

Studi Eksperimental Efek Peletakkan Sudu Advancing pada Bangunan pada Jarak $G/D=1,335$ Terhadap Kinerja Turbin Angin

Ishak Al Mausili Tahir dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

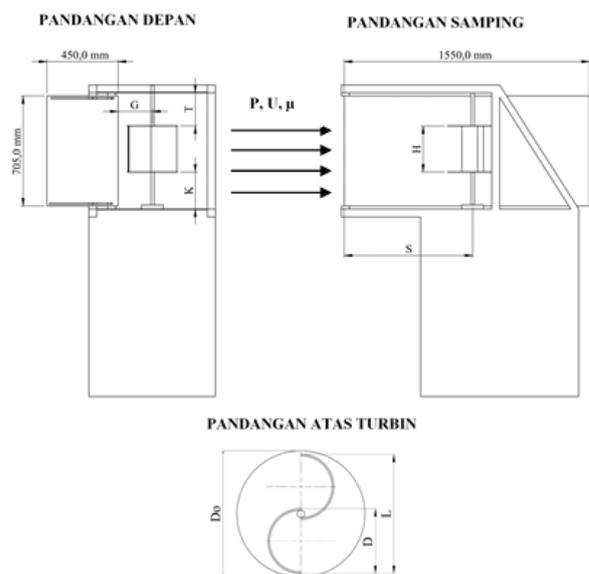
Abstrak—Petumbuhan jumlah penduduk di daerah perkotaan serta ketersediaan sumber daya alam yang terbatas mengharuskan manusia untuk beralih ke penggunaan energi terbarukan untuk menghasilkan listrik. Turbin angin Savonius merupakan pilihan terbaik untuk memanen energi angin di daerah perkotaan. Turbin tersebut dapat di instalasi pada bangunan perkotaan untuk memanfaatkan angin yang bebas hambatan. Prinsip kerja dari turbin Savonius adalah adanya selisih torsi pada sudu *advancing* dan sudu *returning* akibat perbedaan nilai gaya *drag*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan turbin angin Savonius berdiameter 303,4 mm dengan *aspect ratio* (H/L) = 1, jarak sudu *advancing* ke dinding bangunan terhadap diameter sudu turbin (G/D) sebesar 1,335, dan variasi kecepatan angin bernilai 4 sampai dengan 9 (m/s). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan meletakkan sudu *advancing* di dekat dinding bangunan efektif meningkatkan performa turbin pada kecepatan angin 4, 5 dan 6 m/s. Nilai *Coefficient of Power* (CoP) tertinggi diperoleh pada kecepatan angin 5 m/s sebesar 0,0897 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,714. Sedangkan peningkatan nilai *coefficient of power maximum* tertinggi pada kecepatan angin (U) 4 m/s yaitu sebesar 53,44% dengan nilai 0,0692 pada *tip speed ratio* (λ) 0,710 dan diperoleh peningkatan nilai *coefficient of Moment* (C_M) maksimum pada kecepatan 4 m/s sebesar 34,11%. Peletakkan sudu *advancing* pada jarak $G/D=1,335$ mampu meningkatkan nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) negatif pada sudut $100^\circ-170^\circ$ saat kecepatan angin 4, 5, 6, 8 dan 9 m/s.

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

I. PENDAHULUAN

ENERGI listrik merupakan energi yang dibutuhkan oleh manusia untuk menunjang aktivitas keseharian. Pada tahun 2018, total konsumsi energi listrik dunia mencapai 22.315 TWh, lebih tinggi 4,0% dari tahun 2017 berdasarkan pada penelitian [1]. Peningkatan konsumsi listrik diakibatkan dengan meningkatnya jumlah penduduk. Proyeksi permintaan listrik di Indonesia mencapai 2214 TWh BaU pada tahun 2050 berdasarkan pada penelitian [2]. Berkurangnya produksi energi fosil seperti minyak bumi dan emisi gas rumah kaca membuat pemerintah beralih ke energi baru dan terbarukan. Salah satu EBT untuk membangkitkan listrik yang dapat dimanfaatkan di Indonesia adalah energi angin, dengan potensi 60,6 GW berdasarkan penelitian. Indonesia merupakan wilayah yang cocok untuk penggunaan turbin angin Savonius dikarenakan kecepatan angin di Indonesia relatif rendah yaitu berkisar antara 3-5 m/s.

Penelitian yang dilakukan oleh Casini et al. adalah analisis turbin angin pada bentuk atau geometri bangunan [3]. Analisis ini bertujuan untuk melihat efek bentuk bangunan



Gambar 1. Skema Topik Penelitian.

Keterangan:

D : Diameter *blade* turbin (m)

G : jarak antara pusat turbin ke dinding samping bangunan (m)

S : Jarak antara jarak pusat turbin ke dinding depan bangunan (m)

T : Jarak antara permukaan atas *endplate* ke bagian atas bangunan (m)

K : jarak antara permukaan bawah *endplate* ke permukaan atas dasar penyangga turbin (m)

L : Diameter turbin (m)

b : Diameter poros (m)

H : Tinggi turbin (m)

t : Tebal *blade* atau sudu turbin (m)

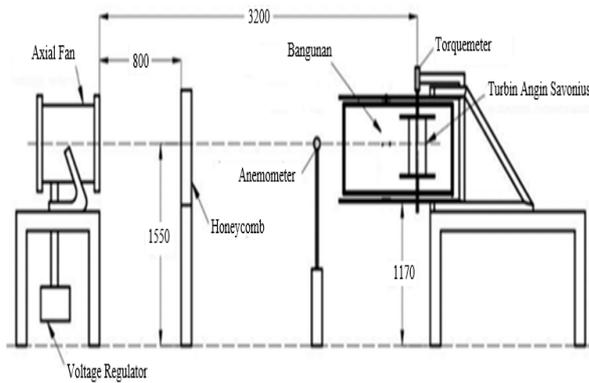
ρ : Massa jenis udara (Kg/m^3)

μ : Viskositas udara (Ns/m^2)

U : Kecepatan angin yang berasal dari *fan* (m/s)

terhadap turbin. Penelitian ini dilakukan dengan mengambil beberapa referensi-referensi penelitian terkait turbin angin. Turbin dapat diinstalasi untuk memusatkan daya angin dengan cara memvariasikan bentuk bangunan. Konstruksi seperti ini disebut dengan *building augmented wind turbine* (BAWTs). BAWTs dapat dibagi menjadi. BAWTs dekat dengan gedung, di atas atap atau di dinding samping. BAWTs di antara gedung, BAWT dimasukkan kedalam *air conducts* melalui bangunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis VAWT lebih sesuai digunakan pada BAWT dekat gedung dan pada BAWT dengan *air conducts*, sedangkan HAWT lebih sesuai untuk BAWT di antara gedung.

Penelitian yang dilakukan oleh Jeongsu et al. adalah penelitian mengenai turbin angin terintegrasi gedung [4]. Penelitian ini menggunakan pengarah aliran (*guide vanes*) yang dapat mengumpulkan angin untuk meningkatkan kecepatannya dan sebuah rotor dengan bentuk tertentu untuk

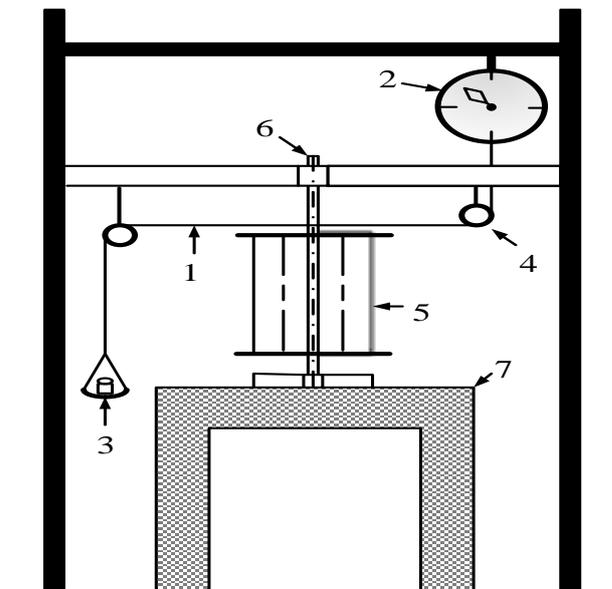


Gambar 2. Skema Eksperimental (dalam mm).

kondisi tertentu. Beberapa desain untuk pengarah aliran diteliti. Analisis komputasi fluida dinamis dilakukan untuk menentukan konfigurasi optimal dari sistem yang diajukan. Pada dasarnya, penelitian ini meneliti dua desain, pertama adalah desain pengarah aliran dan yang kedua adalah desain dari rotor. Hasil dari penelitian ini adalah pengarah aliran untuk rotor dengan diameter 30 cm memiliki performa terbaik dan rotor dengan jumlah sudu delapan memiliki performa terbaik. Koefisien daya yang dihasilkan adalah sebesar 0,381.

Penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al. adalah studi eksperimental untuk meningkatkan performa dari turbin angin savonius dengan mengubah geometri dari turbin [5]. Variasi geometri yang dilakukan adalah jumlah sudu, yaitu dua, tiga, dan empat; jumlah *stages* turbin, yaitu satu dan dua *stage*; *overlap ratio* (β), yaitu 0, 0.2, 0.25, 0.3, dan 0.35; *aspect ratio* (α), yaitu 0.5, 1, 2, 4, dan 5; serta dengan atau tanpa menggunakan *end plates*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa turbin dengan dua sudu lebih efisien dari sudu tiga dan empat. Selain dari itu performa turbin dengan *double stage rotors* lebih baik dari pada *single stage rotor*. Rotor tanpa rasio *overlap* lebih baik dalam beroperasi daripada dengan rasio tersebut. Kesimpulan terakhir adalah koefisien daya meningkat seiring dengan meningkatnya *aspect ratio*.

Penelitian yang dilakukan oleh Mao et al. adalah penelitian terkait turbin angin terintegrasi dengan dinding [6]. Penelitian ini membahas mengenai performa dari turbin angin Savonius yang diletakkan pada sudut-sudut dari bangunan tinggi. Metode komputasi fluida dinamis bersifat transien dilakukan untuk menginvestigasi performa dari turbin dan interaksi aliran di antara turbin dan bangunan. Tiga parameter yang diteliti adalah celah turbin, sudut angin, dan pengaruh turbin lainnya. Variasi dari torsi turbin dan daya dibawah kondisi operasi yang berbeda dievaluasi dan dijelaskan secara mendalam. Hasil dari penelitian ini adalah turbin angin Savonius yang diletakkan pada sudut bangunan memiliki nilai koefisien daya yang lebih baik dari turbin yang hanya dialiri aliran seragam. Nilai C_p dibawah 360° sudut angin adalah sebesar 92,5%, dan aliran di sekitar bangunan juga memiliki efek terhadap performa turbin. Performa turbin angin Savonius dievaluasi pada sudut datang angin 270° dan 0° . Berdasarkan analisis turbin yang dilakukan, performa turbin dapat dibagi menjadi dua grup berdasarkan arah angin. Grup satu adalah performa turbin angin yang dipengaruhi sudut angin dari 90° hingga 300° . Grup ini menghasilkan



Gambar 3. Skema Brake Dynamometer.

Keterangan:

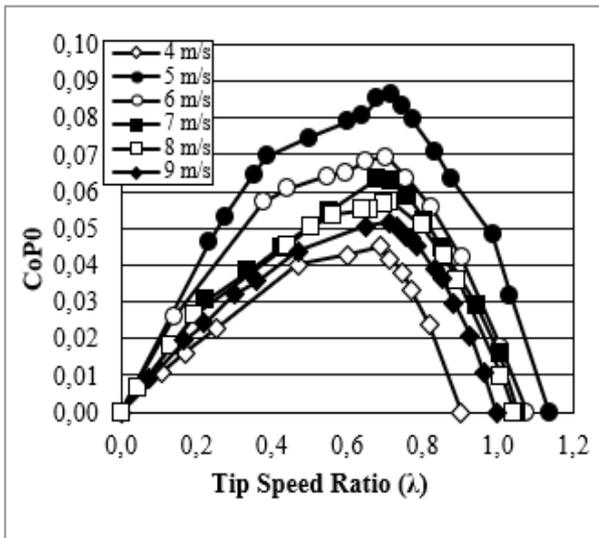
1. Benang
2. Neraca Pegas
3. Massa pemberat
4. Katrol
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

output yang hampir sama dengan sudut angin 270° yaitu nilai $C_p = 0,2418$. Group dua adalah performa turbin pada sudut angin $330^\circ, 0^\circ, 30^\circ$, dan 60° . Sudut ini menghasilkan nilai C_p sebesar 0,1822 yang sama dengan nilai C_p pada sudut 0° . Selain dari itu, pada penelitian ini didapatkan kontur kecepatan angin di sekitar gedung. Pada penelitian dapat diketahui bahwa ketika gedung dikenai angin, maka akan terbentuk beberapa daerah [6]. Dua daerah yang penting untuk diketahui adalah *high velocity region* dan *low velocity region*. Daerah *high velocity region* adalah daerah dimana kecepatan angin lebih tinggi dibandingkan kecepatan angin *freestream*. Sedangkan daerah *low velocity region* sebaliknya. Pada daerah *low velocity region*, terdapat vorteks arah *clockwise* dan *counter-clockwise*

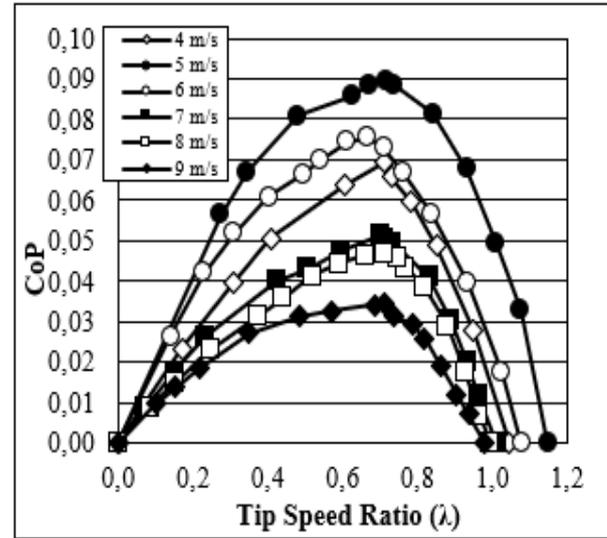
Dari beberapa penelitian diatas, dapat diketahui bahwa penelitian mengenai peletakkan turbin pada gedung perlu dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh peletakkan sudu *advancing blade* pada dinding gedung dengan jarak $G/D=1,335$ dengan variasi kecepatan angin dari 4 m/s-9m/s. Selain dari itu, jarak pusat turbin ke depan gedung (S) dijaga konstan yaitu dengan $S/D=4,91$; serta jarak dari atas dinding bangunan ke *endplate* atas turbin (T) dijaga konstan dengan $T/D=1,16$ dan jarak dari bawah dinding gedung ke bagian bawah *endplate* turbin (K) dijaga konstan pada $K/D=1,16$. Nilai yang akan diukur adalah torsi dinamis, torsi statis, *Coefficient of Power* (C_p), *Coefficient of Moment* (C_M), dan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}).

II. METODE PENELITIAN

Ekperimen ini akan dilakukan dengan pengambilan data turbin tanpa dinding dan turbin dengan dinding. Nilai yang diukur adalah torsi dinamis, torsi statis, *Coefficient of Power* (C_p), *Coefficient of Moment* (C_M), dan *Coefficient of Static*



Gambar 4. Grafik CoP_0 sebagai Fungsi dari $Tip\ Speed\ Ratio\ (\lambda)$ tanpa Dinding pada Setiap Variasi Kecepatan Angin.



Gambar 5. Grafik CoP sebagai Fungsi dari $Tip\ Speed\ Ratio\ (\lambda)$ dengan Dinding $G/D = 1,335$ pada Setiap [Variasi Kecepatan Angin.

Torque (C_{TS}). Skema topik penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Pada Gambar 1, terdapat beberapa istilah penting. Istilah itu meliputi densitas udara (ρ), kecepatan aliran udara (U), dan viskositas udara (μ), diameter sudu turbin (D), diameter *endplate* (D_0), tinggi turbin (H), dan panjang karakteristik turbin (L), jarak antara pusat turbin ke dinding samping bangunan (G), jarak pusat turbin ke dinding depan bangunan (S), jarak antara permukaan bawah *endplate* ke permukaan atas dasar penyangga turbin (K), dan jarak antara permukaan atas *endplate* ke bagian atas bangunan (T).

A. Skema Eksperimen

Gambar 2 ditunjukkan skema eksperimental dengan dengan peletakkan bangunan di dekat sudu *advancing* turbin angin Savonius. Dalam skema eksperimental ditunjukkan bahwa bangunan dan turbin angin Savonius sebagai alat uji. Toquemeter digunakan untuk mengukur torsi statis, anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Voltage regulator berguna untuk memberika input voltase listrik agar mendapatkan kecepatan angin yang diinginkan. Axial fan berguna untuk menghasilkan angin dan honeycomb yang berguna untuk menyalurkan aliran.

B. Benda Uji

Spesifikasi yang dimiliki oleh turbin angin Savonius yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- a. Material sudu turbin : Pipa PVC
- b. Material *end plate* : Aluminium clad 2024
- c. Diameter *blade* turbin (D) : 165,2 mm
- d. Tinggi turbin (H) : 303,4 mm
- e. Diameter turbin (L) : 303,4 mm
- f. Diameter poros turbin (b) : 19 mm
- g. Diameter *end plate* (D_0) : 321 mm
- h. Tebal *end plate* : 1 mm
- i. Tebal sudu turbin (x) : 4 mm

Spesifikasi yang dimiliki oleh bangunan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- a. Panjang : 1550 mm
- b. Lebar : 450 mm
- c. Tinggi : 705 mm
- d. Tebal : 12 mm

e. Material bangunan : Multiplex kayu

C. Alat Ukur

1) Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah poros turbin angin Savonius. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah tachometer OMEGA seri HHT12 dengan kemampuan pembacaan 0,05 rpm sampai 7,6 rpm seta akurasi pembacaan 0,01% ± 1 digit.

2) Anemometer

Anemometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan udara yang bangkitkan oleh axial fan. Anemometer yang digunakan pada penelitian ini adalah anemometer model OMEGA HHFF92A. alat ini mempunyai akurasi sebesar $\pm 0,01$ m/s.

3) Voltage regulator

Voltage regulator digunakan untuk mengatur dan mengukur besar keluaran tegangan yang berkaitan dengan kecepatan angin yang keluar dari axial fan. Kecepatan angin yang keluar dari axial fan dapat diperbesar dengan menaikkan tegangan dan kecepatan angin yang keluar dari axial fan dapat diperkecil dengan menurunkan tegangan. Voltage regulator yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe TDGC 2J-3.

4) Torquemeter

Torquemeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari poros turbin angin Savonius. Torque meter yang digunakan pada penelitian adalah *Torque meter* LUTRON model TQ-8800 dengan *high resolution* 0,1 N.cm.

5) Brake Dynamometer

Brake dynamometer digunakan untuk mengukur torsi dinamis dengan timbangan beban sebagai *spring balance*. Skema dan *free body diagram* dari *brake dynamometer* dapat dilihat pada Gambar 3.

D. Data Reduction

Eksperimen penelitian turbin angin Savonius dengan gedung dilakukan dengan memvariasikan kecepatan angin (U) sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Sehingga, bilangan

Reynolds yang didapatkan sebesar $7,6 \times 10^4$, $9,5 \times 10^4$, $11,4 \times 10^4$, $13,3 \times 10^4$, $15,2 \times 10^4$ dan $17,1 \times 10^4$. Bilangan Reynolds dihitung berdasarkan panjang karakteristik dan kecepatan angin yang diukur dengan menggunakan anemometer pada jarak 8D dari poros turbin yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$Re_L = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (1)$$

Dimana ρ adalah massa jenis udara bernilai $1,7096 \text{ Kg/m}^3$, U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* bernilai 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s, L adalah panjang karakteristik dari turbin ($L=2D-b-2x$) (m), D adalah diameter *blade* turbin (m), b adalah diameter poros turbin (m), x adalah tebal sudu turbin (m), dan μ adalah viskositas udara dengan nilai $1,86 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$.

Tip speed ratio (λ) dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

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

Dimana R adalah jari-jari turbin sebesar 0,1517 m, U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* sebesar 4-9 m/s, dan ω adalah kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s) yang dikalkulasikan dengan persamaan berikut:

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

Keterangan:

Nilai n diapat dari pengukuran menggunakan tachometer.

Torsi dinamis (τ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_D = \{[s - m] \cdot g\} \cdot r \quad (4)$$

Dimana s adalah pembacaan neraca pegas (Kg), m adalah massa yang ditanggung oleh poros turbin (Kg), g adalah percepatan gravitasi bumi dengan nilai $9,81 \text{ m/s}^2$, dan r adalah jari-jari poros turbin yang menerima beban sebesar 0,009625 m.

Coefficient of moment (C_M) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_M = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R} \quad (5)$$

Dimana T_D adalah torsi dinamis (N.m), ρ adalah massa jenis udara sebesar $1,7096 \text{ Kg/m}^3$, U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* sebesar 4-9 m/s, R adalah jari-jari turbin angin Savonius sebesar 0,1517 m, dan A adalah *cross sectional area* dialiri aliran angin yang berasal dari *axial fan* yang dapat dikalkulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = LH \quad (6)$$

Dimana L adalah panjang karakteristik turbin angin Savonius dengan nilai sebesar 0,3034 m, H adalah tinggi turbin angin Savonius dengan nilai sebesar 0303,4 m.

Coefficient of power (C_P) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_P = \frac{\{[(s - m)g] \cdot r \pi \cdot \omega\}}{15 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \quad (7)$$

Dimana s adalah pembacaan neraca pegas (Kg), m adalah massa beban yang ditanggung poros turbin (Kg), g adalah percepatan gravitasi bumi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$, r adalah jari-jari poros turbin yang menerima beban sebesar 0,009625 m, ω

adalah kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s), ρ adalah massa jenis udara sebesar $1,7096 \text{ Kg/m}^3$, A adalah luas *cross sectional* sebesar $0,089 \text{ m}^2$, dan U adalah kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* sebesar 4-9 m/s.

Data penelitian yang didapatkan akan digunakan untuk mendapatkan grafik *coefficient of moment* (C_M) terhadap *tip speed ratio* (λ), grafik *coefficient of moment* (C_M) terhadap *tip speed ratio* (λ), dan grafik torsi statis (T_s) terhadap sudut angular turbin angin Savonius (θ).

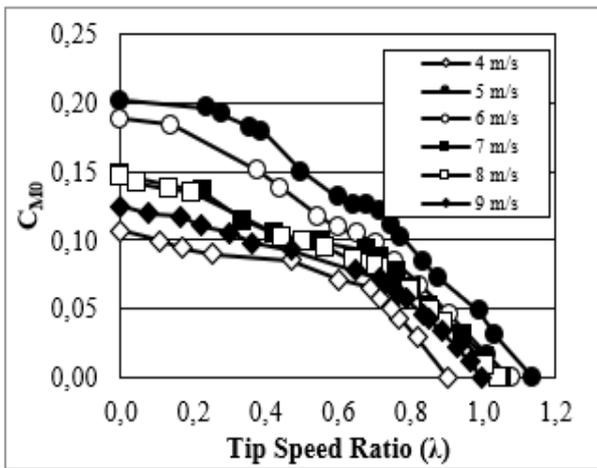
III. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisis *Coefficient of Power* (CoP)

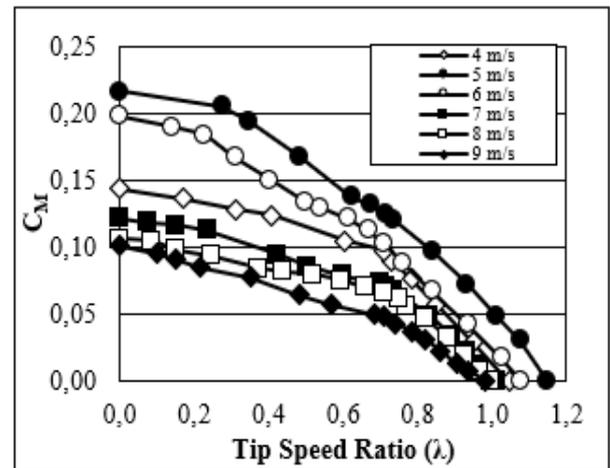
Nilai *coefficient of power* (CoP) akan ditampilkan dalam bentuk grafik CoP fungsi *tip speed ratio* (λ). Pengukuran torsi dinamis dan kecepatan sudut turbin dilakukan untuk turbin tanpa dinding dan turbin dengan dinding pada jarak $G/D=1,335$. Torsi dinamis dan kecepatan sudut turbin diukur pada setiap kecepatan angin yaitu 4, 5, 6,7,8 dan 9 m/s. Gambar 4 menunjukkan grafik *coefficient of power* (CoP₀) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) untuk turbin tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan angin. Sedangkan, Gambar 5 menunjukkan grafik *coefficient of power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) untuk turbin dengan dinding pada setiap variasi kecepatan anginn untuk jarak $G/D=1,335$. Pada kedua gambar tersebut grafik *coefficient of power* (CoP) memiliki bentuk parabolik. Hal tersebut diakibatkan karena terdapat dua variabel tidak diketahui pada persamaan CoP, yaitu torsi dinamis dan kecepatan sudut turbin.

Pada Gambar 4, turbin tanpa dinding memiliki nilai *coefficient of power* (CoP₀) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa turbin bekerja paling maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai *coefficient of power* (CoP₀) maksimum untuk setiap kecepatan adalah 0,0451 (untuk $U=4 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,687$); 0,0866 (untuk $U=5 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,717$); 0,0693 (untuk $U=6 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,704$); 0,0632 (untuk $U=7 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,678$); 0,0572 (untuk $U=8 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,715$); 0,0517 (untuk $U=9 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,712$). Berdasarkan Gambar 4, nilai CoP₀ maksimum dari yang terendah ke yang tertinggi berdasarkan kecepatan angin adalah 4 m/s, 9 m/s, 8 m/s, 7m/s, 6 m/s dan 5 m/s. Penurunan nilai CoP₀ pada kecepatan angin 5 m/s hingga 9 m/s diakibatkan adanya kerugian mekanis dan efek *solidwall*. Efek *solidwall* adalah fenomena dimana turbin berputar terlalu cepat dan bertindak seolah-olah seperti tembok.

Pada Gambar 5, turbin dengan dinding ($G/D=1,335$) memiliki nilai *coefficient of power* (CoP) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa turbin bekerja paling maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai *coefficient of power* (CoP) maksimum untuk setiap kecepatan adalah 0,0692 (untuk $U=4 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,710$); 0,0897 (untuk $U=5 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,714$); 0,0755 (untuk $U=6 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,668$); 0,0513 (untuk $U=7 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,700$); 0,0468 (untuk $U=8 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,709$); 0,0344 (untuk $U=9 \text{ m/s}$ dan $\lambda=0,710$). Berdasarkan Gambar 5, nilai CoP maksimum dari yang terendah ke yang tertinggi berdasarkan kecepatan angin adalah 9 m/s, 8 m/s, 7m/s, 4 m/s, 6 m/s dan 5 m/s. Nilai *coefficient of power* (CoP) kecepatan 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s mengalami peningkatan dari nilai CoP₀ sebesar 53,44%, 3,58% dan 8,95%, masing-masing.



Gambar 6. Grafik C_{M0} sebagai Fungsi dari *Tip Speed Ratio* (λ) tanpa Dinding pada Setiap Variasi Kecepatan Angin.



Gambar 7. Grafik C_M sebagai Fungsi dari *Tip Speed Ratio* (λ) dengan Dinding $G/D = 1,335$ pada Setiap Variasi Kecepatan Angin.

Peningkatan tersebut dikarenakan turbin berada di daerah *high velocity region* berdasarkan pada penelitian [6]. Turbin yang berada di *high velocity region* akan meningkatkan nilai dari selisih torsi di sudu *advancing* dan sudu *returning*.

B. Analisa Coefficient of Moment (C_M)

Nilai dari *coefficient of moment* (C_M) berupa grafik C_M fungsi *tip speed ratio* (λ). Nilai ini diambil dari torsi dinamis yang diukur dengan menggunakan *brake dynamometer*. Torsi dinamis diukur untuk turbin tanpa dinding dan turbin dengan dinding ($G/D=1,335$) pada setiap variasi kecepatan. Kedua nilai tersebut menghasilkan grafik C_M untuk turbin tanpa dinding dan dengan dinding. Gambar 6 menunjukkan grafik C_M turbin tanpa dinding. Sedangkan, Gambar 7 menunjukkan grafik C_M dengan dinding pada $G/D=1,335$. Bentuk dari grafik C_M fungsi λ adalah linear. Hal tersebut dikarenakan hanya terdapat satu variabel yang tidak diketahui pada persamaan C_M . Nilai C_M maksimum didapatkan saat turbin berhenti berputar akibat penambahan beban untuk setiap variasi kecepatan angin atau saat *tip speed ratio* (λ) sama dengan 0.

Pada Gambar 6, turbin tanpa dinding memiliki nilai *coefficient of moment* (C_{M0}) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa turbin bekerja paling maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai *coefficient of moment* (C_{M0}) maksimum untuk setiap kecepatan adalah 0,1070 (untuk $U=4$ m/s dan $\lambda=0$); 0,2013 (untuk $U=5$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1882 (untuk $U=6$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1477 (untuk $U=7$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1460 (untuk $U=8$ m/s dan $\lambda=0$) dan 0,1244 (untuk $U=9$ m/s dan $\lambda=0,712$). Berdasarkan Gambar 6, nilai *coefficient of moment* (C_{M0}) maksimum dari yang terendah ke yang tertinggi berdasarkan kecepatan angin adalah 4 m/s, 9 m/s, 8 m/s, 7 m/s, 6 m/s dan 5 m/s. Penurunan nilai *coefficient of moment* (C_{M0}) pada kecepatan angin 5 m/s hingga 9 m/s diakibatkan adanya kerugian mekanis dan efek *solidwall*. Efek *solidwall* adalah fenomena dimana turbin berputar terlalu cepat dan bertindak seolah-olah seperti tembok

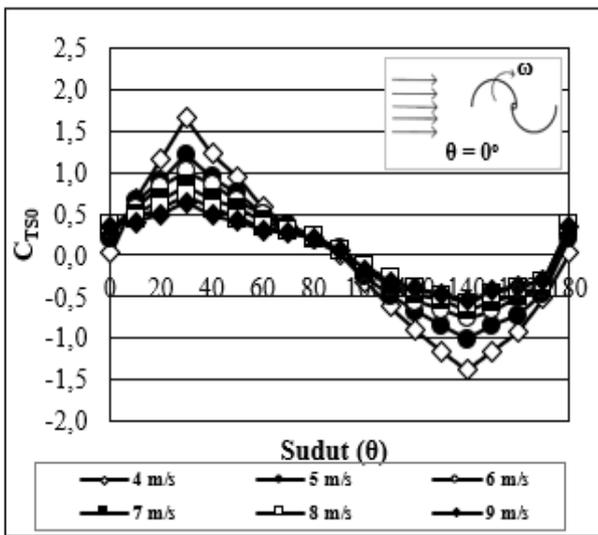
Pada Gambar 7, turbin dengan dinding ($G/D=1,335$) memiliki nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimum tertinggi pada kecepatan angin 5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa turbin bekerja paling maksimum pada kecepatan angin tersebut. Nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimum untuk

setiap kecepatan adalah 0,1435 (untuk $U=4$ m/s dan $\lambda=0$); 0,2163 (untuk $U=5$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1894 (untuk $U=6$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1214 (untuk $U=7$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1063 (untuk $U=8$ m/s dan $\lambda=0$); 0,1011 (untuk $U=9$ m/s dan $\lambda=0$). Berdasarkan Gambar 7, nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimum dari yang terendah ke yang tertinggi berdasarkan kecepatan angin adalah 9 m/s, 8 m/s, 7 m/s, 4 m/s, 6 m/s dan 5 m/s. Nilai *coefficient of moment* (C_M) kecepatan 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s mengalami peningkatan dari nilai *coefficient of moment* (C_{M0}) sebesar 34,11%; 7,45% dan 0,64%, masing-masing. Peningkatan tersebut dikarenakan turbin berada di daerah *high velocity region* berdasarkan pada penelitian [6]. Turbin yang berada di *high velocity region* akan meningkatkan nilai dari selisih torsi di sudu *advancing* dan sudu *returning*.

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

Pengambilan data torsi statis dilakukan untuk turbin tanpa dinding dan turbin dengan dinding ($G/D=1,335$) untuk kecepatan angin 4, 5, 6, 7,8 dan 9. Torquemeter digunakan untuk mengukur nilai selisih torsi pada sudu *advancing* dan sudu *returning* saat turbin angin Savonius tidak berputar. Pengukuran torsi statis sebagai fungsi sudut sudu turbin ini dilakukan berdasarkan konfigurasi sudut sudu turbin (θ) yang terlihat pada Gambar 8 dan Gambar 9. Data torsi statis akan diolah menjadi grafik *coefficient of static torque* (C_{TS}) fungsi sudut sudu turbin (θ). Gambar 8 menunjukkan grafik *coefficient of static torque* (C_{TS0}) untuk turbin tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan angin. Sedangkan, Gambar 9 menunjukkan *coefficient of static torque* (C_{TS}) untuk turbin dengan dinding ($G/D=1,335$) pada setiap variasi kecepatan angin.

Pada Gambar 8, nilai *coefficient of static torque* (C_{TS0}) mengalami nilai positif dan negatif untuk setiap variasi kecepatan, yaitu *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif pada rentang sudut $0^\circ-90^\circ$ dan *coefficient of static torque* (C_{TS0}) negatif pada rentang sudut ($100^\circ-170^\circ$). Nilai *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif menunjukkan bahwa turbin angin Savonius memiliki kemampuan *self-starting* yang baik. Semakin besar nilai *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif maka akan semakin baik kemampuan *self-starting* turbin. Sedangkan, *coefficient of static torque* (C_{TS0}) negatif menunjukkan turbin memiliki kemampuan *self-starting* yang buruk pada sudut sudu turbin (θ) tersebut. Semakin besar nilai

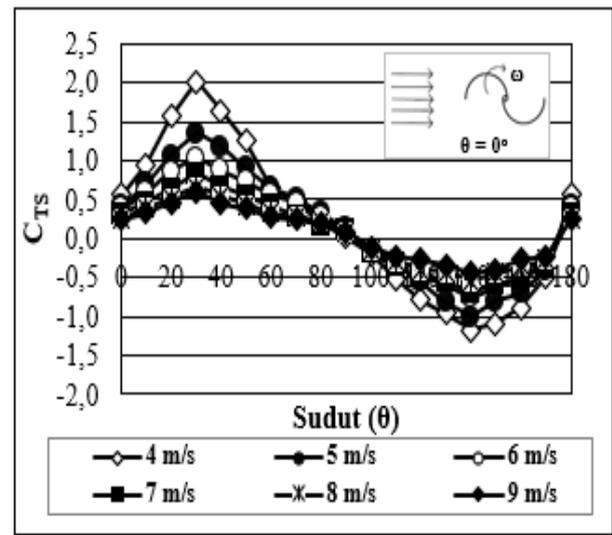


Gambar 8. Grafik C_{TS0} sebagai Fungsi dari Sudut Sudu Turbin (θ) tanpa Dinding pada Setiap Variasi Kecepatan Angin.

coefficient of static torque (C_{TS0}) negatif atau semakin mendekati nol nilai *coefficient of static torque* (C_{TS0}), maka kemampuan *self-starting* turbin akan semakin baik. Nilai *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif maksimum didapatkan pada sudut 30° untuk setiap variasi kecepatan, sedangkan nilai *coefficient of static torque* (C_{TS0}) negatif maksimum didapatkan pada sudut 140° untuk setiap variasi kecepatan.

Nilai dari *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif maksimum, untuk turbin tanpa dinding, pada setiap variasi kecepatan adalah 1,65 ($U=4$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 1,21 ($U=5$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 1 ($U=6$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,84 ($U=7$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,72 ($U=8$ m/s dan $\theta=30^\circ$) dan 0,64 ($U=9$ m/s dan $\theta=30^\circ$). Sedangkan nilai dari *coefficient of static torque* (C_{TS0}) negatif maksimum untuk turbin tanpa dinding pada setiap variasi kecepatan adalah -1,38 ($U=4$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -1,01 ($U=5$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,75 ($U=6$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,66 ($U=7$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,58 ($U=8$ m/s dan $\theta=140^\circ$) dan -0,54 ($U=9$ m/s dan $\theta=140^\circ$). Nilai dari *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif maksimum tertinggi ada pada kecepatan angin 4 m/s. Sedangkan, nilai dari *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif maksimum tertinggi ada pada kecepatan angin 9 m/s.

Pada Gambar 9, nilai dari *coefficient of static torque* (C_{TS}) positif maksimum, untuk turbin dengan dinding ($G/D=1,335$), pada setiap variasi kecepatan adalah 2,01 ($U=4$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 1,35 ($U=5$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 1,04 ($U=6$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,83 ($U=7$ m/s dan $\theta=30^\circ$); 0,66 ($U=8$ m/s dan $\theta=30^\circ$) dan 0,61 ($U=9$ m/s dan $\theta=30^\circ$). Sedangkan nilai dari *coefficient of static torque* (C_{TS}) negatif maksimum, untuk turbin dengan dinding ($G/D=1,335$), pada setiap variasi kecepatan adalah -1,18 ($U=4$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -1,01 ($U=5$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,75 ($U=6$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,69 ($U=7$ m/s dan $\theta=140^\circ$); -0,54 ($U=8$ m/s dan $\theta=140^\circ$) dan -0,45 ($U=9$ m/s dan $\theta=140^\circ$). Kecepatan angin untuk menghasilkan nilai *coefficient of static torque* (C_{TS}) positif maksimum tertinggi untuk turbin dengan dinding sama seperti *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif maksimum tanpa dinding yaitu pada kecepatan angin 4 m/s. Selain dari itu, nilai dari *coefficient of static torque* (C_{TS0}) positif maksimum tertinggi ada pada kecepatan angin 9 m/s.



Gambar 9. Grafik C_{TS} sebagai Fungsi dari Sudut Sudu Turbin (θ) dengan Dinding ($G/D=1,335$) pada Setiap Variasi Kecepatan Angin.

Peningkatan nilai C_{TS} negatif untuk turbin dengan dinding pada kecepatan angin 4,5, dan 6 m/s dikarenakan turbin berada di daerah *high velocity region*. Sedangkan, peningkatan C_{TS} negatif pada kecepatan angin 8 dan 9 diakibatkan karena turbin sudah berada di *low velocity region*. Dalam daerah *low velocity region*, terdapat vorteks berarah *clockwise* dan *counterclockwise* seperti pada kontur aliran di sekitar gedung pada penelitian [6]. Hal tersebut dapat meningkatkan nilai selisih torsi pada sudu *advancing* dan *returning*.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan Analisis dari hasil penelitian mengenai pengaruh peletakkan sudu *advancing* dekat dinding gedung pada jarak $G/D = 1,335$ dan dengan kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu: (1) Peletakkan sudu *advancing* dekat dinding gedung pada jarak $G/D = 1,335$ dapat meningkatkan nilai CoP sebesar 53,44%; 3,58%; dan 8,95% lebih besar dari turbin tanpa dinding pada kecepatan angin berturut-turut 4, 5, dan 6 m/s. Selain dari itu, nilai C_M juga meningkat sebesar 32,11%; 7,45%; dan 0,64% lebih besar dari turbin tanpa dinding pada kecepatan angin berturut-turut 4, 5, dan 6 m/s. (2) Peletakkan sudu *advancing* dekat dinding gedung pada jarak $G/D = 1,335$ dapat meningkatkan nilai C_{TS} positif lebih besar dari turbin tanpa dinding pada rentang sudut $0-90^\circ$ dan C_{TS} negatif maksimum pada rentang sudut $100-170^\circ$ saat kecepatan angin 4, 5, dan 6 m/s. (3) Peletakkan sudu *advancing* meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius pada sudut $0^\circ-180^\circ$ pada kecepatan angin 4, 5, dan 6 m/s. Hal tersebut ditandai dengan nilai C_{TS} positif dan negatif yang lebih besar nilainya dari C_{TS0} turbin tanpa dinding. Sedangkan pada sudut $90^\circ-170^\circ$, turbin mengalami peningkatan kemampuan *self-starting* saat kecepatan angin 4,5,6,8, dan 9 m/s. (4) Kecepatan angin 5 m/s merupakan kecepatan optimum untuk menghasilkan performa turbin terbaik. Nilai CoP maksimum tertinggi yang didapat pada nilai $G/D = 1,335$ ada pada kecepatan 5 m/s yaitu sebesar 0,0897 pada $\lambda = 0,714$. Sedangkan nilai C_M maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 5 m/s yaitu sebesar 0,2163 pada $\lambda = 0$. Nilai C_{TS} positif tertinggi berada pada kecepatan 4 m/s yaitu sebesar

2,01 pada sudut 30^0 . Sedangkan, nilai C_{TS} negatif tertinggi berada pada kecepatan angin 9 m/s yaitu sebesar -0,45 pada sudut 140^0 .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. L. Sawin *et al.*, "Renewables 2017 global status report," *J. Int. Nucl. Inf. Syst.*, 2016.
- [2] D. E. Nasional, "Indonesia energy out look 2019," *J. Chem. Inf. Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [3] M. Casini, "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56–65, 2016.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.