

Studi Eksperimental Pengaruh Penempatan Dinding Dekat Sudu Returning pada Jarak $G/D = 1,335$ terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius

Miftihatul Jannah dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

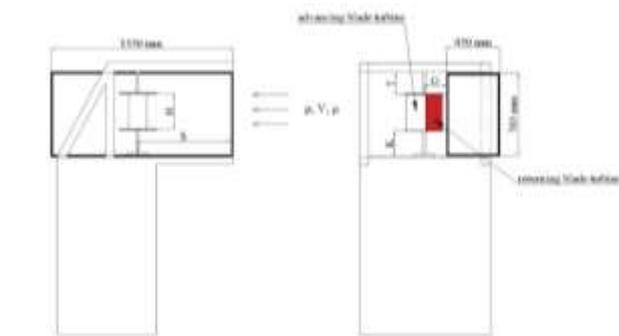
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Bertambahnya penduduk Indonesia tiap tahun mengakibatkan konsumsi energi yang semakin tinggi. Dengan sumber energi yang masih didominasi oleh energi fosil dimana terus mengalami penurunan produksi, maka diperlukan pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT). Turbin angin Savonius merupakan pilihan terbaik untuk memanfaatkan potensi energi angin menjadi energi listrik dengan menginstalasikannya didekat bangunan tinggi guna mendapatkan aliran bebas hambatan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan turbin angin Savonius dua sudu berdiameter (D) sebesar 165,2 mm. Adapun parameter penelitian yang digunakan adalah $G/D = 1,335$; $H/L = 1$; $S/D = 4,91$; $T/D = 1,16$; $K/D = 1,31$ dan kecepatan angin divariasikan sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 m/s. Eksperimen dilakukan dengan meletakkan model dinding bangunan didekat *returning blade* turbin angin Savonius. Hasil didapatkan bahwa performa optimum turbin tercapai pada kecepatan angin 9 m/s dengan nilai *Coefficient of Power* (C_p) maksimum sebesar 0,0361 pada $\lambda = 0,459$ dan nilai *Coefficient of Moment* (C_M) maksimum sebesar 0,0788 pada $\lambda = 0,459$. Selain itu, penempatan model dinding juga mampu meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius pada seluruh variasi kecepatan angin.

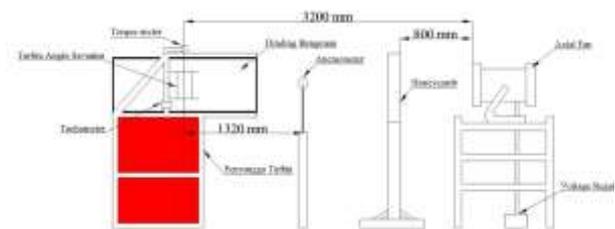
Kata Kunci—*Coefficient of Moment*, *Coefficient of Power*, *Coefficient of Static Torque*, Kecepatan Angin, Model Dinding Bangunan, Turbin Angin Savonius.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara dengan konsumsi energi yang cukup tinggi diakibatkan dari semakin bertambahnya jumlah penduduk tiap tahunnya. Hasil Sensus Penduduk tahun 2020 (SP2020) tercatat penduduk Indonesia sebanyak 270,2 juta jiwa, meningkat per Juni 2021 menjadi 272 juta jiwa [1-2]. Hal ini menyebabkan posisi ketahanan energi Indonesia semakin merosot dalam beberapa tahun terakhir karena tingginya kebutuhan akan energi tidak sebanding dengan laju ketersediaan energi. Konsumsi energi akhir Indonesia pada tahun 2019 mencapai 5,36 juta terajoule, mengalami kenaikan sekitar 9,0 % dibandingkan tahun sebelumnya dan pada tahun 2050 diproyeksikan permintaan energi final nasional mencapai 548,8 MTOE dan akan terus meningkat dengan rata-rata pertumbuhan per tahun sebesar 5% [3-4]. Dalam pemenuhan kebutuhan energi, Indonesia masih bergantung pada sumber energi fosil yang cadangannya semakin lama akan semakin menipis. Pada tahun 2019 total cadangan minyak bumi nasional hanya tersisa 2,5 miliar standar barel tangki (BSTB), menurun 21% dari tahun sebelumnya, total cadangan gas bumi tersisa 50 triliun standar kaki kubik (TCF), menurun 1,9 % dari tahun sebelumnya, dan total cadangan batu bara tersisa 25,1 BTOE



Gambar 1. Skema dan parameter penelitian.

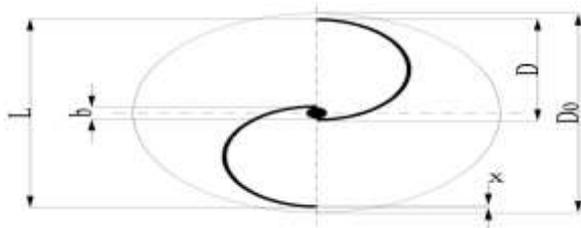


Gambar 2. Skema instalasi peralatan.

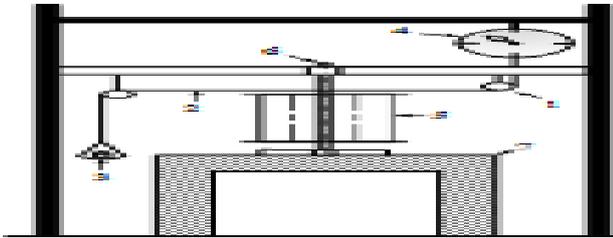
[5]. Untuk itu perlu adanya pengembangan terhadap Sumber Energi Baru Terbarukan (EBT).

Terdapat banyak macam sumber untuk EBT diantaranya seperti, tenaga air, panas bumi, bioenergi, surya, angin, maupun energi laut. Sumber energi yang didapat dari angin memiliki potensi yang cukup besar untuk digunakan yakni mencapai 60.647 MW namun kapasitas yang terpasang hingga saat ini hanya sebesar 154 MW [5]. Turbin angin merupakan suatu mekanisme yang memanfaatkan energi kinetik angin untuk dirubah menjadi energi listrik. Dengan kecepatan angin rata-rata di wilayah Indonesia berkisar antara 3-6 m/s [6]. Maka jenis turbin yang paling sesuai digunakan adalah turbin angin sumbu vertical/*Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Salah satu jenis VAWT adalah Turbin Angin Savonius.

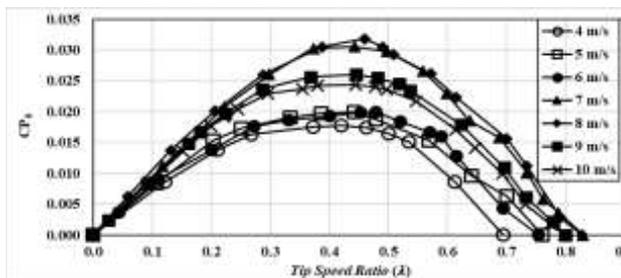
Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya guna meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius. Penelitian yang pernah dilakukan untuk meningkatkan kinerja dari rotor turbin angin Savonius menggunakan beberapa parameter seperti jumlah sudu turbin, yaitu dua sudu, tiga sudu, atau empat sudu; jumlah *stages* turbin yaitu satu *stage* dan dua *stage*; *aspect ratio* (α) sebesar 0,5, 1, 2, 4 dan 5; *overlap ratio* (β) sebesar 0, 0,2, 0,25, 0,3, dan 0,35; serta dengan ada atau tidaknya *end plate* pada turbin angin Savonius, menunjukkan hasil bahwa performa optimum dicapai pada turbin dengan dua sudu, dua *stage*,



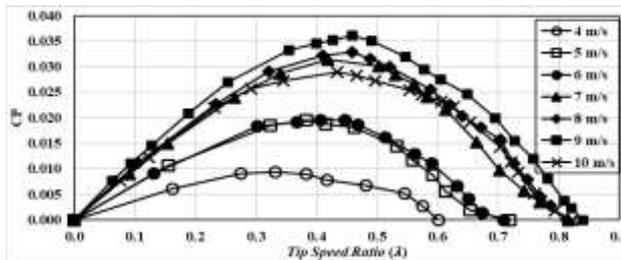
Gambar 3. Spesifikasi turbin angin Savonius.



Gambar 4. Skema instalasi brake dynamometer.



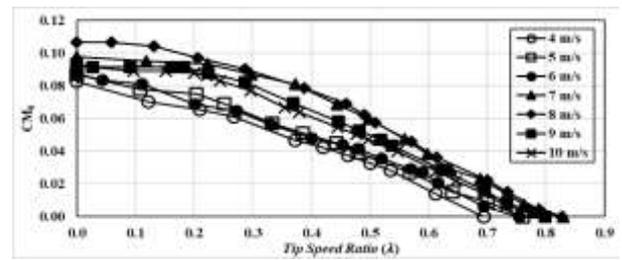
Gambar 5. Grafik nilai c_{p0} terhadap *tip speed ratio* turbin angin savonius tanpa dinding.



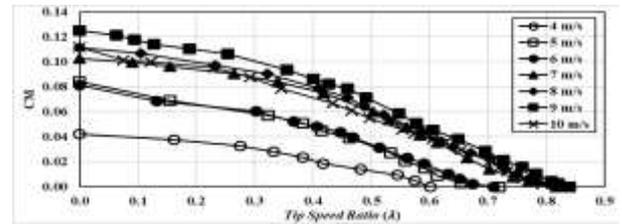
Gambar 6. Grafik nilai C_p terhadap *tip speed ratio* turbin angin savonius dengan dinding pada $g/d = 1,335$.

tanpa adanya *overlap ratio*, dan dengan penggunaan *endplate*. Selain itu, performa turbin Savonius meningkat seiring dengan peningkatan nilai *aspect ratio* [7].

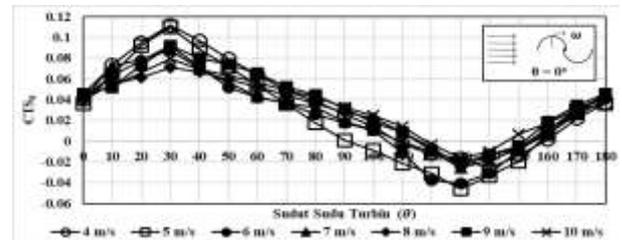
Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan analisa CFD dimana turbin angin Savonius dipasang pada tepi bangunan. Terdapat tiga parameter utama yang digunakan yaitu *turbine gap*, *wind angle*, dan *adjacent turbines*. Didapatkan hasil bahwa nilai *Coefficient of Power* (C_p) maksimum sebesar 0,7390 dicapai pada $l = 0,75 D$ dan *Tip speed ratio* (TSR) = 1,2, lebih tinggi 234,4% daripada turbin angin Savonius yang bekerja pada *uniform flow*. Penggunaan *adjacent turbine* memberikan CoP maksimum sebesar 0,4319 atau 29,2% lebih rendah dibandingkan dengan turbin tunggal pada $l = 1,00 D$ dan $\phi = 45^\circ$. Namun nilai C_p yang dihasilkan jauh lebih tinggi daripada turbin yang beroperasi pada *uniform flow*. *Wind angle* juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin. Nilai rata-rata C_p pada turbin dengan sudut dibawah 360° adalah sebesar 0.4256, lebih tinggi 92,5% dibandingkan dengan turbin yang beroperasi pada *uniform flow*. Sehingga dapat dibuktikan bahwa turbin angin Savonius memiliki performa yang lebih baik apabila dipasang pada bangunan



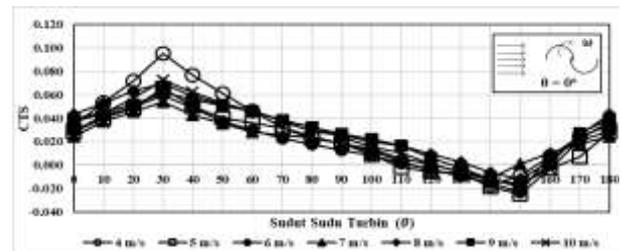
Gambar 7. Grafik nilai C_{M0} terhadap *tip speed ratio* turbin angin savonius tanpa dinding.



Gambar 8. Grafik nilai C_M terhadap *tip speed ratio* turbin angin savonius dengan dinding pada $g/d = 1,335$.



Gambar 9. Grafik nilai c_{ts0} terhadap sudut sudu (θ) turbin angin savonius tanpa dinding.



Gambar 10. Grafik nilai c_{ts} terhadap sudut sudu (θ) turbin angin savonius dengan dinding pada $g/d = 1,335$.

[8].

Sebuah penelitian juga dilakukan dengan menggunakan metode CFD sekaligus simulasi prototipe, memanfaatkan sistem *Building Integrated Wind Turbine* (BIWT) yang mengkombinasikan rotor dengan bilah pengarah (*guide vane*). Hasil akhir menunjukkan bahwa sistem BIWT yang diusulkan mampu meningkatkan kecepatan angin sehingga nilai C_p juga meningkat. Dengan digunakannya rotor tipe F8 yang memiliki 8 sudu mampu memberikan performa yang maksimal. Sistem ini juga diklaim sebagai sistem produksi energi yang ramah lingkungan untuk wilayah perkotaan [9].

Penelitian lain mengenai teknologi BIWT dilakukan untuk tujuan menganalisa beberapa tipe VAWT yang ada dipasaran. Beberapa konfigurasi pemasangan VAWT pada bangunan (BAWT) antara lain BAWT dipasang didekat bangunan seperti pada atap atau sisi bangunan, BAWT dipasang diantara bangunan, dan BAWT dipasang didalam saluran udara bangunan. Turbin angin Savonius dan turbin angin Darrieus memiliki tingkat produktivitas dan biaya energi yang dihasilkan lebih baik dibandingkan dengan penggunaan sistem *photovoltaic*. Penggunaan turbin angin Savonius juga

lebih menguntungkan untuk dipasang pada bangunan karena membutuhkan jarak minimum pemasangan yang lebih rendah daripada turbin angin Darrieus sehingga memungkinkan daya yang dihasilkan akan lebih tinggi [10].

Penelitian tentang kinerja turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan gedung juga dilakukan dengan menempatkan *advancing blade* turbin angin Savonius didekat dinding gedung pada rasio jarak G/D sebesar 1.335. Didapatkan hasil bahwa peningkatan nilai *Coefficient of Power* (CoP), *Coefficient of moment* (C_M) dan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) terjadi ketika kecepatan angin sebesar 4, 5, dan 6 m/s. Nilai CoP dan C_M tertinggi didapatkan berturut-turut sebesar 0,0897 saat $\lambda = 0,714$ dan 0,2163 saat $\lambda = 0$ pada kecepatan 5 m/s. Sedangkan nilai C_{TS} positif maksimum berada pada kecepatan 4 m/s yaitu sebesar 2,01 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} negatif tertinggi pada kecepatan 9 m/s sebesar -0,44 pada sudut 140° [11].

Penelitian dengan menempatkan *circular cylinder* didepan *returning blade* turbin angin Savonius secara eksperimental menghasilkan bahwa performa turbin angin mengalami peningkatan ketika posisi *circular cylinder* diletakkan pada jarak S/D = 1.4, 1.6 dan 1.8. Apabila jarak S/D > 1,8 menyebabkan adanya *circular cylinder* tidak lagi memberikan pengaruh dan performa turbin angin relatif sama seperti turbin angin Savonius konvensional [12].

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara bertahap dimulai dengan pengambilan data turbin angin Savonius tanpa dinding kemudian ditempatkan model dinding disamping sisi *returning blade* turbin. Skema dan parameter penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Dimana:

ρ : Massa jenis udara (kg/m^3)

μ : Viskositas udara (N.s/m^2)

V : Kecepatan aliran udara (m/s)

G : Jarak poros turbin ke dinding (m)

S : Jarak poros turbin ke ujung depan dinding (m)

H : Tinggi turbin (m)

T : Jarak *end plate* bagian atas ke ujung atas dinding (m)

K : Jarak *end plate* bagian bawah ke plat dasar penyangga turbin (m)

A. Skema Penelitian

Keseluruhan skema instalasi peralatan penelitian ditunjukkan pada Gambar 2 dengan menempatkan model dinding bangunan disamping sudu *returning* turbin Savonius pada jarak G/D = 1,335. Sebuah *axial fan* diletakkan didepan turbin Savonius sebagai penghasil sumber angin dengan pengaturan variasi kecepatan angin melalui *voltage regulator*. *Honeycomb* yang diletakkan didepan *axial fan* akan menyeragamkan aliran angin untuk mengenai turbin Savonius. Pengukuran kecepatan angin dilakukan pada jarak 8D dari poros turbin menggunakan anemometer. *Tachometer* diletakkan didekat poros turbin Savonius untuk mengukur kecepatan putar turbin sedangkan *torquemeter* diletakkan pada poros bagian atas turbin Savonius guna mencekam putaran turbin dan mengukur nilai torsi statis (Gambar 2).

B. Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini ada turbin

angin Savonius dan model dinding bangunan dengan spesifikasi sebagai berikut:

1) Spesifikasi Turbin Angin Savonius

Terdapat beberapa spesifikasi turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini seperti terlihat pada Gambar 3. Keterangan Gambar 3:

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

2) Spesifikasi Model Dinding Bangunan

Berikut adalah spesifikasi model dinding bangunan yang digunakan pada penelitian ini:

- Panjang : 1550 mm
- Lebar : 450 mm
- Tinggi : 705 mm
- Tebal : 12 mm
- Material dinding : Kayu multiplek

C. Alat Ukur

Alat ukur dalam penelitian ini meliputi:

1) Anemometer

Untuk mengukur kecepatan angin yang dihasilkan oleh *axial fan* maka digunakan alat ukur *anemometer*. Pada penelitian ini digunakan *anemometer* merek OMEGA model HHF141A dengan ketelitian baca $\pm 1,0\%$.

2) Torquemeter

Torquemeter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari poros turbin. *Torquemeter* yang digunakan adalah merek LUTRON tipe TQ-8800 dengan unit satuan pembacaan adalah kg-cm, lb-inch dan N-cm.

3) Tachometer

Kecepatan putar poros turbin Savonius pada penelitian ini diukur menggunakan *tachometer* merek OMEGA seri HHT12. *Tachometer* yang digunakan memiliki ketelitian pembacaan 0,01% atau ± 1 digit.

4) Brake Dynamometer

Untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilkan oleh putaran turbin digunakan mekanisme *brake dynamometer*. Nilai torsi dinamis didapatkan dengan menghitung selisih antara massa pemberat dengan nilai yang terbaca pada neraca pegas. Skema sistem *brake dynamometer* ditunjukkan pada Gambar 4. Keterangan Gambar 4, dimana:

- : Pulley
- : Benang nilon
- : Anak timbangan
- : Neraca pegas
- : Turbin angin savonius
- : Poros turbin angin savonius
- : Penyangga turbin angin savonius

Pada penelitian ini digunakan neraca pegas model NAGATA tipe C-5 dan anak timbangan merek NKH tipe M-1 sebagai beban pemberat.

D. Perhitungan Data

Penelitian ini dilakukan dengan memberikan variasi kecepatan angin (V) sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 m/s. Untuk dapat mengetahui nilai bilangan Reynolds (R_e) maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

dimana ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3), V adalah kecepatan angin (m/s), μ adalah viskositas udara (N.s/m^2). L adalah panjang karakteristik turbin (m) yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$L = 2D - b - 2x \quad (2)$$

dimana D adalah diameter sudu turbin (m), b adalah diameter poros turbin dan x adalah ketebalan sudu turbin (m).

Nilai Tip Speed Ratio (λ) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (3)$$

dimana R adalah jari-jari turbin (m), ω adalah kecepatan sudut turbin (rad/s) yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} \quad (4)$$

dengan n adalah jumlah putaran poros turbin per menit (rpm) yang didapatkan dari pengukuran dengan *tachometer*.

Coefficient of Power (C_p) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_p = \frac{|m - s| \cdot g \cdot r \cdot \pi \cdot n}{15 \rho A U^3} \quad (5)$$

dimana m adalah massa pemberat (kg) sedangkan s adalah massa yang terbaca pada neraca pegas (kg) pada pengukuran dengan sistem *brake dynamometer*, g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), r adalah jari-jari poros yang menerima beban (m), A adalah luas penampang turbin yang dikenai aliran angin yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

dimana H adalah tinggi turbin Savonius (m).

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

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

dimana T_D adalah torsi dinamis yang dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$T_D = |m - s| \cdot g \cdot r \quad (8)$$

Coefficient of Static Torque (C_{TS}) didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

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

dimana T_S adalah nilai torsi statis (N.m) yang didapatkan dari pengukuran dengan *torquemeter*.

Dari hasil perhitungan yang dilakukan akan didapatkan grafik *Coefficient of Power* (C_p) dan *Coefficient of moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), serta grafik *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) terhadap sudut sudu turbin Savonius (θ).

III. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Nilai Coefficient of Power (C_p)

Nilai *Coefficient of Power* didapatkan dengan membandingkan daya yang dihasilkan oleh turbin terhadap daya teoritis yang diberikan aliran angin ke turbin angin. Daya yang dihasilkan oleh turbin Savonius merupakan hasil perkalian antara torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin. Sistem *brake dynamometer* digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis, sedangkan untuk mendapatkan besar kecepatan sudut turbin dilakukan pengukuran kecepatan putaran turbin dengan *tachometer*.

Grafik *Coefficient of Power* turbin angin savonius tanpa pemasangan dinding (C_{p0}) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan grafik *Coefficient of Power* turbin angin savonius dengan pemasangan dinding (C_p) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) ditunjukkan pada Gambar 6. Dapat dilihat jika kedua grafik memiliki trendline yang sama yaitu parabolik. Hal ini disebabkan karena terdapat dua variabel tak tentu yang mempengaruhi nilai C_{p0} yaitu nilai torsi dinamis (T_D) dan kecepatan sudut turbin (ω).

Dapat dilihat pada Gambar 5 jika nilai C_{p0} maksimum (C_{p0max}) semakin meningkat dari kecepatan angin sebesar 4 m/s hingga kecepatan angin 8 m/s yang kemudian menurun dari kecepatan angin 9 m/s ke kecepatan angin 10 m/s berturut-turut. Nilai C_{p0max} tertinggi terjadi pada kecepatan angin 8 m/s sebesar 0,0318 dengan $\lambda = 0,459$. Apabila kecepatan angin yang mengenai turbin terlalu rendah maka akan mengakibatkan rendahnya nilai C_p yang dihasilkan.

Namun, apabila kecepatan angin yang mengenai turbin terlalu tinggi maka akan terjadi fenomena *solid wall* dimana turbin angin akan berputar sangat cepat yang menyebabkan sudu turbin angin seolah-olah seperti silinder pejal. Hal ini akan menghambat aliran angin untuk melewati sudu turbin dengan maksimal. Selain itu, dengan putaran turbin angin yang semakin cepat, maka akan terjadi kerugian mekanis yang semakin tinggi.

Sehingga kerugian-kerugian ini akan menyebabkan daya input yang diberikan oleh angin tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya oleh turbin angin Savonius (terjadi *losses*) dan menghasilkan performa turbin yang rendah (Gambar 6).

Disisi lain nilai C_p maksimum (C_{pmax}) turbin dengan dinding yang dapat dilihat pada Gambar 6 menunjukkan nilai paling rendah terjadi pada kecepatan angin 4 m/s kemudian meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin berturut-turut hingga mencapai kecepatan 9 m/s, setelah itu nilai C_p kembali turun pada kecepatan angin 10 m/s. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada kecepatan rendah, defleksi aliran angin yang menabrak sekitar pojok dinding cenderung mengenai sisi *returning blade* turbin Savonius dan semakin bertambahnya kecepatan angin akan mengakibatkan defleksi angin mengenai sisi *advancing blade*. Namun apabila kecepatan angin terlalu tinggi, maka defleksi aliran yang terjadi akan semakin jauh dan menyebabkan turbin Savonius berada pada *low velocity region* dan mengakibatkan nilai C_p kembali turun [8].

Performa turbin dengan adanya pemasangan dinding dekat sudu *returning* pada jarak $G/D = 1,335$ paling optimum terjadi pada kecepatan angin 9 m/s. Dengan nilai C_{pmax} yang dihasilkan sebesar 0,0361 pada $\lambda = 0,459$, menyebabkan

adanya peningkatan nilai sebesar 1,39 kali atau 38,85% dibandingkan dengan turbin konvensional yang memiliki nilai C_{P_0max} sebesar 0,026 pada $\lambda = 0,446$. Peningkatan nilai C_{Pmax} ini disebabkan karena pada kecepatan angin 9 m/s, defleksi aliran angin yang terjadi cenderung mengenai sudu *advancing* sehingga menyebabkannya berada pada daerah *high velocity* [8].

B. Analisis Nilai Coefficient of Moment (C_M)

Perbandingan nilai torsi dinamis turbin Savonius terhadap torsi teoritis yang dihasilkan oleh aliran angin yang mengenai turbin akan menghasilkan nilai Coefficient of Moment (C_M). Gambar 7 menunjukkan grafik Coefficient of Moment turbin angin savonius tanpa dinding (C_{M_0}) terhadap Tip Speed Ratio (λ), sedangkan grafik Coefficient of Moment turbin angin savonius dengan pemasangan dinding (C_{M_0}) terhadap Tip Speed Ratio (λ) dapat dilihat pada Gambar 8.

Kedua grafik memiliki trendline yang sama yaitu menurun. Hal ini diakibatkan karena hanya satu variabel tak tentu yang mempengaruhi nilai C_M yaitu nilai torsi dinamis. Pembebanan yang diberikan pada sistem brake dynamometer akan menghasilkan nilai selisih massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca dan mempengaruhi nilai torsi dinamis turbin.

Pemberian pembebanan yang maksimum pada brake dynamometer menyebabkan nilai Tip Speed Ratio (λ) yang minimum. Kemudian, nilai Coefficient of Moment (C_{M_0}) akan terus menurun seiring dengan meningkatnya nilai Tip Speed Ratio (λ). Hal ini dapat dikatakan jika nilai Coefficient of Moment (C_{M_0}) adalah berbanding terbalik terhadap nilai Tip Speed Ratio (λ).

Berdasarkan grafik pada Gambar 7 dapat diamati jika nilai C_{M_0} maksimum (C_{M_0max}) terjadi pada saat TSR bernilai nol dan juga sebaliknya nilai TSR maksimum (λ_{max}) terjadi pada saat C_{M_0} bernilai nol untuk semua variasi kecepatan angin. nilai C_{M_0max} semakin meningkat dari kecepatan angin sebesar 4 m/s hingga kecepatan angin 8 m/s yang kemudian menurun dari kecepatan angin 9 m/s ke kecepatan angin 10 m/s berturut-turut. Nilai C_{M_0max} tertinggi dicapai pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,1067 dan memiliki nilai $\lambda_{max} = 0,827$.

Sedangkan nilai C_M maksimum (C_{Mmax}) turbin dengan dinding yang dapat dilihat pada Gambar 8 menunjukkan jika nilai C_{Mmax} paling rendah terjadi pada kecepatan angin 4 m/s kemudian meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin berturut-turut hingga mencapai kecepatan 9 m/s, setelah itu nilai C_M kembali turun pada kecepatan angin 10 m/s. performa optimum turbin terjadi pada kecepatan angin 9 m/s dengan nilai C_{Mmax} sebesar 0,1251 pada $\lambda = 0$, meningkat 1,34 kali atau 33,65% dibandingkan turbin konvensional dengan nilai C_{M_0max} yang didapatkan sebesar 0,0936 pada $\lambda = 0$. Peningkatan nilai C_M yang terjadi diakibatkan pada kecepatan ini turbin berada pada daerah *high velocity* [8].

Selain itu, pada kecepatan angin yang relatif lebih tinggi, performa turbin kembali menurun disebabkan karena adanya fenomena solid wall sekaligus terjadi kerugian mekanis yang menyebabkan adanya losses (Gambar 8).

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

Nilai Coefficient of Static Torque didapatkan dari perbandingan torsi statis turbin Savonius terhadap torsi teoritis yang dihasilkan oleh aliran angin yang mengenai turbin. Nilai torsi statis turbin angin didapatkan dari pengukuran dengan menggunakan torquemeter. Pengukuran ini dilakukan dengan memvariasikan sudut sudu turbin angin (θ) pada 0° hingga 180° dengan rentang kenaikan tiap 10° untuk setiap variasi kecepatan angin.

Grafik *Coefficient of Static Torque* turbin angin savonius tanpa dinding (C_{TS_0}) terhadap Sudut Sudu (θ) turbin ditunjukkan pada Gambar 9 dan grafik *Coefficient of Static Torque* turbin angin savonius dengan adanya dinding (C_{TS_0}) terhadap Sudut Sudu (θ) turbin ditunjukkan pada Gambar 10.

Dapat dilihat jika kedua grafik memiliki *trendline* yang sama yaitu sinusoidal dimana nilai C_{TS} meningkat seiring dengan peningkatan sudut sudu turbin (θ) hingga mencapai titik maksimumnya kemudian menurun hingga mencapai nilai minimumnya dan akan kembali naik hingga mencapai sudut 180° . Peningkatan nilai C_{TS} pada rentang sudut tersebut menandakan terjadinya peningkatan nilai torsi statis. Begitupun sebaliknya, penurunan nilai C_{TS} menandakan jika nilai torsi statis yang didapatkan menurun.

Nilai C_{TS_0max} terjadi pada kecepatan angin 4 m/s sebesar 0,1118 pada $\theta = 30^\circ$ sedangkan nilai C_{TS_0min} terjadi pada kecepatan angin 5 m/s sebesar -0,046 pada $\theta = 140^\circ$ yang dapat dilihat pada Gambar 9. Sedangkan pada Gambar 10 untuk turbin dengan dinding didapatkan nilai C_{TSmax} terjadi pada kecepatan angin 4 m/s sebesar 0,095 pada $\theta = 30^\circ$ dan C_{TSmin} terjadi pada kecepatan 5 m/s sebesar -0,0245 $\theta = 150^\circ$. Adanya C_{TS} yang bernilai negatif ini menandakan bahwa pada sudut sudu turbin tersebut, kemampuan *self-starting* dari turbin akan memburuk.

Berdasarkan data yang didapatkan dapat diketahui jika nilai C_{TS} maksimum pada kedua konfigurasi turbin terjadi pada sudut sudu yang sama yaitu $\theta = 30^\circ$. Sedangkan nilai C_{TS} minimumnya terjadi pada sudut sudu yang berbeda-beda. Selain pada kecepatan angin 4 m/s terjadi pergeseran sudut sudu turbin untuk nilai C_{TS} minimum.

Adanya perbedaan besar sudut sudu turbin pada nilai C_{TS} minimum disebabkan karena pada turbin dengan dinding terjadi defleksi aliran angin yang mengenai sisi pojok depan dinding, sehingga bentuk aliran disekitar *returning blade* didekat dinding tidak lagi searah namun dibelokkan menuju sisi yang lebih jauh dari dinding. Maka turbin memerlukan sudut sudu yang lebih besar untuk mencapai nilai C_{TS} minimum dibandingkan dengan turbin tanpa dinding.

Selain itu, dengan adanya pemasangan dinding akan menyebabkan adanya efek *nozzle* pada celah diantara dinding dengan sisi sudu *returning*. Aliran *freestream* akan mengenai turbin dan melewati celah diantara dinding dan sudu *returning* yang luasannya lebih sempit. Aliran yang mengalir melewati celah sempit tersebut bagaikan seperti *nozzle* sehingga kecepatan aliran yang keluar akan lebih cepat dan mengenai sisi *returning blade* lainnya sehingga menambah gaya *drag* pada sudu *returning* dan menyebabkan selisih torsi semakin menurun hingga semakin menyebabkan bertambahnya nilai torsi negatif pada turbin pada sudut sudu tersebut.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dapat ditarik kesimpulan mengenai pengaruh pemasangan model dinding didekat sudu *returning* turbin angin Savonius pada rasio jarak $G/D = 1,335$ terhadap performa turbin angin dengan variasi kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s sebagai berikut: (1) Dengan adanya penempatan model dinding didekat sudu *returning* turbin angin Savonius pada rasio jarak $G/D = 1,335$ mampu meningkatkan performa turbin pada kecepatan angin optimum yaitu 9 m/s, dengan nilai *Coefficient of Power* (C_P) maksimum yang didapatkan sebesar 0,0361 pada $\lambda = 0,459$. Hal ini memberikan peningkatan nilai $C_{P\ max}$ sebesar 1,39 kali atau 38,85% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum ($C_{P0\ max}$) turbin angin Savonius tanpa dinding. (2) Dengan adanya penempatan model dinding didekat sudu *returning* turbin angin Savonius pada rasio jarak $G/D = 1,335$ mampu meningkatkan performa turbin pada kecepatan angin optimum yaitu 9 m/s, dengan nilai *Coefficient of Moment* (C_M) maksimum yang didapatkan sebesar 0,0788 pada $\lambda = 0,459$. Hal ini memberikan peningkatan nilai $C_{M\ max}$ sebesar 1,34 kali atau 33,65% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum ($C_{M0\ max}$) turbin angin Savonius tanpa dinding. (3) Dengan adanya penempatan model dinding didekat sudu *returning* turbin angin Savonius pada rasio jarak $G/D = 1,335$ pada seluruh variasi kecepatan angin membuat peningkatan terhadap nilai torsi negatif. Hal ini menyebabkan nilai *Coefficient of Static Torque* negatif mengalami peningkatan, sehingga mampu meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius pada seluruh kecepatan angin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS, *Hasil Sensus Penduduk 2020*, 1st ed. Jakarta: Badan Pusat Statistik, 2020.
- [2] Dirjen Dukcapil, *Distribusi Penduduk Indonesia Per Juni 2021: Jabar terbanyak, Kaltara paling Sedikit*, 1st ed. Jakarta: Direktorat Jenderal Kependudukan dan Pencatatan Sipil (Dirjen Dukcapil), 2021.
- [3] BPS, *Neraca Energi Indonesia 20152019*, 1st ed. Jakarta: Badan Pusat Statistik, 2020.
- [4] Suharyati *et al.*, *Indonesia Energy Outlook 2019*, 1st ed. Jakarta: Jenderal Dewan Energi Nasional (DEN), 2019.
- [5] PPIE and BPPT, *Outlook Energi Indonesia 2021: Perspektif Teknologi Indonesia*, 1st ed. Jakarta: Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIE) dan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2021.
- [6] P. KEBTKE, "Potensi Energi Angin Indonesia 2020." Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, Bogor, 2020, Available: https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi_angin/potensi-energi-angin-indonesia-2020.
- [7] 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.
- [8] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2636, 2020, doi: 10.3390/en13102636.
- [9] 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, doi: 10.3390/en81011846.
- [10] M. Casini, "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56–65, 2016, doi: 10.7763/jocet.2016.v4.254.
- [11] M. Asif, R. Alexander, T. Fazeelat, and K. Grice, "Sedimentary processes for the geosynthesis of heterocyclic aromatic hydrocarbons and fluorenes by surface reactions," *Org. Geochem.*, vol. 41, no. 5, pp. 522–530, 2010.
- [12] F. A. Kurniawan, "Studi Eksperimen Kinerja Turbin Angin Savonius yang Terintegrasi dengan Gedung: Studi Kasus untuk Sudu Advancing Dekat Dinding Gedung pada Jarak $G/D = 1,214$ dan dengan Kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2021.