

Studi Eksperimen Pengaruh Penempatan Dinding Dekat Sudu *Returning* pada $G/D = 1,214$ terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius

Faikar Hadian dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

Abstrak—Kebutuhan akan energi listrik di Indonesia terus meningkat tiap tahunnya. Kebutuhan akan energi listrik ini masih disuplai oleh bahan bakar yang tidak terbarukan. Apabila diteruskan, Indonesia akan mengalami krisis energi. Indonesia punya potensi energi baru dan terbarukan yang luas, salah satunya sumber energi dari aliran angin. Pemanfaatan energi angin dapat menggunakan turbin angin, salah satu turbin angin yang cocok digunakan di Indonesia adalah turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius dapat dipasang di atap maupun di samping bangunan, tujuannya untuk memanfaatkan aliran bebas hambatan serta menjadi sumber listrik bagi gedung tersebut. Penelitian dilakukan dengan menggunakan turbin angin Savonius dengan dua bilah sudu, dan dimater sudu (D) sebesar 165,2 mm. Selanjutnya model dinding bangunan terbuat dari kayu *multiplies* dan dipasangkan dekat sudu *returning* dengan rasio jarak gedung dengan sudu *returning* Savonius (G/D) sebesar 1,214. Hasil dari penelitian ini berupa kecepatan turbin angin Savonius optimum pada kecepatan 9 m/s, dengan peningkatan nilai *Coefficient of Power* sebesar 21,15% dan peningkatan nilai *Coefficient of Moment* sebesar 25%. Selain itu turbin angin Savonius dekat dengan model dinding juga mengalami peningkatan kemampuan *self-start* untuk seluruh variasi kecepatan.

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

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN akan energi listrik di Indonesia terus meningkat, dari tahun 2015 hingga 2019 kebutuhan listrik Indonesia terus tumbuh rata-rata 7% per tahun. Kebutuhan ini secara global masih dipenuhi oleh sumber bahan bakar yang tidak terbarukan seperti batu bara. Kenaikan kebutuhan akan bahan bakar fosil berupa batu bara naik dari 117 TWh pada tahun 2015 hingga 168 TWh pada tahun 2019. Selain batu bara, bahan bakar fosil yang masih banyak digunakan sebagai sumber energi utama adalah minyak bumi. Penggunaan minyak bumi sebagai bahan bakar terus meningkat setiap tahunnya seiring dengan konsumsi masyarakat dalam penggunaan moda transportasi, pada tahun 2017 penjualan kendaraan jenis mobil mencapai 1.079 unit, nilai ini naik hampir 150% dalam 10 tahun atau rata-rata penjualan mobil terus meningkat 10% tiap tahun. Kenaikan konsumsi masyarakat akan moda transportasi ini tidak diikuti dengan peningkatan cadangan minyak bumi Indonesia. Penurunan cadangan bahan bakar fosil akan terus terjadi seiring peningkatan konsumsi energi Indonesia. Apabila tidak dicarikan solusinya maka Indonesia akan mengalami keadaan defisit energi yang parah dalam 10 tahun ke depan. Dari permasalahan diatas semakin jelaslah

bahwa kebutuhan akan sumber energi baru pengganti bahan bakar fosil sangat dibutuhkan.

Energi baru dan terbarukan atau selanjutnya disebut EBT, merupakan sumber energi yang berasal dari fenomena-fenomena yang terdapat di alam, seperti cahaya matahari, angin, dan air. Pemanfaatan akan EBT ini sudah terlihat dari data bahwa terdapat peningkatan penggunaan EBT yang hanya berada di angka 25 TWh mencapai 48 TWh. Angka ini masih bisa bertambah sesuai dengan data bahwa potensi energi terbarukan Indonesia bisa mencapai 442GW [1]d. Salah satu EBT yang dapat dimanfaatkan di Indonesia adalah dari aliran angin. Pemanfaatan aliran angin untuk diubah menjadi energi listrik ini dapat menggunakan turbin angin. Salah satu jenis turbin angin yang cocok digunakan di Indonesia dengan kecepatan rata-rata aliran angin yang rendah adalah turbin angin Savonius [1].

Turbin angin Savonius memiliki kendala dimana turbin ini memiliki efisiensi kerja yang terbilang rendah dibandingkan turbin angin lainnya. Maka dari itu, banyak peneliti tertarik untuk meningkatkan efisiensi dari turbin ini. Penelitian dengan menggunakan metode CFD menunjukkan turbin angin Savonius yang diletakkan di tepi gedung akan menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan hanya terkena aliran yang *uniform* saja. Hasil ini didapat dari data peningkatan C_p turbin angin Savonius terhadap jarak celah, jumlah turbin yang dipasang berdekatan, dan arah sudu datang angin [2].

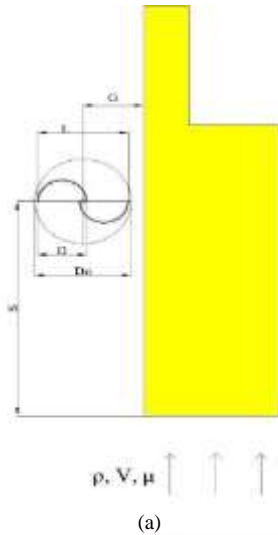
Penelitian yang lain menunjukkan hasil berupa, pemasangan *guide vane* mampu untuk memfokuskan aliran dan meningkatkan kecepatan aliran sehingga didapatkan peningkatan performa turbin angin Savonius. Penelitian ini menunjukkan pula bahwa model turbin angin Savonius ini mampu menyuplai daya untuk gedung sebesar 6,3% [3].

Penelitian terdahulu juga menunjukkan hasil berupa bentuk geometris paling optimum dari turbin angin Savonius [4]. Bentuk geometris yang dapat menghasilkan performa paling baik ini adalah turbin angin Savonius dengan dua bilah sudu, menggunakan *endplate*, menggunakan rotor dua tingkat, dan tidak memiliki *overlap ratio*. Selain itu penelitian ini mengetahui bahwa peningkatan performa turbin angin Savonius linear dengan peningkatan nilai *aspect ratio*.

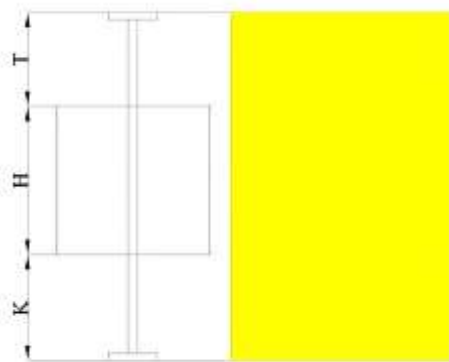
Penelitian dengan memasang model dinding gedung di samping sudu *advancing* turbin, dengan rasio jarak celah (G/D) sebesar 1,214, dengan variasi kecepatan dari 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s [5]. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pemasangan dinding di samping sudu *advancing* menghasilkan performa paling optimum pada kecepatan 4 m/s. Selanjutnya performa turbin akan terus turun seiring dengan



Gambar 1. Skema instalasi peralatan.



(a)

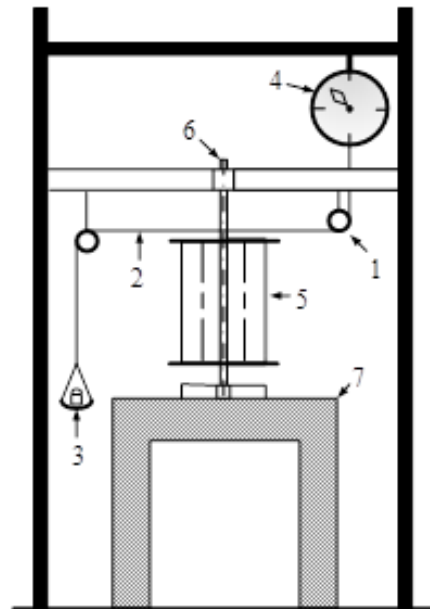


(b)

Gambar 2. Skema topik dan parameter penelitian (a) tampak atas, (b) tampak depan.

penambahan kecepatan turbin. Peristiwa ini dapat terjadi akibat defleksi arah angin yang disebabkan oleh dinding bagian depan gedung, sehingga mempengaruhi kecepatan aliran angin dan daya yang dihasilkan belum maksimal.

Dari penelitian-penelitian sebelumnya terlihat bahwa perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk membahas pemanfaatan turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan gedung. Oleh sebab itu penelitian ini dilakukan dengan memasang model dinding di samping sudu *returning* turbin angin Savonius dengan rasio jarak celah (G/D) sebesar 1,214 pada kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 m/s. Selain itu dalam penelitian ini, terdapat beberapa parameter berupa, jarak antara pusat poros dan muka depan gedung terhadap diameter turbin (S/D) sebesar 4,91; perbandingan jarak antara bagian atas turbin ke atap gedung dengan diameter turbin (T/D) sebesar 1,16; perbandingan jarak dari bagian bawah turbin ke penyangga turbin terhadap turbin (K/D) sebesar 1,31, dan perbandingan antara tinggi turbin dengan



Gambar 3. Skema *brake dynamometer*.

Dimana:

- 1 : pulley
- 2 : benang nilon
- 3 : anak timbangan
- 4 : neraca pegas
- 5 : turbin angin savonius
- 6 : poros turbin angin savonius
- 7 : penyangga turbin angin savonius

Tabel 1.

Nilai *constant ratio* untuk berbagai kombinasi pasangan

Id	Pasangan	Rata-Rata CR*
R1	a - c1	0,0193233
R2	b - c1	0,0132334
R3	c - c1	0,0132334
R4	a - c2	0,2343343
R5	b - c2	0,3423423
R6	c - c2	0,3423443
R7	a - c3	0,0023444
R8	b - c3	0,0200343
R9	c - c3	0,0234443

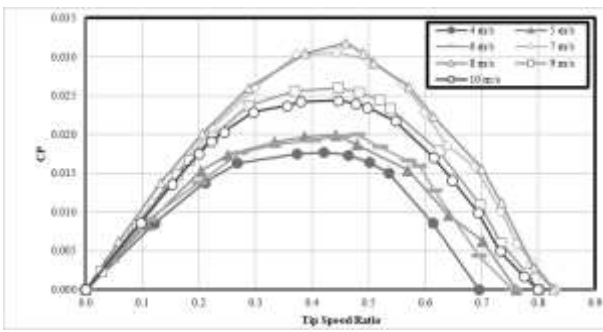
diameter turbin (H/L) sebesar 1. Nilai constant ratio tertera pada Tabel 1.

II. METODE PENELITIAN

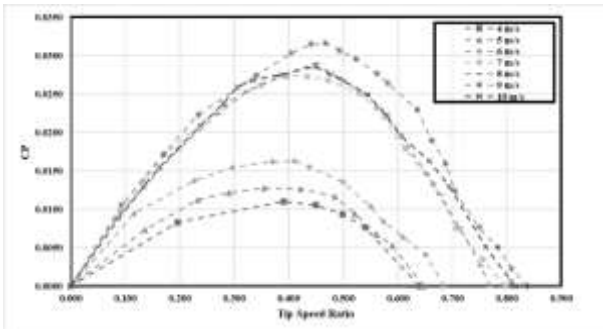
A. Tahap Telaah

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan performa turbin angin Savonius tanpa penggunaan dinding dengan turbin angin Savonius dekat dengan dinding. Parameter yang diubah-ubah dalam penelitian ini guna mendapatkan hasil yang optimum adalah kecepatan angin (V) yang datang mengenai turbin. Parameter lain yang penting dan berpengaruh besar dalam penelitian ini adalah rasio jarak celah antara sisi *returning blade* dengan model dinding bangunan (G/D). Parameter lain yang dapat mempengaruhi hasil dari penelitian ini antara lain massa jenis udara (ρ), diameter sudu turbin (D), diameter *endplate* (D_0), viskositas udara (μ), tinggi turbin angin Savonius (H), jarak antara tepi atas dinding dengan terhadap *endplate* (T), jarak antara *endplate bawah* terhadap plat dasar penyangga turbin (K), jarak antara depan dinding terhadap poros rotor turbin Savonius (S), dan kecepatan sudut rotor turbin (ω).

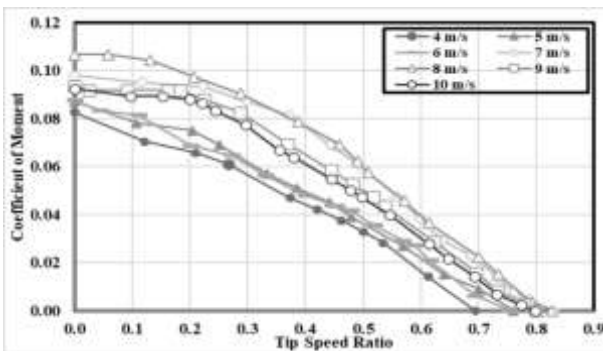
Gambar 1 menunjukkan skema instalasi dari penelitian. Sedangkan gambar 2 menunjukkan ilustrasi dan parameter



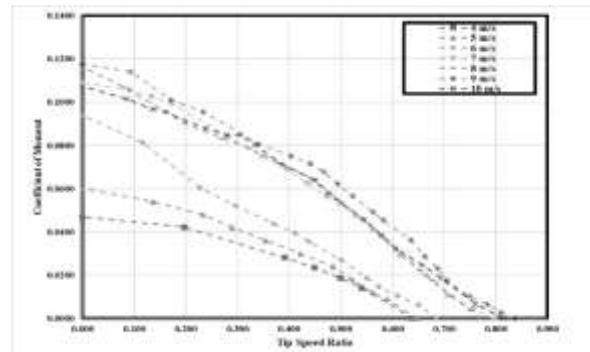
Gambar 7. Grafik *coefficient of power* (C_{p0}) turbin angin savonius tanpa pemasangan dinding sebagai fungsi tip speed ratio.



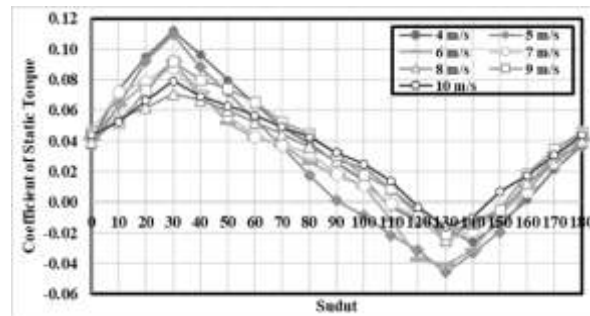
Gambar 8. Grafik *coefficient of power* (C_p) turbin angin savonius dekat dinding pada $g/d = 1,214$ sebagai fungsi tip speed ratio.



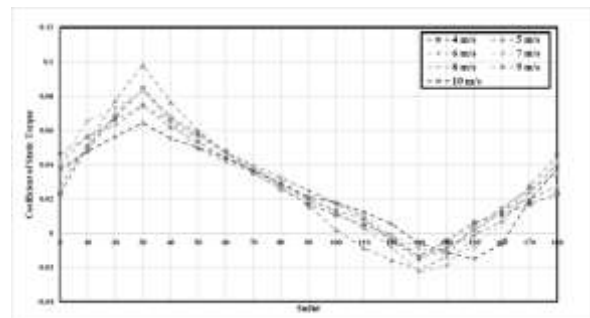
Gambar 9. Grafik *coefficient of moment* turbin angin savonius tanpa pemasangan dinding (C_{M0}) sebagai fungsi tip speed ratio.



Gambar 4. Grafik *coefficient of moment* turbin angin savonius dekat dinding pada $g/d = 1,214$ (cm) sebagai fungsi tip speed ratio.



Gambar 5. Grafik *coefficient of static torque* turbin angin savonius tanpa pemasangan dinding (CTS0) terhadap fungsi sudut sudu turbin.



Gambar 6. Grafik *coefficient of static torque* turbin angin savonius tanpa pemasangan dinding (CTS) terhadap fungsi sudut sudu turbin.

dari penelitian. *Axial fan* digunakan sebagai sumber aliran angin, kecepatan angin yang keluar dari *axial fan* diatur menggunakan *voltage regulator*. Jarak antara *axial fan* dan turbin angin Savonius adalah sebesar 3200 mm. *Honeycomb* dipasang 800 mm di depan *axial fan*, *honeycomb* ini berfungsi sebagai pengarah aliran dari *axial fan* agar alirannya menjadi *uniform* ketika mengenai turbin Savonius. Model dinding bangunan yang terbuat dari kayu *multiplies* dengan dimensi 1550×450×750 mm, dipasang dengan rasio jarak dinding dan diameter turbin angin Savonius (G/D) sebesar 1,214. Kecepatan aliran angin yang mengenai turbin angin Savonius diukur dengan menggunakan *anemometer*. Torsi dinamis turbin didapatkan dengan menggunakan skema *brake dynamometer*, dan *tachometer* digunakan untuk mengukur kecepatan putaran turbin. Torsi statis diukur menggunakan *torquemeter*.

B. Benda Uji

Benda uji terdiri dari:

1) *Turbin Angin Savonius*

Turbin angin Savonius yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi dan dimensi seperti yang tertera

berikut ini:

1. Diameter sudu turbin turbin: 165,2 mm
2. Tinggi turbin: 303,4 mm
3. Diameter turbin: 303,4 mm
4. Diameter poros: 19 mm
5. Diameter endplate: 321 mm
6. Tebal endplate: 1 mm
7. Tebal sudu turbin: 4 mm
8. Material Sudu Turbin: Pipa PVC
9. Material Endplate: Alumunium Cladding

2) *Model Dinding bangunan*

Model dinding bangunan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut ini:

1. Panjang: 1550 mm
2. Lebar: 450 mm
3. Tinggi: 705 mm
4. Tebal: 12 mm
5. Material model dinding bangunan: Kayu Multiplex

C. Peralatan

Peralatan uji terdiri dari:

1) Anemometer

Anemometer digunakan sebagai alat ukur untuk mengukur kecepatan aliran angin, *anemometer* yang digunakan dalam penelitian ini adalah model OMEGA HHF141A. *Anemometer digital* ini dapat menyajikan data dalam satuan ft/min, km/h, dan knots.

2) Torquemeter

Torquemeter merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur besarnya torsi statis dari poros yang diam. Model *torquemeter* yang digunakan dalam penelitian ini adalah, **LUTRON TQ-8800**.

3) DC Tachometer

DC Tachometer adalah alat ukur yang dapat mengukur besarnya nilai kecepatan putar dari poros yang berputar. *Tachometer* yang digunakan dalam penelitian ini adalah merek **OMEGA tipe HHT12**.

4) Brake Dynamometer

Susunan *brake dynamometer* dapat menunjukkan nilai torsi dinamis turbin. *Brake dynamometer* dapat menampilkan nilai torsi dinamis dengan menghitung selisih antara nilai yang ditunjukkan neraca pegas dengan beban pemberat. Skema dari sistem *brake dynamometer* ini ditampilkan pada gambar 3.

D. Metode Pengukuran Data

Penelitian ini menggunakan neraca pegas model NAGATA tipe C-5 dan anak timbangan dengan merek NKH tipe M-1. Penelitian ini menggunakan variasi kecepatan aliran angin untuk mengetahui kecepatan optimum yang menghasilkan performa paling optimum dari turbin angin Savonius yang diletakkan dekat dengan dinding. Variasi kecepatan angin diatur dari 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Nilai kecepatan aliran angin ini dapat diubah menjadi bilangan Reynolds dengan menggunakan rumus (1), dimana ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3), V adalah kecepatan *freestream* dari *axial fan* (m/s), L adalah panjang karakteristik turbin angin Savonius ($L = 2D-b$), dan μ adalah viskositas dinamis udara (kg/m.s):

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1)$$

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin, hasil ini diketahui dengan mengukur torsi dinamis turbin angin Savonius yang berputar dengan berbagai variasi kecepatan, dan mengalikannya dengan kecepatan angular yang dihasilkan oleh turbin:

$$P_r = T_d \cdot \omega \quad (2)$$

Dimana torsi dinamis turbin dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_d = \{(s - m)g\} \cdot r \quad (3)$$

Dimana s adalah pembacaan berat pada neraca pegas, m adalah massa pemberat yang ditahan turbin, g adalah percepatan gravitasi, dan r adalah jari-jari poros turbin yang menahan pembebanan.

Sedangkan kecepatan angular turbin yang didapat dari nilai pengukuran oleh *DC Tachometer*, dengan selanjutnya dimasukkan ke dalam persamaan di bawah ini:

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

Dimana n adalah jumlah putaran dalam satu menit yang diukur menggunakan *DC Tachometer*. Setelah mengetahui nilai ω maka dapat dicari nilai *tip speed ratio* dari turbin dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (5)$$

Dimana R adalah jari-jari turbin, dan V adalah kecepatan aliran angin.

Nilai efisiensi daya dari turbin dapat diartikan sebagai rasio antara daya teoritis yang dihasilkan oleh angin dengan daya actual yang dihasilkan oleh turbin. Rasio ini selanjutnya disebut *power coefficient*, nilai dari koefisien ini dapat dicari dengan:

$$C_p = \frac{P_t}{P_R} \quad (6)$$

Nilai P_t dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (7)$$

A merupakan luasan frontal yang terkena aliran angin, dan ρ adalah massa jenis udara.

Selanjutnya persamaan untuk mencari nilai *coefficient power* dapat dicari dengan memasukkan persamaan (2), (3), (4), (7) ke dalam persamaan (6), sehingga persamaannya menjadi:

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

Selanjutnya untuk menghitung nilai *Coefficient of Moment* digunakan persamaan seperti yang tertera di bawah:

$$C_M = \frac{2 \cdot T_D}{\rho \cdot A \cdot R \cdot V^2} \quad (9)$$

Sedangkan untuk nilai *Coefficient of Static Torque* dapat dicari dengan persamaan (10), dimana T_s merupakan torsi statis yang diukur ketika turbin angin berada dalam keadaan diam:

$$C_{TS} = \frac{4 \cdot T_s}{\rho \cdot A \cdot R \cdot V^2} \quad (10)$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Coefficient of Power

Analisa data untuk mengetahui performa turbin angin Savonius yang pertama adalah analisa data *Coefficient of Power*. Data ini didapatkan dengan memanfaatkan persamaan (9). Selanjutnya nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan dibandingkan dengan nilai *tip speed ratio* (TSR) untuk seluruh variasi kecepatan dari 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 m/s dalam bentuk grafik. Gambar 4 menunjukkan perbandingan CoP terhadap TSR untuk turbin angin Savonius tanpa dinding. Grafik pada gambar 4 dimulai dari nilai CoP_0 akibat dari belum adanya penambahan beban yang diberikan pada sistem *brake dynamometer*, dengan kata lain turbin angin Savonius belum menghasilkan torsi dinamis. Selanjutnya turbin angin Savonius akan mengalami peningkatan nilai CoP_0 seiring dengan penambahan beban pada sistem *brake*

dynamometer atau pada grafik ditunjukkan oleh peningkatan nilai CoP_0 terhadap peningkatan nilai *tip speed ratio* hingga mencapai nilai maksimum pada *tip speed ratio* tertentu. Nilai *tip speed ratio* yang dicapai pada nilai *Coefficient of Power* mencapai maksimumnya merupakan nilai *tip speed ratio* optimum yang dimiliki turbin Savonius. Setelah melewati titik maksimum nilai CoP_0 turbin angin Savonius akan terus turun seiring dengan penambahan beban atau peningkatan nilai *tip speed ratio*, akibatnya terjadi peningkatan kerugian mekanis pada turbin angin Savonius dan penurunan putaran angular turbin angin Savonius. Peningkatan kerugian mekanis dan penurunan putaran turbin angin Savonius akan menurunkan pula performa turbin angin Savonius hingga turbin tidak dapat lagi menghasilkan daya pada pembebanan tertinggi atau nilai *tip speed ratio* maksimum. Dapat disimpulkan dari gambar 4 bahwa, untuk seluruh variasi kecepatan grafik akan memiliki *trendline* yang berbentuk parabolik, dimana nilai *Coefficient of Power* turbin akan terus naik sepanjang kenaikan nilai *tip speed ratio* hingga mencapai puncak. Setelah nilai *Coefficient of Power* mencapai puncak grafik mulai mengalami penurunan hingga mencapai angka nol, sehingga terbentuk grafik yang berbentuk parabola terbuka kebawah. Bentuk grafik yang berbentuk parabolik terbuka kebawah ini juga dapat terlihat pada gambar 5 dengan penjelasan yang sama dengan gambar 4.

Dari grafik pada gambar 4 dapat tarik kesimpulan bahwa nilai CoP maksimum paling tinggi dicapai pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,0318 pada nilai *tip speed ratio* (TSR) sebesar 0,459. Sedangkan nilai CoP maksimum untuk masing-masing kecepatan beserta nilai TSR optimum secara berturut-turut adalah sebagai berikut, CoP maksimum pada kecepatan 4 m/s memiliki nilai sebesar 0,0177 dan TSR optimum sebesar 0,420; CoP maksimum pada kecepatan 5 m/s memiliki nilai sebesar 0,0199 dan TSR optimum sebesar 0,442; CoP maksimum pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai sebesar 0,02 dan TSR optimum sebesar 0,479; CoP maksimum pada kecepatan 7 m/s memiliki nilai sebesar 0,0305 dan TSR optimum sebesar 0,443; CoP maksimum pada kecepatan 9 m/s memiliki nilai sebesar 0,0260 dan TSR optimum sebesar 0,459; CoP maksimum pada kecepatan 10 m/s memiliki nilai sebesar 0,0244 dan TSR optimum sebesar 0,445. Dari keseluruhan nilai ini dapat disimpulkan pula bahwa nilai TSR optimum yang dimiliki turbin Savonius berada pada rentang yang relatif sama yaitu pada 0,420 – 0,459.

Grafik pada gambar 4 juga menunjukkan rentang operasi kerja turbin angin Savonius yang ditunjukkan oleh nilai *tip speed ratio*. Nilai *tip speed ratio* ini maksimum ketika sistem *brake dynamometer* tidak diberikan pembebanan. Nilai *tip speed ratio* akan terus turun seiring dengan penambahan beban akibat munculnya efek pengereman pada turbin angin Savonius. Peristiwa ini dapat diartikan sebagai kemampuan turbin untuk menahan pembebanan dan kerugian-kerugian mekanis yang timbul ketika turbin mulai beroperasi.

Grafik pada gambar 5 menunjukkan nilai CoP terhadap TSR untuk turbin angin Savonius dekat dengan dinding pada $G/D = 1,214$, nilai tertinggi pada grafik didapatkan untuk kecepatan 9 m/s dengan CoP sebesar 0,0316 dan rentang TSR optimum sebesar 0,404-0,494. Nilai CoP dan

TSR untuk variasi kecepatan lain berturut-turut adalah sebagai berikut, CoP maksimum pada kecepatan 4 m/s sebesar 0,0110 dan TSR optimumnya sebesar 0,391; CoP maksimum pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,0128 dan nilai TSR optimumnya sebesar 0,354; CoP maksimum pada kecepatan 6 m/s sebesar 0,0163 dan nilai TSR optimumnya sebesar 0,410; CoP maksimum pada kecepatan 7 m/s sebesar 0,0273 dan nilai TSR optimumnya sebesar 0,434; CoP maksimum pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,0290 dan nilai TSR optimumnya sebesar 0,449; CoP maksimum pada kecepatan 9 m/s sebesar 0,0315 dan nilai TSR optimumnya sebesar 0,441; CoP maksimum pada kecepatan 10 m/s sebesar 0,0286 dan nilai TSR optimumnya sebesar 0,448.

Dapat disimpulkan dari gambar 5 bahwa terjadi peningkatan terhadap nilai CoP dengan pemasangan dinding dekat sudu *returning* turbin angin Savonius dibandingkan tanpa penggunaan dinding untuk kecepatan 9 dan 10 m/s, dimana masing-masing mengalami peningkatan sebesar 21,15% dan 17,21%. Peningkatan ini disebabkan adanya defleksi aliran pada dinding sehingga sudu *advancing* turbin berada pada daerah *high velocity* dan sudu *returning* berada pada daerah *low velocity*, sehingga selisih gaya drag serta selisih torsi meningkat menghasilkan peningkatan daya.

B. Analisa Coefficient of Moment

Analisa yang perlu dilakukan pula untuk mengetahui performa turbin angin Savonius adalah analisa terhadap nilai *Coefficient of Moment*. Analisa *Coefficient of Moment* dilakukan dengan menggabungkan data hasil eksperimen dalam bentuk grafik nilai *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *tip speed ratio* (TSR). Data untuk grafik didapatkan dengan mengolah data hasil pengukuran ke dalam persamaan (10). Gambar 6 menunjukkan nilai C_M terhadap TSR untuk seluruh variasi kecepatan dari 4, 5, 6, 7,8 ,9, 10 m/s. Dari grafik pada gambar 6 dapat kita ketahui bahwa nilai C_M mengalami *trendline* yang menurun seiring dengan peningkatan nilai TSR. Nilai C_M maksimum dicapai pada keadaan nilai TSR minimum (0) yang menandakan bahwa pada keadaan ini pembebanan yang dialami turbin Savonius berada pada batas maksimumnya. Sedangkan nilai TSR maksimum dicapai pada nilai C_M paling minimum (0) yang menunjukkan bahwa pada keadaan ini tidak terjadi pembebanan pada turbin Savonius. *Trendline* pada gambar 6 juga ditunjukkan grafik pada gambar 7 yang dapat dijelaskan dengan alasan yang sama.

Dari grafik pada gambar 6 dapat disimpulkan bahwa nilai C_M tertinggi didapatkan pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,1067 dan nilai TSR maksimum dicapai pada 0,827, sedangkan nilai C_M terendah dicapai pada kecepatan 4 m/s nilai C_M maksimum memiliki nilai sebesar 0,0826 dan nilai TSR maksimum sebesar 0,694.

Grafik pada gambar 7 menunjukkan nilai C_M terhadap TSR untuk turbin angin Savonius dekat dengan dinding pada $G/D = 1,214$, nilai tertinggi pada grafik didapatkan untuk kecepatan 9 m/s dengan C_M sebesar 0,117 dan TSR maksimum sebesar 0,837, sedangkan nilai terendah dicapai pada kecepatan 4 m/s adalah sebesar 0,0469 dan nilai TSR maksimum dicapai pada 0,639.

Kesimpulan lain yang dapat dipahami dari grafik pada gambar 7 adalah adanya peningkatan nilai C_M pada turbin angin Savonius dekat dengan dinding dibandingkan turbin

angin Savonius tanpa dinding pada kecepatan 9 dan 10 m/s secara berturut-turut sebesar 25% dan 15,93%. Peningkatan ini disebabkan adanya defleksi aliran pada dinding sehingga sudu *advancing* turbin berada pada daerah *high velocity* dan sudu *returning* berada pada daerah *low velocity*, sehingga selisih gaya drag serta selisih torsi turbin meningkat.

C. Analisa Coefficient of Static Torque

Analisa terhadap performa turbin angin Savonius untuk mengetahui kemampuan *self-start* dilakukan dengan analisa nilai *Coefficient of Static Torque*. Nilai *Coefficient of Static Torque* akan dibandingkan terhadap sudut sudu turbin angin Savonius dari 0° - 180° untuk seluruh variasi kecepatan. Perbandingan dilakukan dengan menampilkan grafik, grafik ini didapat dari data hasil pengukuran yang telah diolah dengan menggunakan persamaan (11). Gambar 8 menunjukkan bahwa *trendline* dari grafik berbentuk sinusoidal, dimana terdapat kenaikan nilai *Coefficient of Static Torque* pada sudut 0° hingga 30° dan pada sudut 150° hingga sudut 180° . Fenomena ini diakibatkan oleh kenaikan nilai torsi statis karena kenaikan gaya *drag* pada sudu *advancing* dan penurunan gaya *drag* pada sudu *returning* yang mengakibatkan selisih torsi yang dihasilkan turbin menjadi meningkat. Sebaliknya, pada sudut 30° hingga sudut 150° terjadi penurunan nilai *Coefficient of Static Torque*. Penurunan ini diakibatkan oleh sudu *advancing* turbin yang semakin menjauhi sumber angin, akibatnya gaya *drag* pada sudu *advancing* menjadi semakin kecil. Bentuk grafik ini juga terdapat pada gambar 9 dengan penjelasan yang sama dengan gambar 8.

Dari gambar 8 dapat disimpulkan bahwa *Coefficient of Static Torque* maksimum untuk kecepatan 4 m/s bernilai 0,11 sedangkan *Coefficient of Static Torque* minimumnya sebesar -0,026. *Coefficient of Static Torque* maksimum untuk kecepatan 5 m/s bernilai 0,109 sedangkan *Coefficient of Static Torque* minimumnya sebesar -0,0461. *Coefficient of Static Torque* maksimum untuk kecepatan 6 m/s bernilai 0,09186 sedangkan *Coefficient of Static Torque* minimumnya sebesar -0,0408. *Coefficient of Static Torque* maksimum untuk kecepatan 7 m/s bernilai 0,088 sedangkan *Coefficient of Static Torque* minimumnya sebesar -0,026. *Coefficient of Static Torque* maksimum untuk kecepatan 8 m/s bernilai 0,071 sedangkan *Coefficient of Static Torque* minimumnya sebesar -0,024. *Coefficient of Static Torque* maksimum untuk kecepatan 9 m/s bernilai 0,0914 sedangkan *Coefficient of Static Torque* minimumnya sebesar -0,021. Dari gambar 8 juga terlihat bahwa nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut sudu 100° hingga sudut sudu 150° . Nilai negatif pada *Coefficient of Static Torque* ini mengindikasikan kemampuan *self-start* turbin yang buruk. Pada sudut sudu dengan nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif turbin harus dibantu gaya dari luar agar dapat berputar dan mulai beroperasi.

Grafik pada gambar 9 menunjukkan perbandingan nilai *Coefficient of Static Torque* turbin angin Savonius dekat dinding pada $G/D = 1,214$ dan sudut sudu turbin angin Savonius dari 0° - 180° . Dari gambar 9 dapat disimpulkan bahwa nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum dan minimum untuk seluruh variasi kecepatan berturut-turut adalah, nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan 4 m/s sebesar 0,084 pada sudut sudu 30° ,

sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum sebesar -0,014 pada sudut sudu 130° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,097 pada sudut sudu 30° , sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum sebesar -0,021 pada sudut sudu 130° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan 6 m/s sebesar 0,084 pada sudut sudu 30° , sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum sebesar -0,022 pada sudut sudu 130° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan 7 m/s sebesar 0,083 pada sudut sudu 30° , sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum sebesar -0,012 pada sudut sudu 140° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,074 pada sudut sudu 30° , sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum sebesar -0,013 pada sudut sudu 130° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan 9 m/s sebesar 0,075 pada sudut sudu 30° , sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum sebesar -0,015 pada sudut sudu 130° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan 10 m/s sebesar 0,064 pada sudut sudu 30° , sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum sebesar -0,015 pada sudut sudu 150° .

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh hasil analisa nilai *Coefficient of Static Torque* pada gambar 8 dan gambar 9 menunjukkan bahwa turbin angin Savonius dekat dengan dinding menghasilkan nilai torsi minimum yang lebih kecil untuk seluruh variasi kecepatan dibandingkan turbin angin Savonius tanpa dinding. Fenomena ini menunjukkan bahwa penggunaan dinding dekat sudu *returning* dapat memperbaiki kemampuan *self-start* turbin angin Savonius.

IV. KESIMPULAN

Dari seluruh hasil penelitian pada jurnal ini dapat ditarik beberapa kesimpulan terhadap pengaruh pemasangan model dinding bangunan dekat sudu *returning* turbin angin Savonius pada $G/D = 1,214$ dengan variasi kecepatan angin dari 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 m/s pada performa turbin angin Savonius. Kesimpulan tersebut sesuai seperti yang tertera.

Nilai *Coefficient of Power* tertinggi dan nilai *Coefficient of Moment* tertinggi yang dapat dicapai oleh turbin angin Savonius yang dipasang dekat dengan dinding pada $G/D = 1,2140$ terdapat pada kecepatan 9 m/s. Pada kecepatan ini pula nilai *CoP* dan *Cm* lebih baik dibandingkan dengan penggunaan turbin angin Savonius tanpa dinding.

Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada kecepatan 9 m/s untuk turbin angin Savonius dekat dinding pada $G/D = 1,2140$ bernilai 0,0315 dan mengalami kenaikan sebesar 21,15% dibandingkan turbin angin Savonius tanpa dinding. Nilai *Coefficient of Moment* tertinggi pada kecepatan 9 m/s untuk turbin angin Savonius dekat dinding pada $G/D = 1,2140$ bernilai 0,117 dan mengalami kenaikan sebesar 25% dari turbin angin Savonius tanpa penggunaan dinding.

Pemasangan model dinding bangunan dekat dengan turbin angin Savonius pada $G/D = 1,2140$ menghasilkan nilai *Coefficient of Static Torque* minimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa dinding di seluruh variasi kecepatan. Perbandingan ini menunjukkan bahwa pemasangan model dinding pada $G/D = 1,2140$ dari sudu *returning* turbin angin Savonius efektif

untuk meningkatkan kemampuan self-start turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dewan Energi Nasional (DEN), *Indonesia Energy Outlook 2019*. Jakarta: Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019.
- [2] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *energies*, vol. 13, no. 10, 2020.
- [3] 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.
- [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] 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.