ( $D_o$ ) : 321 mm
- 6) Tebal End Plate : 1 mm



Gambar 3. Grafik  $CoP$  terhadap  $tip\ speed\ ratio$  turbin angin savonius dengan dinding  $G/D = 1,0018$ .



Gambar 4. Grafik  $CM_0$  terhadap  $tip\ speed\ ratio$  turbin angin savonius tanpa dinding.

- 7) Tebal Sudu ( $x$ ) : 4 mm
- 8) Material Sudu : Pipa PVC
- 9) Material End Plate : Aluminium Cladding 2024

#### 2) Model Dinding Bangunan

Spesifikasi dinding bangunan yang digunakan adalah:

- 1) Panjang : 1550 mm
- 2) Lebar : 450 mm
- 3) Tinggi : 705 mm
- 4) Tebal : 12 mm
- 5) Material : *Multiplex wood*

#### 3) Axial Fan

*Axial fan* berfungsi untuk menghasilkan kecepatan angin dengan tipe yang digunakan adalah *CHE SF-45 H*

#### 4) Honeycomb

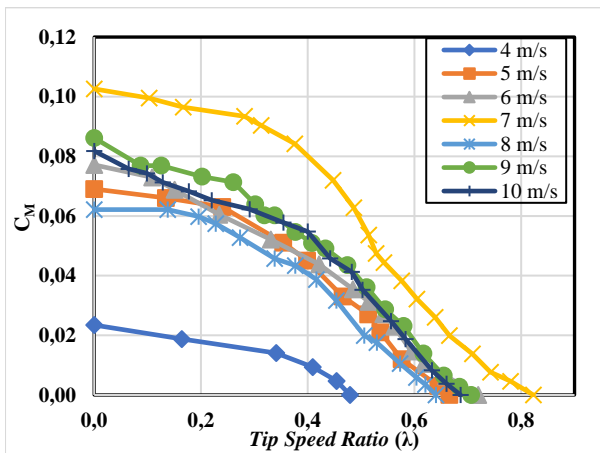
*Honeycomb* berfungsi sebagai pengarah aliran angin agar menjadi aliran *uniform*.

#### 5) Voltage Regulator

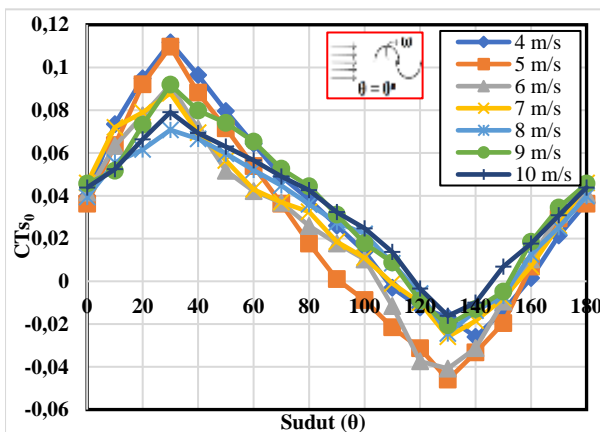
*Voltage regulator* digunakan sebagai pengatur kecepatan aliran dengan mengatur besar tegangan *output* serta tipe yang digunakan adalah Model *TDGC 2J-3*.

#### 6) Bearing

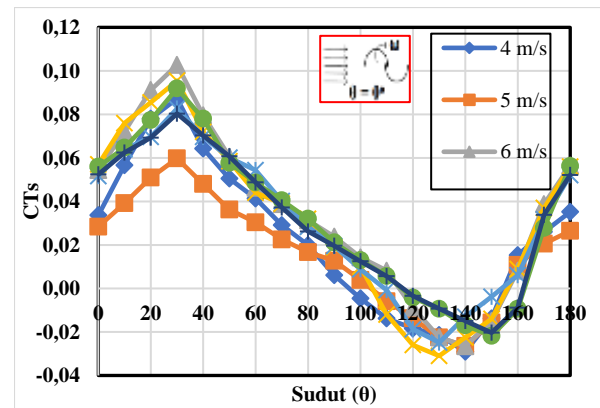
*Bearing* berfungsi untuk membantu berputarnya poros dan sebagai tumpuan sebuah poros agar dapat berputar tanpa mengalami gesekan yang berlebihan serta tipe yang digunakan adalah tipe *SKF 3201 ATN9*.



Gambar 8. Grafik Cm terhadap tip speed ratio turbin angin savonius dengan dinding G/D = 1,0018.



Gambar 9. Grafik CTs0 terhadap sudut sudu turbin angin savonius tanpa dinding.



Gambar 7. Grafik CTs terhadap sudut sudu turbin angin savonius dengan dinding G/D = 1,0018.

angin yang mengalir diukur dengan menggunakan anemometer yang diletakkan pada jarak 8D di depan turbin angin Savonius. Hal tersebut dilakukan untuk menghindari efek putaran balik dari turbin angin Savonius serta efek adanya penempatan dinding.

Hasil pengukuran berupa nilai torsi statis dan torsi dinamis yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai *coefficient of power*, *coefficient of moment* dan *coefficient of static torque*. Torsi statis didapatkan dengan menggunakan *torque meter* serta untuk mendapatkan torsi dinamis dapat menggunakan sistem *brake dynamometer*.

C. Perhitungan Performa Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini, turbin angin Savonius dioperasikan pada kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 m/s. 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.

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

$\rho$  merupakan massa jenis udara dalam satuan kg/m<sup>3</sup>, V merupakan kecepatan angin yaitu sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s,  $\mu$  merupakan viskositas dinamis udara dalam satuan N.s/m<sup>2</sup>, L merupakan panjang karakteristik yang sama dengan diameter turbin angin Savonius yaitu  $L=2D-b-2x$ .

Daya teoritis atau daya *input* merupakan daya yang dihasilkan oleh angin dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \tag{2}$$

$P_w$  merupakan daya teoritis dalam satuan Watt, A merupakan luas penampang yang terkena angin serta dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$A = L \cdot H = (2D - b - 2x) \cdot H \tag{3}$$

L merupakan diameter turbin angin Savonius dalam satuan m serta H adalah tinggi turbin angin Savonius dalam satuan m.

Daya aktual atau daya *output* merupakan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius serta dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_T = T_D \cdot \omega \tag{4}$$

$P_T$  merupakan daya aktual dalam satuan Watt,  $\omega$  merupakan kecepatan tangensial turbin angin Savonius dalam

7) Anemometer

Anemometer berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran angin dengan tipe yang digunakan adalah OMEGA model HHF141A.

8) Tachometer

Tachometer berfungsi untuk mengukur kecepatan putaran poros dan digunakan tachometer tipe OMEGA HHT12.

9) Torque Meter

Torque meter berfungsi untuk mengukur nilai torsi statis dengan tipe yang digunakan adalah LUTRON TQ-800.

10) Brake Dynamometer

Brake dynamometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur nilai torsi dinamis turbin. Nilai torsi dinamis didapatkan dengan menghitung selisih beban pemberat dengan nilai yang terbaca pada neraca pegas. Skema dari *brake dynamometer* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.

B. Metode Pengukuran

Skema dan instalasi peralatan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. *Axial fan* diletakkan di depan turbin angin Savonius sejauh 3200 mm serta menempatkan *honeycomb* di depan *axial fan* sejauh 800 mm agar aliran angin yang mengalir menjadi *uniform*. Untuk mengatur kecepatan angin dari *axial fan* digunakan *voltage regulator*. Dinding yang terbuat dari kayu multiplek diletakkan di samping *advancing blade* pada rasio G/D=1,0018. Kecepatan



satuan rad/s,  $T_D$  merupakan torsi dinamis yang didapat dengan menggunakan sistem *brake dynamometer* dan dalam satuan (N.m). Torsi dinamis ini dilakukan dengan menghitung selisih beban yang diberikan pada sistem *brake dynamometer* sehingga didapat persamaan:

$$T_D = |m - s| \cdot g \cdot r \quad (5)$$

$m$  adalah massa pemberat dalam satuan kg,  $s$  adalah massa yang terbaca pada neraca pegas dalam satuan kg,  $g$  adalah percepatan gravitasi dalam satuan  $m/s^2$  dan  $r$  adalah jari-jari poros turbin angin Savonius yang menerima beban dalam satuan m.

*Tip speed ratio* ( $\lambda$ ) merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial dari turbin angin Savonius terhadap kecepatan angin yang dapat ditulis dalam persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (6)$$

$R$  merupakan jari-jari turbin angin Savonius dalam satuan m. *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) merupakan perbandingan antara torsi input dengan torsi output atau perbandingan antara torsi dinamis dari turbin angin Savonius dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin. Sehingga didapat persamaan:

$$C_M = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot V^2} \quad (7)$$

*Coefficient of Power* (CoP) merupakan perbandingan daya output dengan daya input atau perbandingan antara daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin terhadap daya kinetik yang dimiliki oleh angin. Sehingga dapat ditulis dalam persamaan:

$$C_{OP} = \frac{|m-s| \cdot g \cdot r \cdot \pi \cdot n}{15 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3} \quad (8)$$

*Coefficient of static torque* ( $C_{TS}$ ) merupakan perbandingan antara torsi statis yang dihasilkan pada turbin angin Savonius dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin. Sehingga dapat ditulis dalam persamaan:

$$C_{TS} = \frac{T_S}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot V^2} \quad (9)$$

### III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### A. Analisis Coefficient of Power (CoP)

Nilai *coefficient of power* (CoP) akan ditampilkan dalam bentuk grafik CoP fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ ). Gambar 4 merupakan grafik *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) terhadap *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Sedangkan, Gambar 5 merupakan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) turbin angin Savonius dengan dinding pada jarak  $G/D = 1,0018$  untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Nilai *Coefficient of Power* (CoP) didapatkan dari perbandingan daya yang dihasilkan turbin dengan daya teoritis yang diberikan aliran angin. Besar daya yang dihasilkan turbin merupakan hasil perkalian antara torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin. Nilai torsi dinamis didapatkan melalui pengukuran menggunakan *brake dynamometer*, sedangkan kecepatan sudut turbin diketahui

dengan mengukur kecepatan putar turbin menggunakan *tachometer*.

Pada Gambar 4, dapat diamati bahwa pada kecepatan 4 m/s nilai  $CoP_0$  maksimum ( $CoP_{0max}$ ) sebesar 0,0177 dengan  $\lambda = 0,420$ ; pada kecepatan 5 m/s nilai  $CoP_{0max}$  sebesar 0,0199 dengan  $\lambda = 0,442$ ; pada kecepatan 6 m/s nilai  $CoP_{0max}$  sebesar 0,0200 dengan  $\lambda = 0,479$ ; pada kecepatan 7 m/s nilai  $CoP_{0max}$  sebesar 0,0305 dengan  $\lambda = 0,443$ ; pada kecepatan 8 m/s nilai  $CoP_{0max}$  sebesar 0,0318 dengan  $\lambda = 0,459$ ; pada kecepatan 9 m/s nilai  $CoP_{0max}$  sebesar 0,0260 dengan  $\lambda = 0,446$ ; dan pada kecepatan 10 m/s nilai  $CoP_{0max}$  sebesar 0,0244 dengan  $\lambda = 0,445$ . Nilai  $CoP_0$  maksimum meningkat dengan seiring bertambahnya kecepatan hingga mencapai titik maksimum yaitu pada saat kecepatan udara sebesar 8 m/s. Kemudian setelah mencapai titik kecepatan optimum, nilai  $CoP_0$  maksimum menurun hingga kecepatan udara 10 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai CoP tidak berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angin.

Pada Gambar 5, dapat diamati bahwa pada kecepatan 4 m/s nilai CoP maksimum ( $CoP_{max}$ ) sebesar 0,0048 dengan  $\lambda = 0,341$ ; pada kecepatan 5 m/s nilai  $CoP_{max}$  sebesar 0,0181 dengan  $\lambda = 0,354$ ; pada kecepatan 6 m/s nilai  $CoP_{max}$  sebesar 0,0185 dengan  $\lambda = 0,422$ ; pada kecepatan 7 m/s nilai  $CoP_{max}$  sebesar 0,0322 dengan  $\lambda = 0,448$ ; pada kecepatan 8 m/s nilai  $CoP_{max}$  sebesar 0,0164 dengan  $\lambda = 0,377$ ; pada kecepatan 9 m/s nilai  $CoP_{max}$  sebesar 0,0208 dengan  $\lambda = 0,408$ ; dan pada kecepatan 10 m/s nilai  $CoP_{max}$  sebesar 0,0219 dengan  $\lambda = 0,400$ . Berdasarkan Gambar 4 dan 5, dapat diamati bahwa penempatan dinding pada jarak  $G/D = 1,0018$  tidak efektif meningkatkan nilai CoP turbin angin Savonius pada semua kecepatan. Hal ini disebabkan aliran angin yang terdefleksi oleh dinding cukup kuat sehingga turbin bekerja pada daerah *low velocity* pada semua kecepatan.

#### B. Analisis Coefficient of Moment ( $C_M$ )

Nilai dari *coefficient of moment* ( $C_M$ ) akan ditampilkan dalam grafik  $C_M$  fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ ). Gambar 6 merupakan grafik *Coefficient of Moment* ( $C_{M0}$ ) terhadap *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Sedangkan, Gambar 7 merupakan grafik *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) terhadap *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) turbin angin Savonius dengan dinding pada jarak  $G/D = 1,0018$  untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Nilai  $C_{M0}$  didapatkan dari perbandingan torsi dinamis turbin dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh aliran angin. Nilai torsi dinamis didapatkan melalui pengukuran menggunakan *brake dynamometer*.

Pada Gambar 6, dapat diamati bahwa pada kecepatan 4 m/s nilai  $C_{M0}$  maksimum ( $C_{M0max}$ ) sebesar 0,0826 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 5 m/s nilai  $C_{M0max}$  sebesar 0,0871 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 6 m/s nilai  $C_{M0max}$  sebesar 0,0876 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 7 m/s nilai  $C_{M0max}$  sebesar 0,0980 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 8 m/s nilai  $C_{M0max}$  sebesar 0,1067 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 9 m/s nilai  $C_{M0max}$  sebesar 0,0936 dengan  $\lambda = 0$ ; dan pada kecepatan 10 m/s nilai  $C_{M0max}$  sebesar 0,0923 dengan  $\lambda = 0$ . Nilai  $C_{M0}$  maksimum meningkat dengan seiring bertambahnya kecepatan hingga mencapai titik maksimum yaitu pada saat kecepatan udara sebesar 8 m/s. Kemudian setelah mencapai titik kecepatan optimum, nilai  $C_{M0}$  maksimum menurun hingga kecepatan udara 10 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai

$C_m$  tidak berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angin.

Pada Gambar 7, dapat diamati bahwa pada kecepatan 4 m/s nilai  $C_{Mmax}$  maksimum ( $C_{Mmax}$ ) sebesar 0,0235 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 5 m/s nilai  $C_{Mmax}$  sebesar 0,0691 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 6 m/s nilai  $C_{Mmax}$  sebesar 0,0771 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 7 m/s nilai  $C_{Mmax}$  sebesar 0,1026 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 8 m/s nilai  $C_{Mmax}$  sebesar 0,0622 dengan  $\lambda = 0$ ; pada kecepatan 9 m/s nilai  $C_{Mmax}$  sebesar 0,0862 dengan  $\lambda = 0$ ; dan pada kecepatan 10 m/s nilai  $C_{Mmax}$  sebesar 0,0818 dengan  $\lambda = 0$ . Berdasarkan Gambar 6 dan 7, dapat diamati bahwa penempatan dinding pada jarak  $G/D = 1,0018$  tidak efektif meningkatkan nilai  $C_M$  turbin angin Savonius pada semua kecepatan. Hal ini disebabkan aliran angin yang terdefleksi oleh dinding cukup kuat sehingga turbin bekerja pada daerah *low velocity* pada semua kecepatan.

### C. Analisis Coefficient of Static Torque (CTs)

Nilai dari *coefficient of static torque* (CTs) akan ditampilkan dalam grafik CTs fungsi sudut ( $\theta$ ). Gambar 8 merupakan grafik *coefficient of static torque* ( $CT_{s0}$ ) terhadap sudut ( $\theta$ ) turbin angin Savonius tanpa dinding untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Sedangkan, Gambar 9 merupakan grafik *coefficient of static torque* ( $CT_{s0}$ ) terhadap sudut ( $\theta$ ) turbin angin Savonius dengan dinding pada jarak  $G/D = 1,0018$  untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Nilai  $CT_{s0}$  didapatkan dari perbandingan torsi statis turbin dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh aliran angin. Nilai torsi statis didapatkan melalui pengukuran menggunakan *torque meter*. Data torsi statis diambil untuk posisi sudut sudu turbin ( $\theta$ )  $0^\circ$  hingga  $180^\circ$  dengan kenaikan setiap  $10^\circ$ .

Dari grafik pada Gambar 8, dapat diamati bahwa nilai  $CT_{s0max}$  maksimum ( $CT_{s0max}$ ) berada pada  $\theta = 30^\circ$  untuk seluruh variasi kecepatan angin. Sedangkan, nilai  $CT_{s0min}$  minimum ( $CT_{s0min}$ ) berada pada  $\theta = 130^\circ$  untuk seluruh variasi kecepatan angin kecuali kecepatan 4 m/s yang berada pada  $\theta = 140^\circ$ . Pada Gambar 8, diketahui bahwa pada kecepatan 4 m/s nilai  $CT_{s0max}$  sebesar 0,112 dan nilai  $CT_{s0min}$  sebesar -0,026; pada kecepatan 5 m/s nilai  $CT_{s0max}$  sebesar 0,110 dan nilai  $CT_{s0min}$  sebesar -0,046; pada kecepatan 6 m/s nilai  $CT_{s0max}$  sebesar 0,092 dan nilai  $CT_{s0min}$  sebesar -0,041; pada kecepatan 7 m/s nilai  $CT_{s0max}$  sebesar 0,088 dan nilai  $CT_{s0min}$  sebesar -0,026; pada kecepatan 8 m/s nilai  $CT_{s0max}$  sebesar 0,071 dan nilai  $CT_{s0min}$  sebesar -0,025; pada kecepatan 9 m/s nilai  $CT_{s0max}$  sebesar 0,092 dan nilai  $CT_{s0min}$  sebesar -0,021; serta pada kecepatan 10 m/s nilai  $CT_{s0max}$  sebesar 0,079 dan nilai  $CT_{s0min}$  sebesar -0,016. Nilai  $CT_{s0}$  yang bernilai negatif pada sudut  $100^\circ$  hingga  $150^\circ$  menunjukkan bahwa pada rentang sudut tersebut torsi statis turbin bernilai negatif. Nilai torsi statis yang negatif menunjukkan turbin angin Savonius tidak mampu melakukan *self-starting* pada rentang sudut tersebut dan membutuhkan gaya dari luar agar dapat berputar. Di sisi lain nilai  $CT_{s0}$  positif mengindikasikan kemampuan *self-starting* turbin yang baik. Berdasarkan grafik pada Gambar 8 turbin angin Savonius memiliki kemampuan *self-starting* paling baik pada sudut  $30^\circ$  untuk seluruh variasi kecepatan angin. Selain itu juga dapat diamati bahwa nilai  $CT_{s0min}$  paling kecil terjadi pada variasi kecepatan angin 5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan *self-starting*

turbin paling buruk terjadi pada variasi kecepatan angin 5 m/s.

Pada Gambar 9, diketahui bahwa pada kecepatan 4 m/s nilai  $CT_{smax}$  sebesar 0,087 dan nilai  $CT_{smin}$  sebesar -0,029; pada kecepatan 5 m/s nilai  $CT_{smax}$  sebesar 0,060 dan nilai  $CT_{smin}$  sebesar -0,026; pada kecepatan 6 m/s nilai  $CT_{smax}$  sebesar 0,103 dan nilai  $CT_{smin}$  sebesar -0,027; pada kecepatan 7 m/s nilai  $CT_{smax}$  sebesar 0,095 dan nilai  $CT_{smin}$  sebesar -0,031; pada kecepatan 8 m/s nilai  $CT_{smax}$  sebesar 0,083 dan nilai  $CT_{smin}$  sebesar -0,025; pada kecepatan 9 m/s nilai  $CT_{smax}$  sebesar 0,092 dan nilai  $CT_{smin}$  sebesar -0,022; serta pada kecepatan 10 m/s nilai  $CT_{smax}$  sebesar 0,080 dan nilai  $CT_{smin}$  sebesar -0,020. Berdasarkan Gambar 8 dan 9, dapat diamati bahwa penempatan dinding pada jarak  $G/D = 1,0018$  efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin pada kecepatan 5 dan 6 m/s yang ditunjukkan oleh peningkatan Koefisien Torsi Statis minimum ( $CT_{smin}$ ) pada kecepatan tersebut

## IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada hasil penelitian mengenai pengaruh penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak  $G/D = 1,0018$  dengan variasi kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s terhadap performa turbin, didapatkan beberapa kesimpulan.

Penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak  $G/D = 1,0018$  tidak efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin pada semua kecepatan.

Penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak  $G/D = 1,0018$  tidak efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* turbin pada semua kecepatan.

Penempatan model dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak  $G/D = 1,0018$  efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin pada kecepatan 5 dan 6 m/s yang ditunjukkan oleh peningkatan Koefisien Torsi Statis minimum ( $CT_{smin}$ ).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS RI, *Hasil Sensus Penduduk 2020*. Jakarta: Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, 2021.
- [2] BPPT RI, *Outlook Energi Indonesia 2021*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2021.
- [3] Dewan Energi Nasional (DEN), *Indonesia Energy Outlook 2019*. Jakarta: Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019.
- [4] 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, 2012, doi: 10.1016/j.aej.2012.07.003.
- [5] M. Casini, "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56-65, 2016.
- [6] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *energies*, vol. 13, no. 10, 2020.
- [7] F. A. Kurniawan and T. Y. Yuwono, "Studi eksperimen kinerja turbin angin savonius yang terintegrasi dengan posisi sudu advancing dekat dinding pada jarak  $G/D = 1,214$ ," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 2, pp. B183-B190, 2021.
- [8] T. Yuwono, G. Sakti, F. N. Aulia, and A. C. Wijaya, "Improving the performance of Savonius wind turbine by installation of a circular cylinder upstream of returning turbine blade: Improving the Performance of Savonius Wind Turbine," *Alexandria Eng. J.*, vol. 59, no. 6, pp. 4923-4932, 2020.