

Studi Eksperimen Efek Penempatan Dinding di Samping Sudu *Advancing* terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius pada Jarak $G/D=1,1$

Audha Fitrah Aulina dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

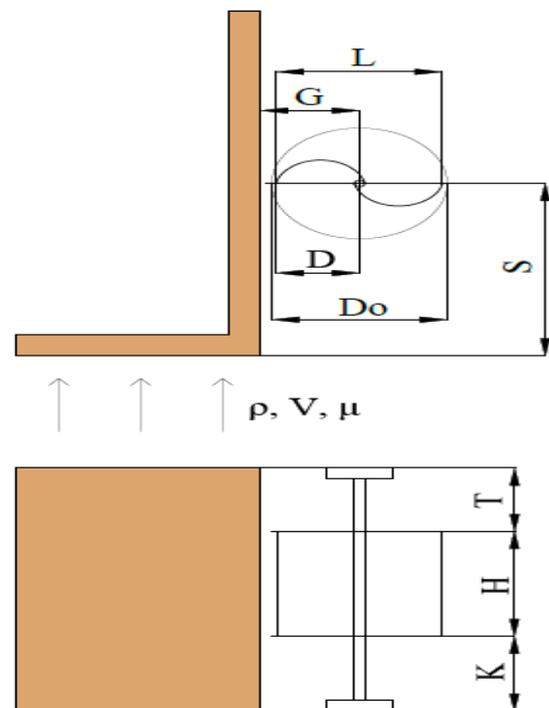
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Pola konsumsi energi dunia maupun Indonesia saat ini masih didominasi oleh energi fosil. Hal tersebut kontradiktif dengan berkurangnya produksi energi fosil terutama minyak bumi. Maka dengan memasang 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 meletakkan kayu multiplek yang berfungsi sebagai pemodelan dinding bangunan di samping *advancing blade* turbin angin Savonius. Dinding tersebut diletakkan pada perbandingan jarak antara dinding dengan poros turbin angin Savonius terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (G/D) sebesar 1,1 dan pada variasi kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Hasil yang didapatkan berupa adanya penempatan dinding di samping *advancing blade* pada $G/D=1,1$ saat kecepatan angin 4 m/s atau dalam bilangan Reynolds sebesar 77000 yang merupakan kecepatan optimum pada penelitian ini, dengan nilai *coefficient power* (CoP) yaitu sebesar 0,0843 pada $\lambda = 0,708$ dan mengalami kenaikan sebesar 86,91% serta nilai *coefficient of moment* (C_M) yaitu sebesar 0,2485 pada $\lambda = 0$ dengan kenaikan sebesar 132,24%, Nilai *coefficient of static torque* minimum mengalami kenaikan pada seluruh variasi kecepatan. Sehingga meningkatkan kemampuan *self starting*. Namun, masih terdapat torsi yang bernilai negatif sehingga membuat turbin angin Savonius belum mampu melakukan *self starting* pada semua posisi angular sudu.

Kata Kunci—Coefficient of Moment, Coefficient of Power, Coefficient of Static Torque, Tip Speed Ratio dan Turbin Angin Savonius.

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN akan energi semakin meningkat selama beberapa tahun ini. Total kebutuhan energi final meningkat dari 843 juta SBM pada tahun 2017 menjadi 3.438 juta SBM pada tahun 2050 atau meningkat rata-rata sebesar 4,4% per tahun [1]. Adanya peningkatan penduduk di Indonesia sebesar 32,56 juta jiwa pada tahun 2020 apabila dibandingkan dengan hasil sensus penduduk pada tahun 2010 serta diikuti dengan peningkatan ekonomi, maka secara tidak langsung akan berdampak pada semakin bertambahnya jumlah gedung tinggi di Indonesia [2]. Di mana pada tahun 2020 Indonesia mempunyai 105 gedung dengan tinggi lebih dari 150 meter dan berada pada posisi kesembilan sebagai negara pemilik gedung pencakar langit terbanyak di dunia. Adanya peningkatan pada dua hal tersebut membuat adanya peningkatan pada konsumsi energi di Indonesia. Namun, pola konsumsi energi dunia maupun Indonesia saat ini masih didominasi oleh energi fosil dan hal tersebut kontradiktif dengan berkurangnya produksi minyak bumi yang menunjukkan penurunan selama 10 tahun terakhir, yaitu dari 346 juta barel pada tahun 2009 menjadi sekitar 283 juta barel pada tahun 2018. Sehingga mendorong pemerintah Indonesia unruk meningkatkan peran energi baru terbarukan (EBT). Di



Gambar 1. Parameter penelitian.

Keterangan:

ρ : Massa jenis udara (kg/m^3)

μ : Viskositas udara (Ns/m^2)

V : Kecepatan aliran udara (m/s)

G : Jarak antara dinding terhadap poros turbin angin Savonius (m)

S : Jarak antara depan dinding terhadap poros turbin angin Savonius (m)

L : Diameter turbin angin Savonius (m)

D : Diameter sudu turbin angin Savonius (m)

D_o : Diameter *endplate* (m)

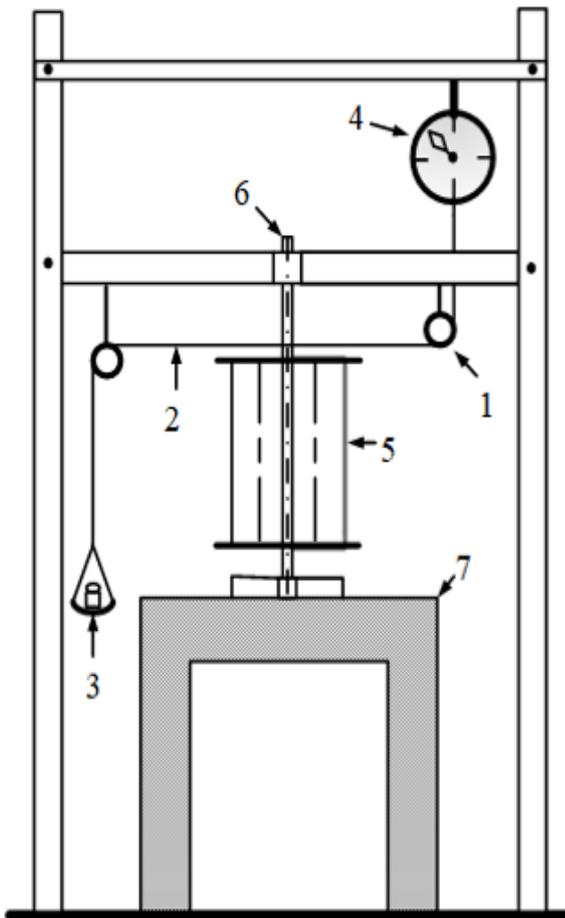
T : Jarak antara atas dinding terhadap *endplate* atas (m)

H : Tinggi turbin angin Savonius (m)

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

mana salah satu sumber energi baru terbarukan tersebut adalah energi angin dengan potensi sebesar 60,6 GW dengan rata-rata kecepatan angin di Indonesia sekitar 4-6 m/s [1], [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.

Penelitian mengenai analisis peningkatan kinerja rotor turbin angin Savonius berdasarkan geometrinya dengan parameter yang digunakan berupa jumlah sudu turbin, yaitu dua sudu (2b), tiga sudu (3b), dan empat sudu (4b); jumlah *stages* turbin, yaitu satu *stage* dan dua *stage*; *overlap ratio* (β) sebesar 0, 0,2, 0,25, 0,3, dan 0,35; *aspect ratio* (α) sebesar 0,5, 1, 2, 4 dan 5; serta dengan ada atau tanpa penggunaan



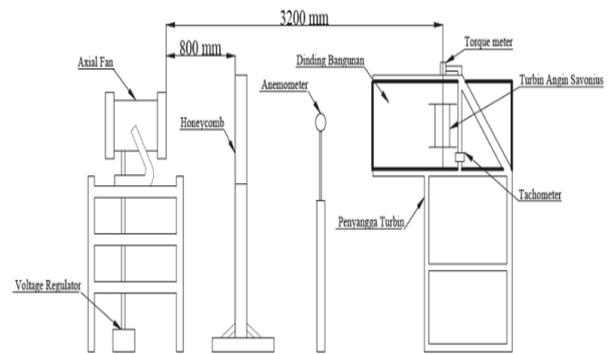
Gambar 2. Skema *brake dynamometer*.

Keterangan:

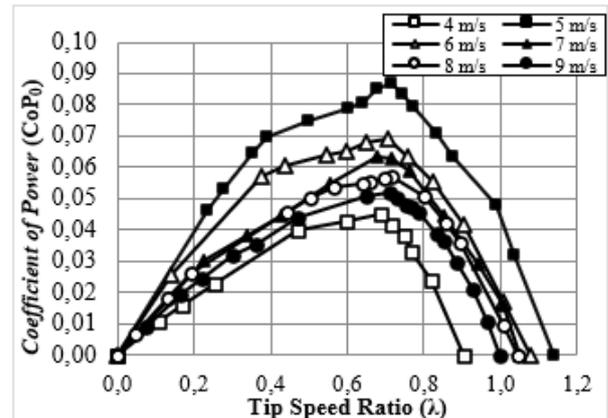
1. Sistem *pulley*
2. Benang *nylon*
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

endplate pada turbin angin Savonius [4]. Kemudian dapat disimpulkan bahwa pada turbin angin Savonius dengan kondisi menggunakan dua sudu, dua *stages*, nilai *overlap ratio* sebesar 0, nilai *aspect ratio* sebesar 5, serta adanya *endplate* mampu meningkatkan kinerja dari turbin angin Savonius.

Penelitian mengenai teknologi *Building Augmented Wind Turbine* (BAWT) dengan menggunakan turbin angin tipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT), mengilustrasikan kemungkinan turbin angin untuk dipasang pada gedung, dan membandingkan keuntungan yang didapatkan terhadap sistem *photovoltaic* [5]. Berbagai jenis *Building Augmented Wind Turbine* (BAWT) juga disebutkan pada penelitian ini. Serta didapatkan pula bahwa turbin angin Darrieus dan turbin angin Savonius memiliki produktivitas yang lebih baik daripada menggunakan sistem *photovoltaic*. Penggunaan turbin angin Savonius juga dapat dijadikan sebagai solusi apabila area pemasangan yang terbatas. Di mana turbin angin Savonius membutuhkan jarak pemasangan antar turbin yang lebih rendah daripada turbin angin Darrieus sehingga memungkinkan daya yang dihasilkan lebih tinggi.



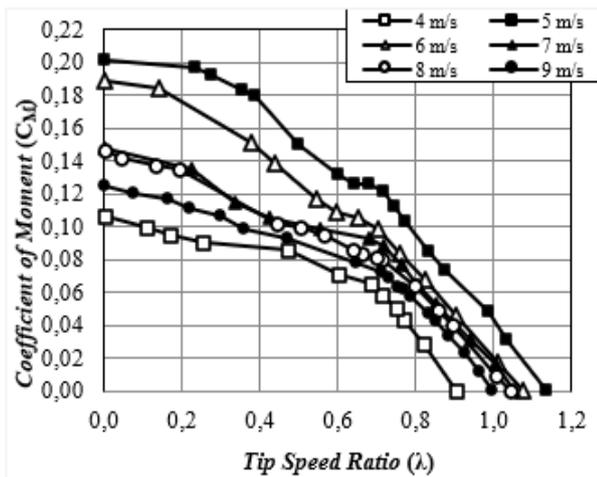
Gambar 3. Skema dan instalasi peralatan.



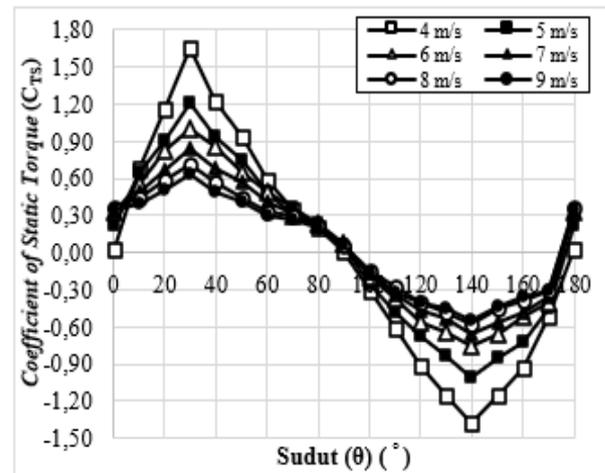
Gambar 4. Grafik *coefficient of power* (CoP_0) turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ).

Penelitian mengenai teknologi *Building Integrated Wind Turbine* (BIWT) yang berbeda pada umumnya dan dengan sistem yang dikembangkan berupa penggabungan antara bilah pengarah (*guide vane*) yang berfungsi untuk mengumpulkan angin yang masuk serta mampu meningkatkan kecepatan angin yang masuk tersebut dengan sebuah rotor yang disesuaikan dengan peletakkannya yaitu pada kulit bangunan [6]. Hasil dari penelitian tersebut adalah adanya *guide vane* tipe 2 mampu menambah kecepatan angin lebih dari 300% serta mampu memusatkan aliran angin secara efektif. Kemudian dipilih rotor tipe F dengan 8 sudu mampu menghasilkan daya maksimum ketika nilai *tip speed ratio* sekitar 0,55. Daya yang dihasilkan dari rotor tersebut meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin. Nilai *coefficient of power* pada rotor dengan rata-rata nilai yang dihasilkan sebesar 0,381. Serta dengan dipilihnya bangunan tempat tinggal. Haeundae, Busan, Korea Selatan, diperkirakan sistem yang diusulkan menghasilkan 241 kWh per hari atau sekitar 6,3% dari listrik yang dikonsumsi harian pada gedung yang ditargetkan.

Penelitian mengenai *Building Integrated Wind Turbine* (BIWT) yang dipasang di sudut tepi gedung betingkat dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang digunakan untuk menyelidiki kinerja turbin serta aliran angin yang terjadi di antara turbin dan gedung dengan menggunakan parameter utama yaitu celah turbin, jarak antar turbin yang berdekatan dan sudut angin [7]. Pada penelitian tersebut didapatkan bahwa daya turbin menurun seiring dengan bertambahnya celah turbin dengan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 0,7390 pada $l=0.75D$ dan *tip speed ratio*=1.2 serta 234,4% lebih tinggi dibandingkan turbin angin Savonius yang beroperasi



Gambar 5. Grafik *coefficient of moment* (C_{M0}) turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ).



Gambar 6. Grafik *coefficient of static torque* turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding (C_{TS0}) terhadap fungsi sudut sudu turbin angin Savonius.

pada *uniform flow*. Dengan kondisi pemasangan *single turbine* dan *multi turbines* menunjukkan bahwa nilai *Coefficient of Power* maksimum untuk *multi turbines* sebesar 0,4319 dan 29,2% lebih rendah daripada *single turbine*. Namun, masih lebih tinggi turbin yang beroperasi pada *uniform flow*. Serta sudut angin memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Nilai rata-rata *Coefficient of Power* pada turbin dengan sudut di bawah 360° adalah sebesar 0,4256, di mana nilai tersebut 92,5% lebih tinggi daripada turbin yang beroperasi pada *uniform flow*.

Penelitian mengenai pemasangan turbin angin Savonius di atas atap bangunan bertujuan untuk melihat pengaruh peletakkan turbin angin Savonius pada atap bangunan terhadap lingkungan sekitarnya serta dapat meramalkan produksi energi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius [8]. Setelah dilakukan simulasi angin disekitar gedung, maka dipilih lah kasus 0° dan 180° serta terdapat pula kasus referensi (*reference-case*) yaitu simulasi percobaan dengan saluran masuk yang *uniform* yang digunakan sebagai pembandingan pada kedua kasus dan merupakan kondisi yang paling optimal dengan nilai efisiensi yang paling maksimum yaitu pada *tip speed ratio* = 0,81. Sehingga dari penelitian ini menunjukkan adanya peningkatan penghasilan energi pada turbin angin Savonius yaitu sebesar 10,23% berdasarkan *reference-case*. Sedangkan apabila tidak ada simulasi angin yang dilakukan, energi yang diproduksi oleh turbin angin Savonius lebih rendah 11,53% berdasarkan *reference case* dengan kecepatan *inlet* yang diperkirakan pada sampel permukaan atau lebih rendah 19,74% berdasarkan pada simulasi turbin angin.

Dari berbagai penelitian tersebut didapatkan bahwa dengan adanya pemasangan turbin angin Savonius pada gedung sangat menguntungkan apabila diterapkan pada suatu daerah atau negara yang memiliki kecepatan angin yang relatif rendah seperti Indonesia. Maka, pada penelitian ini dilakukan dengan menempatkan kayu multiplek sebagai pemodelan sebuah dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius dengan perbandingan jarak dinding ke poros turbin terhadap diameter sudu turbin (G/D) sebesar 1,1 dan variasi kecepatan sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s yang bertujuan untuk mengetahui kecepatan angin yang optimum sehingga didapat kinerja dari turbin angin Savonius yang optimum pula.

II. METODE PENELITIAN

Parameter yang digunakan pada penelitian ini antara lain jarak antara dinding terhadap poros turbin angin Savonius (G), kecepatan angin (V), massa jenis fluida (ρ), viskositas fluida (μ), tinggi turbin angin Savonius (H), jarak antara tepi atas dinding terhadap *endplate* (T), jarak antara *endplate* bawah terhadap plat dasar penyangga turbin (K), diameter sudu turbin angin Savonius (D_T), diameter *endplate* (D_o), diameter turbin angin Savonius (L) dan jarak antara depan dinding terhadap poros turbin angin Savonius (S). Pada Gambar 1 menunjukkan parameter pada penelitian ini.

A. Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1) Axial Fan dan Voltage Regulator

Axial fan berfungsi untuk menghasilkan kecepatan angin dengan tipe yang digunakan adalah CKE SPV-18. *Voltage regulator* digunakan sebagai pengatur kecepatan aliran dengan mengatur besar tegangan *output* serta tipe yang digunakan adalah Model TDGC23KVA.

2) Turbin Angin Savonius

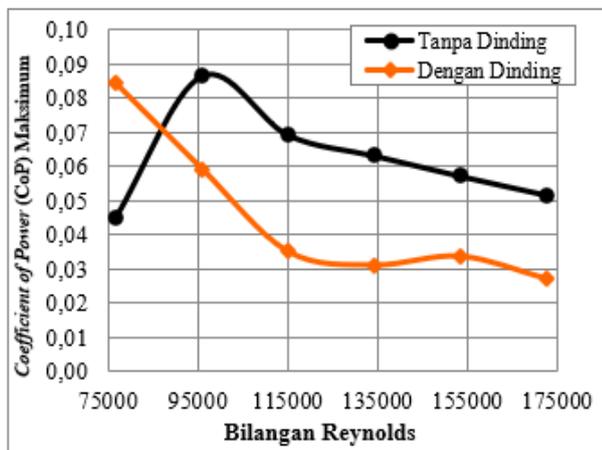
Spesifikasi dari turbin angin Savonius yang digunakan antara lain:

- a. Diameter sudu turbin (D): 165,2 mm
- b. Tinggi turbin (H) : 303,4 mm
- c. Diameter turbin (L) : 303,4 mm
- d. Diameter poros (b) : 19 mm
- e. Diameter *endplate* (D_o) : 321 mm
- f. Tebal *endplate* : 1 mm
- g. Tebal sudu turbin (x) : 4 mm
- h. Material sudu turbin : Pipa PVC
- i. Material *Endplate* : Aluminium Cladding 2024

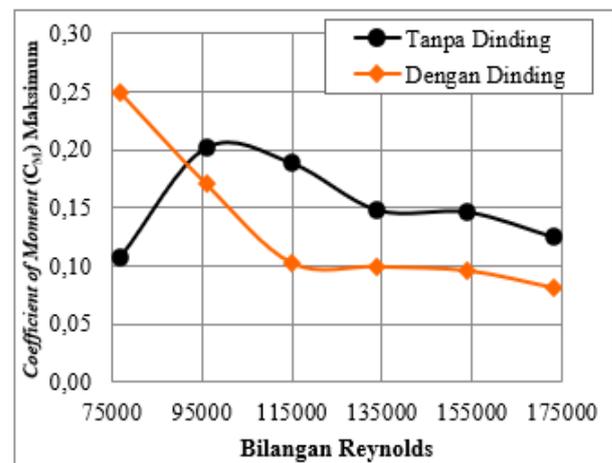
3) Dinding Bangunan

Spesifikasi dinding bangunan yang digunakan adalah:

- a. Panjang : 1550 mm
- b. Lebar : 450 mm
- c. Tinggi : 705 mm
- d. Tebal : 12 mm
- e. Material : Kayu multiplek (*multiply wood*)



Gambar 7. Grafik *coefficient of power* maksimum (CoP_{max}) turbin angin Savonius tanpa dan dengan dinding sebagai fungsi dari bilangan Reynolds pada $G/D=1,1$.



Gambar 8. Grafik *coefficient of moment* maksimum ($C_{M,max}$) turbin angin Savonius tanpa dan dengan dinding sebagai fungsi dari bilangan Reynolds pada $G/D=1,1$.

4) *Honeycomb*

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

5) *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 *Double Row Angular Contact Ball Bearing* tipe SKF 3201 ATN9.

6) *Anemometer*

Anemometer berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran angin dengan tipe yang digunakan adalah OMEGA HHH92A *Digital Anemometer*.

7) *Tachometer*

Tachometer berfungsi untuk mengukur kecepatan putaran poros dan digunakan *tachometer* tipe *Economical Non-Contact Pocket Optional Tachometer* OMEGA HHT12.

8) *Torque meter*

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

9) *Brake Dynamometer*

Brake dynamometer berfungsi untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Untuk mendapatkan nilai torsi dinamis tersebut dapat dilakukan dengan menghitung nilai selisih antara massa pemberat dan nilai yang tertera pada neraca pegas kemudian dikalikan dengan jari-jari poros. Pada Gambar 2 menunjukkan skema *brake dynamometer* yang digunakan pada penelitian ini.

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 $G/D=1,1$. Kecepatan 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* yang pemasangan alat ukurnya ditunjukkan pada Gambar 2.

C. *Perhitungan Performa Turbin Angin Savonius*

Pada penelitian ini, turbin angin Savonius dioperasikan pada kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s atau dalam bilangan Reynolds sebesar $7,7 \times 10^4$ hingga $17,2 \times 10^4$. Bilangan Reynolds tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

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

ρ merupakan massa jenis udara dalam satuan kg/m^3 , V merupakan kecepatan angin yaitu sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s, μ merupakan viskositas dinamis udara dalam satuan $N.s/m^2$, 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, ω merupakan kecepatan tangensial turbin angin Savonius dalam 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 (λ) 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:

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

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:

$$C_{TS} = \frac{T_s}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot V^2} \quad (8)$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Pemasangan Dinding

Analisis performa turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding dilakukan sebagai pembandingan terhadap performa yang dihasilkan serta efek yang ditimbulkan apabila terdapat penempatan dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius. Analisis yang dilakukan berupa:

1) Analisis Nilai Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Tanpa Pemasangan Dinding (CoP_0) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ)

Gambar 4 menunjukkan nilai *coefficient of power* tanpa pemasangan dinding (CoP_0) sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ) yang dilakukan pada seluruh variasi kecepatan. Dapat dilihat bahwa grafik tersebut memiliki *trendline* berbentuk parabola menghadap ke bawah.

Nilai *coefficient of power* meningkat hingga titik tertentu yang mengindikasikan nilai *coefficient of power* maksimum

kemudian menurun kembali. Nilai *coefficient of power* maksimum menunjukkan nilai *tip speed ratio* (λ) yang optimum yaitu sekitar 0,7. Maka, dengan meningkatnya nilai *tip speed ratio* (λ) akan meningkatkan nilai *coefficient of power* hingga mencapai nilai *coefficient of power* maksimum. Setelah itu nilai *coefficient of power* menurun seiring dengan bertambahnya nilai *tip speed ratio* (λ).

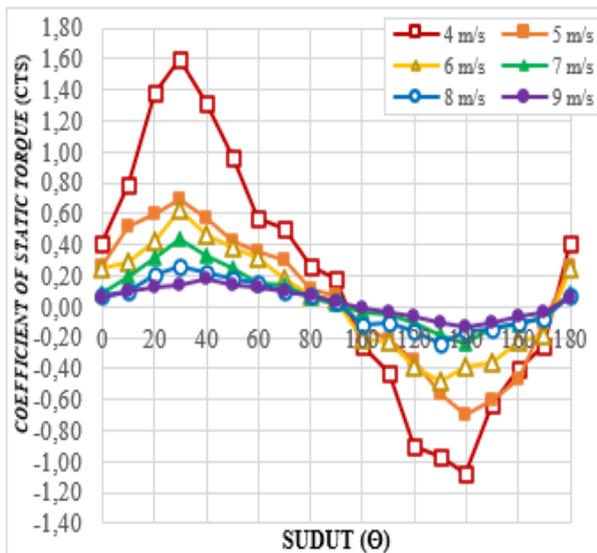
Nilai *tip speed ratio* (λ) pun bergantung pada besarnya pembebanan yang diberikan pada sistem *brake dynamometer*. Di mana saat tidak diberi pembebanan, maka nilai *tip speed ratio* (λ) menjadi maksimum. Kemudian semakin menurun seiring dengan bertambahnya jumlah pembebanan. Hal tersebut dikarenakan adanya pembebanan memberikan efek pengereman pada turbin angin Savonius, sehingga akan menyebabkan timbulnya kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin angin Savonius. Maka, nilai *coefficient of power* akan meningkat hingga titik tertentu yaitu titik maksimum pada *tip speed ratio* (λ) yang optimum kemudian akan mengalami penurunan seiring dengan menurunnya *tip speed ratio* (λ) dan bertambahnya beban yang semakin besar. Sehingga agar turbin angin Savonius mampu bekerja secara optimum, maka turbin angin Savonius diusahakan beroperasi pada saat rentang *coefficient of power* maksimum dan *tip speed ratio* optimum, yaitu pada rentang *tip speed ratio* sebesar 0,6–0,7 pada tiap kecepatan angin. Hal tersebut dikarenakan, saat rentang tersebut daya yang dihasilkan oleh turbin angin menjadi maksimum serta apabila terdapat penambahan pembebanan tidak membuat turbin angin Savonius berhenti.

Nilai *coefficient of power* juga dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin. Nilai *coefficient of power* mengalami peningkatan hingga kecepatan optimum yaitu pada kecepatan 5 m/s. Setelah melewati kecepatan 5 m/s, nilai *coefficient of power* mengalami penurunan. Hal tersebut dikarenakan terdapat kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin angin Savonius, serta dengan keadaan kecepatan angin yang terlalu tinggi akan mengakibatkan timbulnya efek *solid wall*.

2) Analisis Nilai Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Tanpa Pemasangan Dinding (C_{M_0}) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ)

Gambar 5 menunjukkan grafik *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding (C_{M_0}) sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ) dan dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Dapat dilihat bahwa grafik tersebut memiliki *trendline* yang menurun.

Apabila semakin besar nilai *tip speed ratio* (λ) maka nilai *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius mengalami penurunan. Nilai *coefficient of moment* maksimum didapatkan pada saat *tip speed ratio* (λ) bernilai 0. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pembebanan maksimum pada *brake dynamometer*. Sedangkan apabila nilai *coefficient of moment* minimum, maka *tip speed ratio* (λ) bernilai maksimum. Hal tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat pembebanan pada *brake dynamometer*. Nilai *coefficient of moment* juga dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin. Nilai *coefficient of moment* mengalami peningkatan hingga kecepatan optimum yaitu pada kecepatan 5 m/s. Kemudian setelah melewati kecepatan 5 m/s, nilai *coefficient of moment* mengalami penurunan. Hal tersebut dikarenakan adanya kerugian-kerugian mekanis serta terdapat efek *solid wall* yang terjadi apabila turbin angin Savonius berputar pada



Gambar 9. Grafik *coefficient of static torque* turbin angin Savonius dengan pemasangan dinding (C_{TS}) terhadap fungsi sudut sudu turbin angin Savonius.

kecepatan yang terlalu tinggi. Efek *solid wall* tersebut akan membuat angin tidak dapat melewati sudu turbin dengan sempurna. Dan apabila nilai kecepatan angin terlalu rendah, maka akan menyebabkan kecepatan putaran turbin angin Savonius juga rendah. Sehingga dengan adanya dua keadaan tersebut akan mengakibatkan nilai *coefficient of moment* menjadi kurang maksimal. Serta kemampuan turbin angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer* menjadi kurang maksimal.

3) Analisis Nilai *Coefficient of Static Torque* Angin Savonius Tanpa Pemasangan Dinding ($C_{TS o}$) Terhadap Sudut Sudu Turbin Angin Savonius (θ)

Gambar 6 menunjukkan grafik nilai *coefficient of static torque* turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding ($C_{TS o}$) terhadap fungsi sudut sudu turbin angin Savonius (θ). Pengukuran torsi statis dilakukan pada sudut sudu turbin (θ) 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° . Pada grafik tersebut menunjukkan *trendline* yang berbentuk sinusoidal. Torsi statis maksimum berada pada sudut sudu turbin (θ) sebesar 30° dan torsi statis minimum berada pada sudut sudu turbin (θ) sebesar 140° pada setiap kecepatan angin.

Pada Gambar 6 menunjukkan bahwa terdapat torsi statis yang bernilai positif dan negatif. Torsi statis yang bernilai positif tersebut terjadi karena *advancing blade* turbin angin Savonius yang mendekati arah datangnya angin sehingga *advancing blade* turbin angin Savonius semakin terkena aliran angin. Sedangkan torsi statis yang bernilai negatif tersebut terjadi karena *advancing blade* turbin angin Savonius yang menjauhi arah datangnya angin sehingga *returning blade* turbin angin Savonius semakin terkena aliran angin yang kemudian membuat gaya *drag* pada *returning blade* lebih besar daripada gaya *drag* yang terjadi pada *advancing blade*. Sehingga menyebabkan turbin angin berputar pada arah sebaliknya. Maka torsi statis bernilai negatif tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak mampu untuk melakukan *self starting* yang berarti bahwa agar turbin tersebut dapat berputar maka dibutuhkan torsi awal dengan memberikan gaya dari luar. Pada Gambar 6 tersebut didapat bahwa

semakin tinggi kecepatan aliran angin, maka area torsi negatif yang terbentuk semakin sempit. Sehingga hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius.

B. Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Pemasangan Dinding

Analisis performa turbin angin Savonius dengan dan tanpa adanya pemasangan dinding pada perbandingan jarak antara dinding ke poros turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (G/D) sebesar 1,1 bertujuan untuk mengetahui pengaruh adanya pemasangan dinding di samping *advancing blade* terhadap kinerja yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Adapun analisis yang dilakukan berupa:

1) Analisis Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius maksimum dengan dan tanpa Pemasangan Dinding (CoP_{max}) Terhadap Fungsi Bilangan Reynolds

Gambar 7 menunjukkan grafik *coefficient of power* maksimum (CoP_{max}) tanpa dan dengan pemasangan dinding sebagai fungsi bilangan Reynolds pada $G/D=1,1$.

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa grafik nilai *coefficient of power* maksimum tanpa pemasangan dinding ($CoP_{0 max}$) memiliki *trendline* yang naik hingga bilangan Reynolds sebesar 95940 kemudian mengalami penurunan. Sedangkan pada grafik nilai *coefficient of power* maksimum (CoP_{max}) dengan pemasangan dinding pada $G/D=1,1$ memiliki *trendline* yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya pemasangan dinding pada $G/D=1,1$, seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds maka aliran angin yang terdefleksi akibat pemasangan dinding semakin mengarah menuju *returning blade* turbin angin Savonius. Sehingga mengakibatkan peningkatan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* yang kemudian mengakibatkan meningkatnya torsi yang dihasilkan. Kemudian selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* menurun. Sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius mengalami penurunan. Sesuai dengan simulasi angin pada sekitar gedung pada $G/D=1,1$ diduga bahwa apabila semakin bertambahnya nilai bilangan Reynolds maka turbin angin Savonius tersebut semakin berada dalam *low velocity region* [7]. Sehingga nilai *coefficient of power* relatif konstan yang menunjukkan bahwa nilai bilangan Reynolds sudah tidak memengaruhi nilai *coefficient of power*. Di mana dengan adanya pemasangan dinding $G/D=1,1$ dan pada bilangan Reynolds 77000 memiliki nilai *coefficient of power* maksimum (CoP_{max}) yang lebih tinggi daripada pada bilangan Reynolds yang lain. Nilai *coefficient of power* (CoP) tertinggi yaitu sebesar 0,0843 pada $\lambda = 0,708$ serta mengalami kenaikan sebesar 1,86 kali atau 86,91% apabila dibandingkan tanpa adanya pemasangan dinding.

2) Analisis Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius maksimum dengan dan tanpa Pemasangan Dinding ($C_{M max}$) Terhadap Fungsi Bilangan Reynolds

Gambar 8 menunjukkan grafik *coefficient of moment* maksimum ($C_{M max}$) tanpa dan dengan pemasangan dinding sebagai fungsi bilangan Reynolds pada $G/D=1,1$.

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa grafik nilai *coefficient of moment* maksimum tanpa pemasangan dinding ($C_{M0 max}$) memiliki *trendline* yang naik hingga bilangan Reynolds sebesar 95940 kemudian mengalami penurunan. Sedangkan

pada grafik nilai *coefficient of moment* maksimum ($C_{M \max}$) dengan pemasangan dinding pada $G/D=1,1$ memiliki *trendline* yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya pemasangan dinding pada $G/D=1,1$, seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds maka aliran angin yang terdefleksi akibat pemasangan dinding semakin mengarah menuju *returning blade* turbin angin Savonius. Sehingga mengakibatkan peningkatan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* yang kemudian mengakibatkan meningkatnya torsi yang dihasilkan. Kemudian selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* menurun. Sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius mengalami penurunan. Serta kemampuan turbin angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer* semakin menurun.

Sesuai dengan simulasi angin pada sekitar gedung pada $G/D=1,1$ diduga bahwa apabila semakin bertambahnya nilai bilangan Reynolds maka turbin angin Savonius tersebut semakin berada dalam *low velocity region* [7]. Sehingga nilai *coefficient of moment* relatif konstan yang menunjukkan bahwa nilai bilangan Reynolds sudah tidak memengaruhi nilai *coefficient of moment*. Di mana dengan adanya pemasangan dinding $G/D=1,1$ dan pada bilangan Reynolds 77000 memiliki nilai *coefficient of moment* maksimum ($C_{M \max}$) yang lebih tinggi daripada pada bilangan Reynolds yang lain. Nilai *coefficient of moment* (C_M) tertinggi yaitu sebesar 0,2485 serta mengalami kenaikan sebesar 2,23 kali atau 132,24% apabila dibandingkan tanpa adanya pemasangan dinding.

3) Analisis Nilai Coefficient of Static Torque Turbin Angin Savonius dengan Pemasangan Dinding (C_{TS}) Terhadap Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius (θ)

Gambar 9 menunjukkan grafik nilai *coefficient of static torque* turbin angin Savonius dengan pemasangan dinding (C_{TS}) terhadap fungsi sudut sudu turbin angin Savonius (θ). Pengukuran torsi statis dilakukan pada sudut sudu turbin (θ) 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° . Pada grafik tersebut menunjukkan *trendline* yang berbentuk sinusoidal.

Pada Gambar 9 apabila dibandingkan dengan grafik tanpa pemasangan dinding, terdapat penurunan pada nilai C_{TS} positif serta nilai C_{TS} yang bernilai negatif mengalami peningkatan pada seluruh variasi kecepatan. Adanya peningkatan tersebut mengindikasikan dengan adanya penempatan dinding pada $G/D=1,1$ mampu memperbaiki kemampuan *self starting* turbin angin Savonius. Namun, dapat dilihat pada Gambar 9 pula masih terdapat torsi yang bernilai negatif. Hal tersebut mengindikasikan bahwa turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak mampu untuk melakukan *self starting* yang berarti agar turbin tersebut

dapat berputar maka dibutuhkan torsi awal dengan memberikan gaya dari luar.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka didapatkan berupa kesimpulan mengenai pengaruh peletakkan dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada perbandingan $G/D=1,1$ dan pada variasi kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s adalah sebagai berikut: (1) Pada peletakkan dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius dengan $G/D=1,1$ dan pada kecepatan 4 m/s atau dalam bilangan Reynolds sebesar 77000, didapat nilai *coefficient of power* (CoP) dan *coefficient of moment* (C_M) tertinggi apabila dibandingkan pada variasi kecepatan lainnya. Serta mampu memperbaiki kinerja turbin angin Savonius; (2) Nilai *coefficient of power* (CoP) tertinggi yaitu sebesar 0,0843 pada $\lambda = 0,708$ dengan kenaikan sebesar 86,91%, nilai *coefficient of moment* (C_M) tertinggi yaitu sebesar 0,2485 pada $\lambda = 0$ dengan kenaikan sebesar 132,24%, serta nilai *tip speed ratio* (λ) tertinggi yaitu sebesar 1,129 dengan penempatan dinding di samping *advancing blade* pada $G/D=1,1$ serta kecepatan angin 4 m/s atau dalam bilangan Reynolds sebesar 77000; (3) Pada peletakkan dinding di samping *advancing blade* turbin angin Savonius dengan $G/D=1,1$ serta pada seluruh variasi kecepatan, nilai *coefficient of static torque* negatif mengalami peningkatan. Sehingga mampu untuk meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sekretaris Dewan Energi Nasional, "Outlook Energi Indonesia." Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta, 2019.
- [2] B. P. Statistik, "Berita Resmi Statistik: Hasil Sensus Penduduk 2020." Badan Pusat Statistik, Jakarta, 2021.
- [3] D. E. Nasional, "Indonesia energy outlook 2019," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 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, pp. 19–25, 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] J. Park, H.-J. Jung, S.-W. Lee, and J. Park, "A new building-integrated wind turbine system utilizing the building," *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11846–11870, 2015.
- [7] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *J. Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2636, 2020.
- [8] R. Longo, P. Nicasastro, M. Natalini, P. Schito, R. Mereu, and A. Parente, "Impact of urban environment on Savonius wind turbine performance: A numerical perspective," *J. Renew. Energy*, vol. 156, pp. 407–422, 2020.