

Studi Eksperimen Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Returning Blade di Samping Gedung Pada Jarak $G/D=1,5769$ dari Dinding

Muhammad Naufal dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

Abstrak—Energi merupakan kebutuhan pokok bagi manusia pada zaman sekarang mulai dari kebutuhan rumah tangga sampai dengan kebutuhan di bidang industri. Ketersediaan cadangan batu bara akan habis dalam kurun waktu 71 tahun. Energi baru terbarukan dapat menjadi sebuah solusi untuk menangani masalah dan meispisnya cadangan batu bara, salah satunya pemanfaatan energi angin dengan turbin angin Savonius. Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius yang memiliki 2 sudu turbin dengan diameter sudu turbin (D) 165,2 mm, tinggi turbin (H) 294,4 mm, diameter poros (b) 19 mm, dan diameter end plates (D_0) 321 mm. Turbin diletakkan di samping kayu triplek sebagai model dinding bangunan dengan returning blade di sebelah dinding pada $G/D = 1,5769$. Variasi kecepatan angin yang digunakan yaitu 4 hingga 10 m/s. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah turbin angin Savonius dengan menggunakan dinding dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius pada kecepatan 5 hingga 10 m/s, dengan nilai coefficient of power tertinggi pada kecepatan 7 m/s sebesar 0,0386 pada TSR 0,459. Nilai coefficient of moment tertinggi pada kecepatan angin 7 m/s dengan nilai sebesar 0,1394. Penggunaan model dinding juga meningkatkan kemampuan self starting pada kecepatan 4 hingga 9 m/s, di mana nilai coefficient of static torque minimum mendekati nilai 0.

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

I. PENDAHULUAN

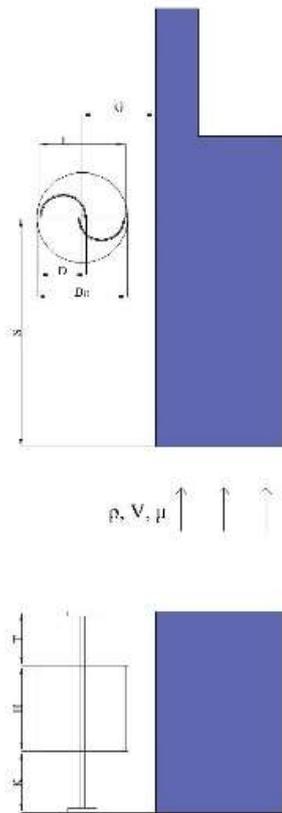
ENERGI merupakan kebutuhan pokok bagi manusia pada zaman sekarang mulai dari kebutuhan rumah tangga sampai dengan kebutuhan di bidang industri. Indonesia merupakan negara dengan jumlah penduduk yang sangat tinggi. Berdasarkan sensus penduduk pada tahun 2020, Indonesia memiliki jumlah penduduk sebesar 270,20 juta jiwa dengan luas daratan Indonesia sebesar 1,9 juta km². Laju pertumbuhan penduduk per Tahun selama 2010-2020 rata-rata sebesar 1,25% [1]. Dengan peningkatan jumlah penduduk maka kebutuhan energi juga akan semakin meningkat, salah satunya adalah energi listrik. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik negara Indonesia memiliki pembangkit dengan total kapasitas sebesar 66.607,8 MW, PLTU yang terpasang mencapai total sebesar 34.814,21 MW [2]. Dilihat dari bahan utama untuk menghasilkan listrik di Indonesia masih menggunakan sumber daya fosil dimana sumber daya tersebut semakin lama yang jumlahnya semakin berkurang, sedangkan permintaan akan energi listrik terus bertambah setiap tahunnya. Pada tahun 2018 cadangan batu bara Indonesia sebesar 38,89 miliar ton dengan potensi 151,40 miliar ton, dengan tingkat produksi batubara sekitar 558 juta ton per tahun, semua jenis cadangan batu bara akan habis dalam kurun waktu 71 tahun [3]. Disisi lain juga

penggunaan sumber daya fosil untuk menghasilkan energi listrik dapat menimbulkan masalah pada lingkungan dan juga energi yang lain. Maka dari itu, diperlukan sebuah perubahan untuk tidak menggunakan energi fosil melainkan menggunakan energi baru terbarukan (EBT).

Energi baru terbarukan (EBT) dapat menjadi sebuah solusi untuk menangani masalah dan meispisnya ketersediaan sumber daya fosil yang ada. EBT berasal dari alam dimana energi tersebut tidak akan habis selagi siklus alam masih berjalan. Disamping itu energi baru terbarukan juga ramah lingkungan dan tidak merusak keberadaan lingkungan disekitarnya. Indonesia sendiri kaya akan dengan potensi energi baru terbarukan yang belum bisa dimanfaatkan secara maksimal. Akan tetapi energi baru terbarukan memiliki beberapa kekurangan dalam hal energi yang dihasilkan masih sangat rendah jika dibandingkan dengan energi fosil. Sehingga peran pemerintah untuk membangun infrastruktur sektor pembangkit energi baru terbarukan sangat diperlukan. Hal ini dapat dilihat dari target pemerintah dengan peningkatan EBT ketenagalistrikan pada tahun 2025 yaitu sebesar 23% dan dengan adanya optimalisasi sumber daya EBT untuk pembangkit listrik, sehingga pada tahun 2050 mencapai target bauran EBT sebesar 31%. Indonesia memiliki potensi energi angin sebesar 60,6 MW [4]. Dalam pemanfaatan dan pengembangan energi baru terbarukan (EBT), Indonesia menurut letak geografisnya memiliki kecepatan angin berkisar 3 – 6 m/s sehingga pengembangan turbin angin skala kecil memiliki potensial untuk dikembangkan [5].

Penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan melakukan variasi geometri dari turbin [6], yaitu jumlah stage pada rotor, jumlah blade, keberadaan end plate, nilai overlap ratio, dan aspect ratio. Variasi geometri dalam eksperimana ini adalah jumlah blade yang digunakan adalah dua blade (2b), tiga blade (3b), dan empat blade (4b); jumlah stage (single dan double); overlap ratio sebesar 0, 0,2, 0,25, 0,3, dan 0,35; aspect ratio sebesar 0,5, 1, 2, 4, 5); dan keberadaan end plate. Kecepatan angin yang keluar dari wind tunnel adalah sebesar 0 – 13 m/s. Kesimpulan dari eksperimen yang dilakukan, didapatkan bahwa turbin angin dengan 2 blades lebih efisien dari pada 3 dan 4 blades. Turbin angin dengan double stages lebih efisien dibandingkan dengan single states dan penggunaan end plates memberikan performa yang lebih baik.

Penelitian tentang pemanfaatan sistem Building Intergrated Wind Turbine pada sebuah gedung bertingkat [7]. Penelitian ini mengusulkan sebuah inovasi Building Intergrated Wind Turbine (BIWT) dengan memanfaatkan area tidak terpakai dan tidak tersedia di semua sistem BIWT



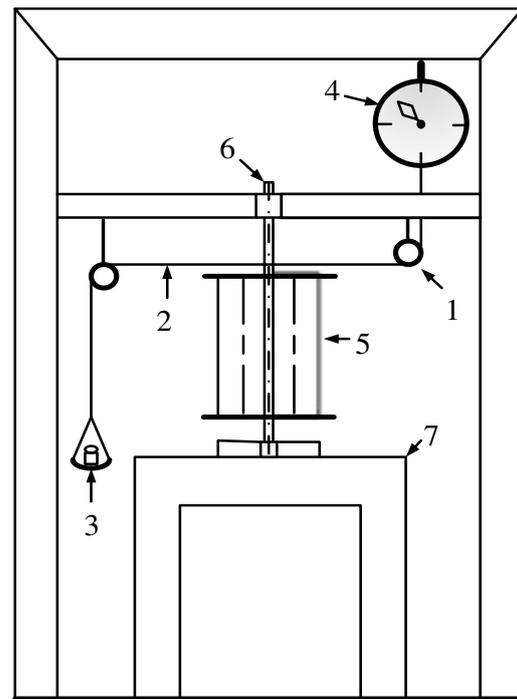
Gambar 2. Parameter penelitian.

Keterangan:

- ρ : Massa jenis udara (kg/m³)
- μ : Viskositas udara (Ns/m²)
- V : Kecepatan aliran udara (m/s)
- G : Jarak antara dinding terhadap poros turbin angin Savonius (m)
- S : Jarak antara depan dinding terhadap poros turbin angin Savonius (m)
- L : Diameter turbin angin Savonius (m)
- D : Diameter sudu turbin angin Savonius (m)
- Do: Diameter endplate (m)
- T : Jarak antara atas dinding terhadap endplate atas (m)
- H : Tinggi turbin angin Savonius (m)
- K : Jarak antara plat dasar penyangga turbin terhadap endplate bawah (m)

konvensional. Analisis dilakukan menggunakan software Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk mendapatkan desain akhir dari guide vane dan rotor. Selanjutnya dilakukan eksperimen dengan menggunakan wind tunnel test. Pada eksperimen ini didapatkan kesimpulan bahwa dari desain guide vane yang diusulkan adalah tipe 2 karena memiliki ruang di belakang guide vane yang lebih lebar dibandingkan dengan tipe 1, dengan diameter rotor sebesar 30 cm dan tipe blade F8 karena memiliki performa yang baik.

Penelitian tentang pemanfaatan tentang gedung tinggi sebagai potensi sumber energi baru terbarukan dengan aliran angin sebagai sumber energi [8]. Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan potensi pemanfaatan turbin angin Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) terhadap gedung tinggi dan juga menjelaskan tentang konsep Building Augmented Wind Turbine (BAWT) dalam penggunaannya sebagai sumber energi pada gedung tinggi. Dalam penelitian ini didapatkan hasil bahwa Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) yang berukuran kecil adalah salah satu solusi yang efektif untuk menggunakan energi baru terbarukan pada gedung tinggi. Dalam penerapannya ada beberapa hal yang harus



Gambar 1. Skema brake dynamometer.

Keterangan:

- 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

diperhatikan seperti lokasi yang optimal untuk pemasangan turbin, kondisi angin dan model turbin.

Penelitian tentang pemanfaatan aliran angin pada gedung [9]. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti performa turbin angin Savonius yang dipasang pada pojok atas gedung tinggi menggunakan metode numerik dengan menggunakan software Computational Fluid Dynamics (CFD). Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah gap antara turbin dengan gedung, pengaruh antara turbin yang berdekatan, dan arah aliran angin. Pada penelitian dapat disimpulkan bahwa Coefficient of Power (CoP) maksimum didapatkan pada celah turbin dan gedung sejauh 0,75 D. Kemudian pengaruh antar turbin dapat disimpulkan bahwa pada sisi kanan dan kiri Coefficient of Power (CoP) yang lebih besar dan nilai Coefficient of Power (CoP) maksimum yang didapatkan sebesar 1,2093 pada sisi kanan. Sudut angin memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya keluaran turbin. Coefficient of Power (CoP) rata-rata dari turbin di bawah sudut angin 3600 adalah 0,4256 dimana 92,5% lebih tinggi dari turbin beroperasi dalam kondisi uniform flow. Ini berarti turbin Savonius memiliki performa yang lebih baik jika dipasang pada sebuah bangunan.

Penelitian tentang studi eksperimen kinerja turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan gedung [10]. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penempatan turbin Savonius pada gedung tinggi dengan jarak (G/D) = 0,3329 dengan variasi kecepatan aliran angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s dan posisi dari advancing blade diletakkan di dekat gedung. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah perbandingan jarak dinding gedung dan poros turbin dengan diameter sudu turbin (G/D) yaitu sebesar 1,214, jarak

A. Peralatan dan Alat Ukur

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini :

1) Turbin Angin Savonius

Spesifikasi dari turbin angin Savonius yang digunakan :

1. Diameter Blade (D) : 165,22 mm
2. Tinggi Turbin (H) : 303,4 mm
3. Diameter Turbin (L) : 303,4 mm
4. Diameter Poros (b) : 19 mm
5. Diameter End Plates : 321 mm
6. Tebal End Plates : 1 mm
7. Tebal Blade Turbin : 4 mm
8. Material Blade Turbin : Pipa PVC
9. Material End Plates : Aluminium Cladding

2) Axial Fan

Axial fan berfungsi sebagai sumber aliran udara. Pada penelitian ini, axial fan yang digunakan adalah tipe CKE SF-45 H.

3) Honeycomb

Honeycomb merupakan alat yang digunakan untuk membuat aliran angin yang berasal dari axial fan menjadi aliran angin yang uniform.

4) Bearing

Bearing berfungsi sebagai tumpuan sebuah poros agar dapat berputar tanpa mengalami gesekan yang berlebihan dan bearing yang digunakan adalah SKF 3201 ATN9.

5) Voltage Regulator

Voltage regulator merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengatur besar kecilnya keluaran kecepatan aliran udara yang keluar dari axial fan dengan mengatur output tegangan yang dibutuhkan. Voltage regulator yang digunakan adalah tipe TDGC2-3kVA.

6) Anemometer

Anemometer merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Selain untuk mengukur kecepatan angin, anemometer dapat digunakan untuk mengukur suhu udara. Anemometer yang digunakan adalah tipe OMEGA HHH141.

7) Tachometer

Tachometer merupakan sebuah alat untuk mengukur kecepatan putaran dari sebuah objek yang berputar. Tachometer yang digunakan adalah tipe OMEGA HHT12.

8) Torque Meter

Torque meter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Torque meter yang digunakan adalah tipe LUTRON TQ-8800

9) Brake Dynamometer

Brake dynamometer merupakan sebuah alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis pada putaran suatu objek yang diuji. Pada sistem brake dynamometer hasil yang didapatkan berasal dari perhitungan selisih antara massa pemberat dengan nilai yang dibaca pada neraca pegas. Pada Gambar 2 menunjukkan skema instalasi brake dynamometer.

B. Metode Pengukuran

Skema dan instalasi peralatan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. Axial fan diletakkan di depan turbin angin Savonius sejauh 3200 mm serta menempatkan

honeycomb di depan axial fan sejauh 800 mm agar aliran angin yang mengalir menjadi *uniform*. Untuk mengatur kecepatan angin dari *axial fan* digunakan *voltage regulator*. Dinding yang terbuat dari kayu multiplek diletakkan di samping *returning blade* pada rasio $G/D=1,5769$. Kecepatan angin yang mengalir diukur dengan menggunakan *anemometer* yang diletakkan pada jarak 8D di depan turbin angin Savonius.

Hasil pengukuran berupa nilai torsi statis dan torsi dinamis yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai *coefficient of power*, *coefficient of moment* dan *coefficient of static torque*.

C. Perhitungan Performa Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini, turbin angin Savonius dialiri oleh aliran angin dengan variasi kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s atau jika dalam bilangan reynolds sebesar $7,7 \times 10^4$ hingga $19,2 \times 10^4$. Bilangan Reynolds dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Re_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (1)$$

Dimana ρ merupakan massa jenis udara (kg/m^3), U merupakan kecepatan aliran angin yaitu sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s, μ merupakan viskositas dinamis udara (N.s/m^2), L merupakan panjang karakteristik yang sama dengan diameter turbin angin Savonius yaitu $L=2D-b-2x$.

Daya teoritis atau daya *input* adalah daya yang dihasilkan oleh aliran angin, dapat dituliskan dengan persamaan berikut :

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (2)$$

Daya teoritis (P_W) memiliki satuan Watt, A merupakan luas penampang yang terkena angin serta dapat dituliskan dengan persamaan :

$$A = L \cdot H \quad (3)$$

Daya teoritis atau daya *output* adalah daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius, dapat dituliskan dengan persamaan berikut :

$$P_T = T_D \cdot \omega \quad (4)$$

Daya aktual (P_T) memiliki satuan Watt, ω merupakan kecepatan sudut turbin (rad/s) yang diukur menggunakan *tachometer*, T_D merupakan torsi dinamis yang dihitung menggunakan sistem *brake dynamometer* dengan satuan (N.m) dan dapat ditulis dengan persamaan :

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

Tip Speed Ratio (λ) merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial turbin angin Savonius dengan kecepatan angin, dapat ditulis dengan persamaan :

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

Dimana R merupakan jari-jari turbin angin Savonius (m).

Coefficient of Moment (C_M) merupakan perbandingan torsi dinamis turbin angin Savonius atau torsi *output* dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin atau torsi *input*. Dapat dituliskan dengan persamaan :

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

Coefficient of Power (C_P) merupakan perbandingan daya mekanis yang dihasilkan turbin angin Savonius atau daya *output* dengan daya kinetik yang dimiliki oleh angin atau daya *input*. Dapat dituliskan dengan persamaan :

$$C_P = \frac{|m-s|. g. r. \pi. n}{15. \rho. A. U^3} \quad (8)$$

Coefficient of Static Torque (C_{TS}) merupakan perbandingan torsi statis turbin angin Savonius atau torsi *output* dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin atau torsi *input*. Dapat dituliskan dengan persamaan :

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

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Pemasangan Dinding

Analisa performa turbin angin Savonius tanpa menggunakan model dinding bangunan perlu dilakukan sebagai pembanding terhadap performa yang dihasilkan serta efek yang ditimbulkan apabila diberi pemasangan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius.

1) Analisa Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius Tanpa Menggunakan Dinding Gedung Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio.

Pada Gambar 4 memperlihatkan grafik *coefficient of power* tanpa pemasangan dinding (C_{P0}) sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ) memiliki trendline berbentuk parabola menghadap ke bawah.

Pada Gambar 4 Nilai *coefficient of power* meningkat hingga titik tertentu yang mengindikasikan nilai *coefficient of power* maksimum kemudian menurun kembali. Nilai *coefficient of power* maksimum menunjukkan nilai *tip speed ratio* (λ) yang optimum. Maka, dengan meningkatnya nilai *tip speed ratio* (λ) akan meningkatkan nilai *coefficient of power* hingga mencapai nilai *coefficient of power* maksimum. Setelah itu nilai *coefficient of power* akan menurun seiring dengan bertambahnya nilai *tip speed ratio* (λ). Nilai *coefficient of power* maksimum bernilai 0,0318 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,459 dan berkecepatan angin 8 m/s.

Turbin angin Savonius akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang digunakan hingga pada kecepatan optimalnya. Karena semakin tinggi kecepatan yang digunakan, maka kecepatan putar turbin juga akan semakin meningkat sehingga nilai CoP yang terjadi juga semakin meningkat. Namun, apabila kecepatan yang digunakan terlalu tinggi, mengakibatkan putaran turbin yang terjadi akan sangat cepat dan turbin angin Savonius akan menjadi bersifat *solid wall*, dimana seolah olah aliran udara tidak dapat mengenai luasan sudu turbin. Sehingga, nilai CoP maksimum terjadi ketika berada pada kecepatan optimumnya.

Berdasarkan dari hasil grafik yang dihasilkan, dapat dilihat bahwa pada setiap variasi *Tip Speed Ratio* yang dihasilkan memiliki nilai CoP yang berbeda beda. Adapun rentang *Tip Speed Ratio* yang menghasilkan nilai CoP maksimum yaitu pada nilai 0,420 – 0,459. Variasi dari *Tip Speed Ratio* yang dihasilkan dipengaruhi oleh pembebanan yang dilakukan pada sistem *brake dynamometer*. Pembebanan dilakukan dengan memberikan beban secara perlahan untuk mengetahui

nilai *Tip Speed Ratio* optimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Namun, apabila pembebanan yang dilakukan terlalu besar. hal ini tentunya akan menimbulkan kerugian mekanis pada turbin angin Savonius dan menyebabkan performa turbin angin Savonius semakin menurun.

2) Analisa Coefficient of Momenet (Cm) Turbin Angin Savonius Tanpa Menggunakan Dinding Gedung Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio

Gambar 5 menunjukkan grafik *coefficient of moment* (C_M) turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ) dan dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Nilai *coefficient of moment* merupakan perbandingan antara torsi dinamis dari turbin angin Savonius dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin.

Grafik *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding (C_{M0}) sebagai fungsi dari *tip speed ratio* (λ) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 memiliki trendline yang menurun. Apabila semakin besar nilai *tip speed ratio* (λ) maka nilai *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius mengalami penurunan. Nilai *coefficient of moment* maksimum didapatkan pada saat *tip speed ratio* (λ) bernilai 0. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pembebanan maksimum pada *brake dynamometer*. Sedangkan apabila nilai *coefficient of moment* minimum, maka *tip speed ratio* (λ) bernilai maksimum. Hal tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat pembebanan pada *brake dynamometer*.

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai *tip speed ratio* mengalami peningkatan hingga kecepatan 8 m/s kemudian mengalami penurunan. Adanya perbedaan pada nilai *tip speed ratio* maksimum tersebut dikarenakan apabila kecepatan angin terlalu rendah, maka putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius juga rendah yang kemudian saat turbin angin Savonius diberi pembebanan akan menjadi cepat berhenti. Sedangkan apabila kecepatan angin yang tinggi akan timbul kerugian-kerugian mekanis serta akan terjadi efek *solid wall*. Efek *solid wall* tersebut akan membuat angin tidak dapat melewati sudu turbin dengan sempurna. Sehingga apabila diberikan pembebanan, maka turbin angin Savonius akan cepat berhenti.

3) Analisa Coefficient of Static Torque (CTS) Turbin Angin Savonius Tanpa Menggunakan Dinding Gedung Terhadap Fungsi Sudut Blade Turbin Angin Savonius

Gambar 6 menunjukkan grafik nilai *coefficient of static torque* turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding (C_{TS}) terhadap fungsi sudut sudu turbin angin Savonius (θ) serta dilakukan pada kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Pengukuran torsi statis dilakukan pada sudut sudu turbin (θ) 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° . Nilai *coefficient of static torque* (C_{TS}) merupakan perbandingan antara torsi statis yang dihasilkan pada turbin angin Savonius dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin.

Gambar 6 menunjukkan grafik *coefficient of static torque* turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding (C_{TS}) terhadap fungsi sudut sudu turbin angin Savonius (θ) memiliki trendline yang berbentuk sinusoidal. Torsi statis maksimum berada pada sudut sudu turbin (θ) sebesar 30° untuk semua kecepatan aliran angin, torsi statis minimum berada pada sudut *blade* turbin (θ) sebesar 130° untuk

kecepatan angin 5, 6, 7, 8, 9, 10 m/s dan pada sudut *blade* turbin (θ) sebesar 140° untuk kecepatan angin 4 m/s.

Pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa adanya peningkatan nilai *coefficient of static torque* pada sudut sudu turbin (θ) 0° hingga 30° dan pada 130° hingga 180° . Hal tersebut mengindikasikan bahwa terjadi peningkatan nilai torsi statis akibat gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat dan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang, sehingga selisih gaya *drag* tersebut akan meningkat dan torsi statis pun meningkat. Sedangkan dengan adanya penurunan nilai torsi statis pada 30° hingga 130° mengindikasikan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin, sehingga akan mengakibatkan menurunnya gaya *drag* pada *advancing blade* dan meningkatnya gaya *drag* pada *returning blade* karena sisi *returning blade* mendekati arah datangnya angin, kemudian selisih gaya *drag* tersebut akan menurun dan torsi statis pun menurun.

B. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Maksimum dengan dan Tanpa Pemasangan Dinding

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

Gambar 7 menunjukkan grafik nilai *coefficient of power* (CoP) maksimum tanpa dan dengan pemasangan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) yang dilakukan pada rasio $G/D=1,5769$ dan kecepatan angin 7 m/s.

Berdasarkan simulasi angin di sekitar sebuah gedung, pada $G/D=1,5769$ dan kecepatan angin 7 m/s dengan posisi *returning blade* di dekat dinding dan *returning blade* berada pada *low velocity region* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7 [9]. Pada daerah *high velocity*, aliran angin yang mengalir akibat defleksi mengalir begitu cepat sehingga aliran angin yang mengenai *advancing blade* membuat gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat. Dengan meningkatnya gaya *drag* yang terjadi pada *advancing blade*, maka torsi yang dihasilkan menjadi meningkat sehingga selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* pun meningkat. Sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius mengalami peningkatan apabila diberi peletakkan dinding di samping *returning blade*. Nilai *coefficient of power* maksimum dan *tip speed ratio* optimum, yaitu pada rentang nilai *tip speed ratio* sebesar 0,35 – 0,55 apabila dengan penempatan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada $G/D=1,5769$ serta pada rentang *tip speed ratio* sebesar 0,35 – 0,5 apabila tanpa adanya penempatan dinding.

2) Analisis Nilai Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius maksimum dengan dan tanpa Pemasangan Dinding (CoP_{max}) Terhadap Fungsi TSR

Gambar 8 menunjukkan grafik *coefficient of moment* (C_M) tanpa dan dengan pemasangan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada rasio $G/D=1,5769$ dan kecepatan angin 7 m/s.

Berdasarkan grafik pada Gambar 8 didapat bahwa nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimum pada turbin angin Savonius tanpa pemasangan dinding sebesar 0,0980 dan nilai *tip speed ratio* (λ) maksimum 0,830. Untuk nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimum pada turbin angin Savonius

dengan adanya pemasangan dinding sebesar 0,1394 dan nilai *tip speed ratio* (λ) maksimum sebesar 0,843. Nilai *coefficient of moment* (C_M) mengalami peningkatan sebesar 1,422 kali atau 42,2% apabila terdapat pemasangan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada saat $G/D=1,5769$ dan kecepatan angin sebesar 7 m/s. Dengan adanya peningkatan nilai *coefficient of moment* (C_M) membuktikan bahwa peletakkan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada rasio jarak $G/D = 1,5769$ dan kecepatan angin 7 m/s cukup efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment* (C_M) turbin angin Savonius.

Berdasarkan simulasi angin di sekitar sebuah gedung, pada $G/D=1,5769$ dan kecepatan angin 7 m/s dengan posisi *returning blade* di dekat dinding, diduga *advancing blade* berada dalam *high velocity region* [10]. Di mana pada daerah *high velocity*, aliran angin yang mengalir akibat defleksi mengalir begitu cepat yang kemudian menyebabkan putaran turbin angin Savonius dengan adanya penempatan dinding lebih cepat daripada tanpa adanya penempatan dinding. Sehingga dapat meningkatkan daya dari turbin angin Savonius dan memungkinkan dapat meningkatkan nilai *coefficient of moment*.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka didapatkan berupa kesimpulan mengenai pengaruh peletakkan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius pada perbandingan $G/D=1,5769$ dan pada variasi kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 m/s adalah sebagai berikut pada peletakkan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius dengan $G/D=1,5769$ dan pada kecepatan 7 m/s, didapat nilai *coefficient of power* (CoP) dan *coefficient of moment* (C_M) tertinggi apabila dibandingkan pada variasi kecepatan lainnya. Serta mampu memperbaiki kinerja turbin angin Savonius.

Nilai *coefficient of power* (CoP) tertinggi yaitu sebesar 0,0386 pada $\lambda = 0,459$ dengan kenaikan sebesar 26,59%, nilai *coefficient of moment* (C_M) tertinggi yaitu sebesar 0,1394 pada $\lambda = 0$ dengan kenaikan sebesar 42,2%, serta nilai *tip speed ratio* (λ) tertinggi yaitu sebesar 0,843 pada kecepatan angin 7 m/s.

Pada peletakkan dinding di samping *returning blade* turbin angin Savonius dengan $G/D=1,5769$ pada variasi kecepatan 4 hingga 9 m/s, nilai *coefficient of static torque* negatif mengalami peningkatan. Sehingga mampu untuk meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS RI, *Hasil Sensus Penduduk 2020*. Jakarta: Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, 2021.
- [2] BPS, *Neraca Energi Indonesia 2015-2019*. Jakarta: Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, 2020, ISBN: 0854-7068.
- [3] Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIPE), *Perspektif Teknologi Energi Indonesia*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2021, ISBN: 978-602-1328-20-0.
- [4] BPPT RI, *Outlook Energi Indonesia 2021*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2021.
- [5] Dewan Energi Nasional (DEN), *Indonesia Energy Outlook 2019*. Jakarta: Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Casini, "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56--65, 2016.
- [9] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *energies*, vol. 13, no. 10, 2020.
- [10] F. R. Refanio, "Studi Eksperimen Kinerja Turbin Angin Savonius yang Terintegrasi Dengan Gedung "Studi Kasus untuk Sudu Returning Dekat Dinding Gedung pada Jarak (G/D)= 1, 4558 dan dengan Kecepatan Angin (U)= 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 (m/s)," Departemen Teknik Mesin: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2022.