

Studi Eksperimental Efek Peletakan Sudu Returning Dekat Dinding pada Jarak $G/D = 1,4558$ terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius

Ferdy Rezka Refanio dan Tri Yogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

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

Abstrak—Laju pertumbuhan penduduk Indonesia dan konsumsi listrik nasional meningkat tiap tahunnya. Produksi listrik di Indonesia sebagian besar dihasilkan oleh pembangkit listrik berbahan bakar energi tak terbarukan yang semakin lama akan berkurang dan selain itu pembakarannya akan melepaskan gas CO₂ yang menyebabkan pemanasan global. Cara untuk mengurangi penggunaan energi tak terbarukan yaitu mengoptimalkan energi baru terbarukan seperti energi angin. Dengan kecepatan angin di Indonesia yang terbilang rendah, jenis turbin angin yang cocok adalah turbin angin Savonius. Turbin angin ini memiliki efisiensi yang rendah sehingga diperlukan penelitian untuk meningkatkan kinerjanya, salah satunya dengan mengintegrasikan turbin angin Savonius dengan gedung. Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius 2 sudu dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 165,2 mm. Jarak antara pusat poros turbin angin Savonius dengan dinding terhadap diameter sudu turbin (G/D) sebesar 1,4558. Variasi kecepatan aliran angin antara lain 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s. Dengan parameter tetap yang digunakan yaitu H/L = 1; S/D = 4,91; T/D = 1,16; dan K/D = 1,31. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah dengan peletakan dinding bangunan dekat *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio G/D = 1,4558 efektif dalam meningkatkan kinerja turbin angin Savonius pada kecepatan 9 dan 10 m/s peningkatan Cp maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 9 m/s dengan kenaikan sebesar 41,15%. Peningkatan Cm maksimum tertinggi terjadi pada kecepatan 10 m/s dengan peningkatan sebesar 22,75%. Adanya dinding bangunan dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius pada seluruh variasi kecepatan.

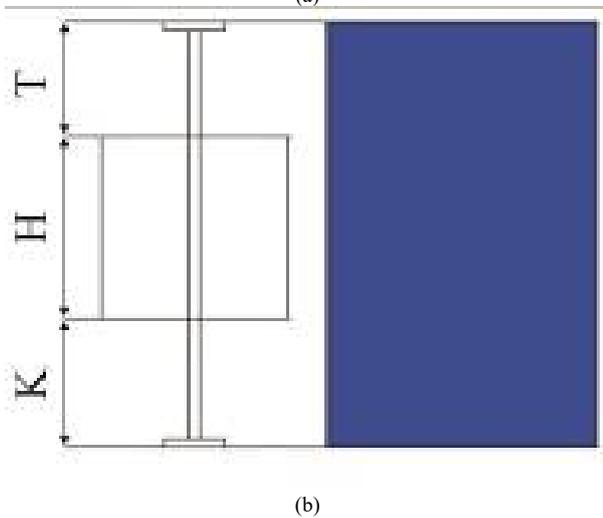
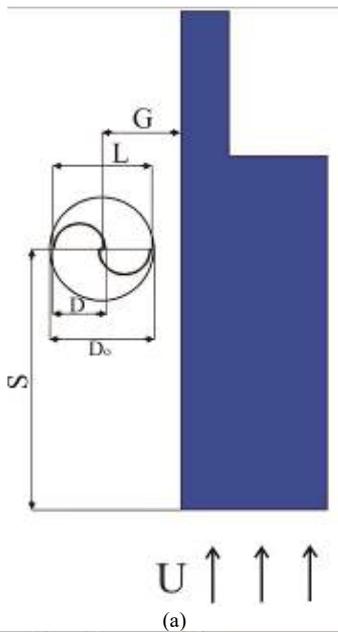
Kata Kunci—Turbin Angin Savonius, Dinding Bangunan, Kecepatan Angin, *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment*.

I. PENDAHULUAN

L AJU pertumbuhan penduduk Indonesia dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir (2010-2020) sebesar 1,25% per tahunnya. Pada bulan September tahun 2020, jumlah penduduk Indonesia sebanyak 270,2 juta jiwa. Jika dibandingkan dengan sepuluh tahun ke belakang (2010), terdapat penambahan jumlah penduduk sebanyak 32,56 juta jiwa atau rata-rata sebanyak 3,26 juta setiap tahunnya [1]. Dengan meningkatnya jumlah penduduk tiap tahunnya, konsumsi listrik nasional juga mengalami peningkatan. Pada tahun 2015, didapat konsumsi listrik sebesar 910 kWh per kapita. Kemudian meningkat pada tahun 2020 sebesar 1.089 kWh per kapita. Konsumsi listrik nasional pada tiap tahunnya akan mempengaruhi permintaan listrik. Konsumsi listrik meningkat, maka permintaan listrik juga meningkat. Pertumbuhan permintaan listrik diproyeksikan mencapai 2.214 TWh pada tahun 2050 dengan asumsi kondisi *Bussines*

as Usual. Laju pertumbuhan permintaan listrik rata-rata sebesar 7% per tahun selama 2018-2050 [2]. Kondisi ini juga akan meningkatkan produksi listrik. Pada tahun 2018, produksi pembangkit listrik di Indonesia mencapai 283,8 TWh yang dimana sebagian besar dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar energi tak terbarukan seperti batubara sebesar 56,4%, gas alam sebesar 20,4%, dan BBM hanya sebesar 6,3%, sementara 17,1% berasal dari energi baru terbarukan [2]. Melihat sebagian besar pembangkit listrik menggunakan bahan bakar energi tak terbarukan, maka semakin lama akan semakin berkurang bahan bakar tersebut karena jumlahnya yang terbatas. Selain itu, pembakarannya akan melepaskan gas karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer. Gas ini merupakan salah satu komponen Gas Rumah Kaca, yang dimana akan menyebabkan pemanasan global [3]. Penggunaan energi ini cukup mengkhawatirkan, maka dari itu dilakukan suatu cara untuk mengurangi penggunaan energi tersebut. Salah satu cara yang dilakukan adalah mengoptimalkan penggunaan energi baru terbarukan.

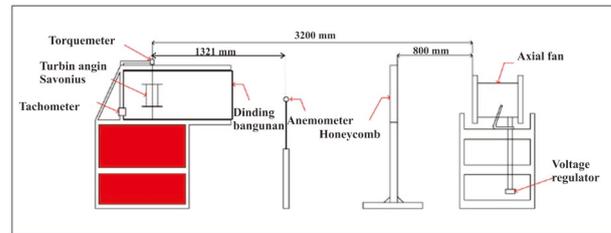
Energi baru terbarukan yang dapat dimanfaatkan salah satunya adalah energi angin dengan menggunakan turbin angin. Turbin angin digerakkan terlebih dahulu menggunakan energi angin, dan putaran poros turbin tersebut akan ditransmisikan ke generator listrik untuk menghasilkan energi listrik. Indonesia memiliki kecepatan angin yang rendah, yaitu berkisar antara 3-6 m/s. Jenis turbin angin yang sesuai dengan kondisi tersebut adalah turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius merupakan turbin angin yang berdimensi kecil dan berdasarkan posisi porosnya, turbin angin ini diklasifikasikan ke dalam *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Sudu turbin Savonius dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* memiliki bentuk cekung atau menghadap ke arah aliran angin, sedangkan *returning blade* memiliki bentuk cembung atau membelakangi arah aliran angin. Selisih gaya *drag* dari *advancing blade* dan *returning blade* akan menghasilkan torsi yang jika dikalikan dengan kecepatan sudut dari turbin angin, maka akan menghasilkan daya dari turbin angin tersebut. Selain dapat digunakan pada kondisi angin berkecepatan rendah, turbin angin Savonius juga memiliki kelebihan lain diantaranya konstruksi yang sederhana dan murah, tidak bergantung pada arah angin, dan cocok digunakan di daerah perkotaan dengan daya maksimal 20 kW. Namun turbin angin Savonius tentu memiliki kekurangan, yaitu memiliki efisiensi yang rendah. Sehingga banyak penelitian tentang turbin angin Savonius yang dikembangkan guna meningkatkan kinerjanya.



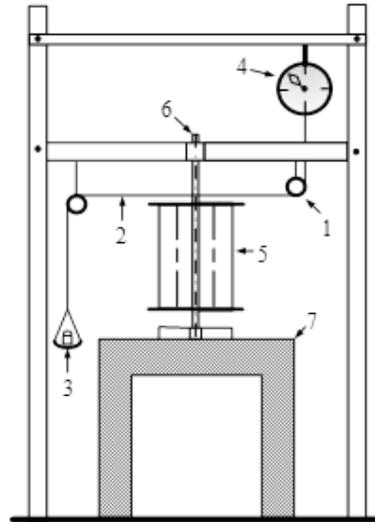
Gambar 1. Skema topik penelitian (a) tampak atas; (b) tampak depan.

Untuk mendapatkan daya yang maksimal, pemasangan turbin angin Savonius diletakkan pada bangunan tinggi. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan aliran angin bebas hambatan yang tidak berpengaruh oleh lingkungan sekitar seperti rumah-rumah, pepohonan, dan sebagainya dimana aliran angin pada tempat yang tinggi memiliki kecepatan yang relatif tinggi. Dengan memanfaatkan dinding bangunan yang tinggi, maka tidak perlu konstruksi penyangga pada turbin sehingga hal ini membuat pemasangan turbin angin Savonius pada bangunan bertingkat ini lebih praktis dan juga murah.

Penelitian terdahulu terkait meningkatkan performa turbin Savonius dengan memvariasikan geometrinya dilakukan oleh Mahmoud, dkk [4]. Geometri turbin Savonius yang divariasikan yaitu jumlah *blade*, jumlah *stage*, *overlap ratio*, *aspect ratio* dan pemberian *end plate*. Dari penelitian ini didapatkan bahwa turbin Savonius 2 *blade* memiliki efisiensi yang lebih baik dari pada turbin 3 *blade* dan 4 *blade*, turbin 2 *stage* memiliki performa lebih baik dari pada turbin *single stage*, turbin Savonius dengan *end plate* menghasilkan daya yang lebih tinggi dari pada turbin tanpa *end plate*, turbin tanpa *overlap* menghasilkan *power* yang lebih tinggi dari pada turbin dengan *overlap*, serta semakin tinggi *aspect ratio* maka semakin baik efisiensi yang dihasilkan turbin Savonius.



Gambar 2. Skema pengukuran.



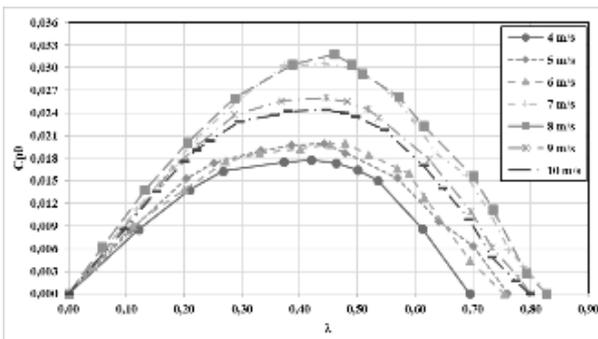
Gambar 3. Skema brake dyanometer.

- Keterangan :
- 1 = Katrol
 - 2 = Benang nilon
 - 3 = Pemberat
 - 4 = Neraca pegas
 - 5 = Turbin angin Savonius
 - 6 = Poros turbin angin Savonius
 - 7 = Penyangga turbin angin Savonius

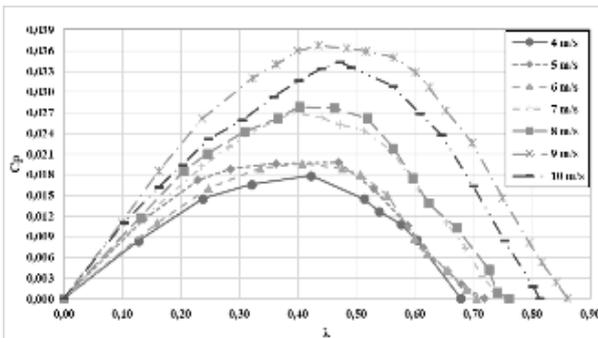
Penelitian mengenai pemasangan turbin Savonius pada dinding bangunan bertingkat tinggi dengan menggunakan *guide vane* dilakukan oleh Park, dkk [5]. Penelitian ini dilakukan dengan CFD untuk menentukan desain terbaik dari rotor dan *guide vane*. Dan didapatkan bahwa rotor tipe F dengan jumlah *blade* 8 serta *guide vane* tipe 2 yang memiliki *space* lebih besar, menghasilkan performa terbaik. Selanjutnya desain tersebut diujikan secara eksperimental dan didapatkan hasil bahwa penambahan *guide vane* mampu meningkatkan performa turbin Savonius.

Penelitian deskriptif mengenai bangunan yang terintegrasi dengan turbin (*Building Augmented Wind Turbine*) dilakukan oleh Casini [6]. Dari penelitian ini didapatkan 3 pemasangan turbin pada bangunan yaitu pemasangan turbin di dekat gedung (*roof top* atau *sides the building*) cocok digunakan turbin *vertical axis wind turbine* (VAWT), pemasangan turbin di antara dua bangunan cocok digunakan turbin jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan pemasangan turbin pada sebuah bangunan cocok digunakan turbin berukuran kecil.

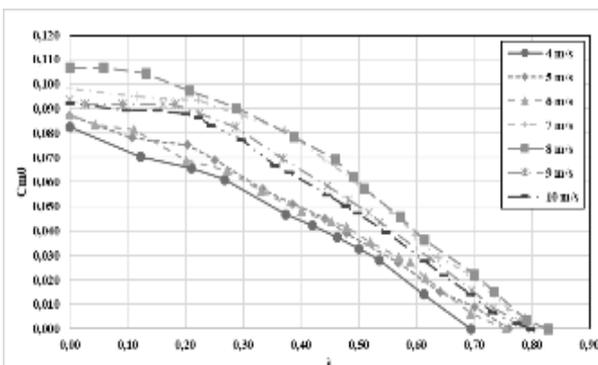
Penelitian mengenai analisis kinerja turbin angin Savonius yang dipasang di sudut gedung bertingkat tinggi dengan menggunakan simulasi CFD dengan mempertimbangkan beberapa parameter salah satunya yaitu dengan memvariasikan *turbine gap*. Variasi *turbine gap* yang digunakan yaitu 0,75D; 1,00D; 1,5D dan 2,00D, sedangkan D merupakan panjang karakteristik turbin yaitu sebesar 0,91 m. Hasil dari penelitian ini yaitu semakin besar *turbine gap*



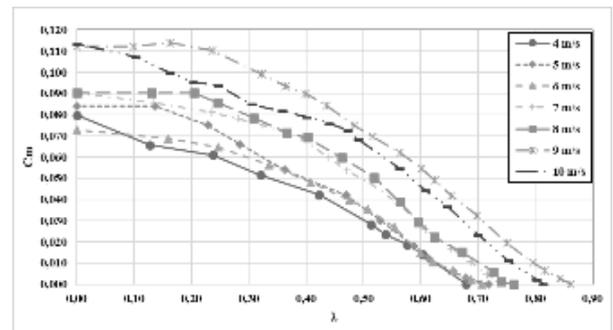
Gambar 4. Grafik C_{p0} fungsi λ pada kecepatan 4 – 10 m/s.



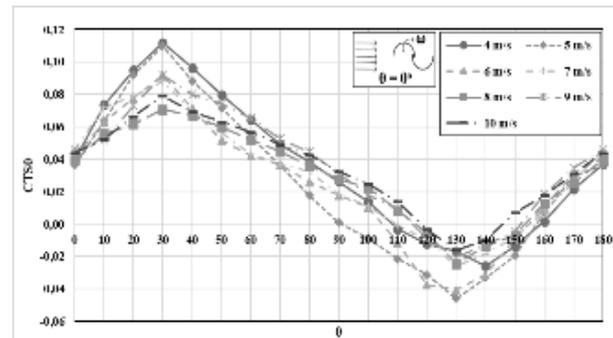
Gambar 5. Grafik C_p fungsi λ pada kecepatan 4 – 10 m/s.



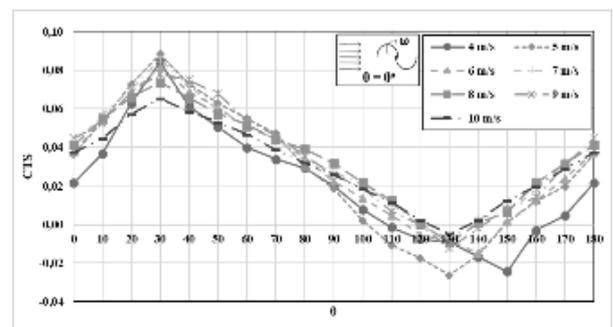
Gambar 6. Grafik C_{m0} fungsi λ pada kecepatan 4 – 10 m/s.



Gambar 7. Grafik C_m fungsi λ pada kecepatan 4 – 10 m/s.



Gambar 8. Grafik C_{TS0} fungsi θ pada kecepatan 4 – 10 m/s.



Gambar 9. Grafik C_{TS} fungsi θ pada kecepatan 4 – 10 m/s.

maka performa turbin akan semakin menurun, akan tetapi performanya masih lebih baik dibandingkan saat turbin beroperasi pada kondisi *uniform flow* [7].

Penelitian mengenai kinerja turbin angin Savonius yang terintegrasi dengan pada gedung dengan variasi kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s didapatkan bahwa peletakan sudu *advancing* di dekat dinding bangunan dengan rasio $G/D = 1,4558$ pada kecepatan aliran angin sebesar 5 m/s memiliki nilai *coefficient of power* (C_p) dan *coefficient of moment* (C_m) yang maksimum dengan nilai C_p sebesar 0,0825 dan C_m sebesar 0,2155. Pada kecepatan aliran angin sebesar 4 m/s memiliki nilai *coefficient of static torque* (C_{TS}) maksimum dengan nilai C_{TS} sebesar 1,667. Penelitian ini masih memiliki kelemahan, yaitu meletakkan sudu *advancing* di dekat gedung yang menyebabkan pada kecepatan tertentu sudu *advancing* akan tercelup di *low velocity region*. Hal ini terjadi karena defleksi arah angin yang disebabkan oleh dinding bagian depan gedung, sehingga mempengaruhi kecepatan aliran angin dan daya yang dihasilkan belum maksimal [8].

Dari penelitian-penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa masih perlu dilakukan penelitian lain mengenai performa turbin angin Savonius yang diletakkan di dekat dinding bangunan. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan model dinding

bangunan di dekat turbin Savonius. Dalam eksperimen ini digunakan turbin Savonius 2 *blade* dengan sudu *returning* berada di dekat dinding bangunan menggunakan rasio $G/D = 1,4558$. Kemudian diberikan variasi kecepatan angin yaitu 4; 5; 6; 7; 8; 9 dan 10 m/s.

II. METODE PENELITIAN

A. Skema Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan kinerja turbin angin Savonius tanpa dan dengan model dinding bangunan. Sudu *returning* berada di dekat dinding bangunan dengan jarak pusat poros turbin angin Savonius terhadap dinding bangunan (G) = 240,5 mm; jarak *end plate* bagian atas terhadap atap bangunan (T) = 191,6 mm; jarak *end plate* bagian bawah terhadap plat dasar penyangga turbin (K) = 216,4 mm; dan jarak pusat poros turbin terhadap muka depan bangunan (S) = 811,1 mm. Gambar 1 merupakan skema topik penelitian yang dilakukan, sedangkan Gambar 2 merupakan skema pengukuran.

B. Peralatan

Pada penelitian ini digunakan benda uji berupa turbin angin Savonius 2 *blade* dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm; diameter *end plate* (D_o) = 321 mm; tinggi turbin (H) = 303,4 mm; tebal sudu turbin (x) = 4 mm; dan tebal *end*

plate = 1 mm. Kemudian digunakan juga model dinding bangunan dengan dimensi panjang = 1550 mm; lebar = 450 mm; dan tinggi = 705 mm.

C. Alat Ukur

Penelitian ini menggunakan beberapa alat ukur antara lain tachometer OMEGA HHT12 yang digunakan untuk mengukur kecepatan putaran turbin; anemometer OMEGA HHH141A yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang dihasilkan oleh axial fan; voltage regulator TDGC 2J-3 untuk mengatur besar tegangan yang dibutuhkan untuk kecepatan tertentu; torquemeter LUTRON TQ-8800 untuk mengukur torsi statis; brake dynamometer untuk mengukur torsi dinamis, yang di dalamnya terdapat neraca pegas NAGATA untuk alat ukur massa pemberat yang ditambahkan. Skema brake dynamometer ditunjukkan oleh Gambar 3.

D. Perhitungan Data Penelitian

Nilai torsi yang didapat, digunakan untuk menghitung daya turbin (P_T) dengan rumus :

$$P_T = T_d \cdot \omega \tag{1}$$

Dimana T_d adalah torsi dinamis (N.m) dan ω adalah kecepatan putaran turbin (rad/s). Torsi dinamis didapatkan dengan rumus :

$$T_d = \{(s - m)g\} \cdot r \tag{2}$$

Dimana s adalah massa yang terbaca pada neraca pegas (kg), m adalah massa pemberat (kg), dan r adalah radius dari poros turbin yang menerima beban. Satuan kecepatan putaran turbin (ω) yang dibutuhkan adalah rad/s, sedangkan yang ditampilkan oleh tachometer adalah rpm. Sehingga perlu dikonversi dengan rumus :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \tag{3}$$

Dimana n adalah kecepatan putaran poros dalam rpm. Daya input berupa gaya kinetik dari angin tiap satuan waktu dihitung dengan rumus :

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \tag{4}$$

Dimana U adalah kecepatan angin (m/s), ρ adalah densitas udara (kg/m^3), dan A adalah cross sectional area (m^2) yang dihitung dengan rumus :

$$A = L \cdot H \tag{5}$$

Dimana L adalah panjang karakteristik turbin atau dapat ditulis dengan rumus (2D-b-2x) dimana D adalah diameter sudu turbin (m), b adalah diameter poros (m), x adalah tebal sudu turbin (m), sedangkan H adalah tinggi turbin (m). Sehingga coefficient of power (C_p) dapat dihitung dengan rumus :

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} = \frac{[(s-m)g] \cdot r \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3} \tag{6}$$

Coefficient of moment (C_m) merupakan perbandingan antara torsi dinamis dengan torsi teoritis. Torsi teoritis dapat dihitung dengan rumus :

$$T_t = \frac{P_w}{\omega} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot R \cdot U^2 \tag{7}$$

Dimana R adalah jari-jari turbin. sehingga C_m dapat dihitung dengan rumus :

$$C_m = \frac{T_d}{T_t} = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot R \cdot U^2} \tag{8}$$

Grafik C_p dan C_m merupakan fungsi dari tip speed ratio (λ), sehingga untuk mendapatkan λ digunakan rumus :

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U} \tag{9}$$

Coefficient of static torque (C_{TS}) merupakan perbandingan antara torsi statis dengan torsi teoritis, dapat dihitung dengan rumus :

$$C_{TS} = \frac{4T_s}{\rho \cdot A \cdot U^2 \cdot L} \tag{10}$$

III. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Coefficient of Power

Data yang diperoleh dari penelitian kemudian diolah dengan persamaan (6) sehingga didapatkan coefficient of power (C_p). Nilai C_p diperoleh dengan menggunakan brake dynamometer yang menghasilkan nilai torsi dinamis kemudian diubah menjadi daya turbin dan akan dibandingkan dengan nilai daya teoritis.

Gambar 4 merupakan grafik coefficient of power tanpa dinding (C_{p0}) fungsi tip speed ratio (λ) untuk kecepatan angin 4 – 10 m/s. Nilai C_{p0} maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,0318 pada λ sebesar 0,459 sehingga kecepatan 8 m/s dapat dikatakan sebagai kecepatan optimum. Untuk kecepatan 4 m/s didapatkan nilai $C_{p0 \text{ max}}$ sebesar 0,0177 pada λ sebesar 0,420; untuk kecepatan 5 m/s didapatkan nilai $C_{p0 \text{ max}}$ sebesar 0,0199 pada λ sebesar 0,442; untuk kecepatan 6 m/s didapatkan nilai $C_{p0 \text{ max}}$ sebesar 0,0200 pada λ sebesar 0,479; untuk kecepatan 7 m/s didapatkan nilai $C_{p0 \text{ max}}$ sebesar 0,0305 pada λ sebesar 0,443; untuk kecepatan 9 m/s didapatkan nilai $C_{p0 \text{ max}}$ sebesar 0,0260 pada λ sebesar 0,446; dan untuk kecepatan 10 m/s didapatkan nilai $C_{p0 \text{ max}}$ sebesar 0,0244 pada λ sebesar 0,445. Terlihat bahwa peningkatan kecepatan angin tidak selalu menyebabkan nilai C_{p0} meningkat.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa grafik C_{p0} berbentuk parabolik. Nilai C_{p0} yang dihasilkan akan meningkat hingga mencapai nilai C_{p0} maksimum pada λ tertentu dan akan turun setelah melewati λ optimumnya. Hal ini terjadi karena kecepatan angin yang semakin tinggi akan menyebabkan kerugian mekanis serta menyebabkan putaran turbin sangat cepat dan akan menimbulkan efek solid wall yang membuat aliran angin seolah-olah tidak menyentuh luasan sudu turbin. Namun apabila turbin beroperasi pada kecepatan yang rendah menyebabkan putaran turbin sangat rendah juga dan nilai C_p juga rendah.

Gambar 5 merupakan grafik coefficient of power dengan dinding (C_p) fungsi tip speed ratio (λ) pada G/D = 1,4558 untuk kecepatan angin 4 – 10 m/s. Nilai C_p maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 9 m/s sebesar 0,0367 pada λ sebesar 0,436 sehingga kecepatan 9 m/s dapat dikatakan sebagai kecepatan optimum. Untuk kecepatan 4 m/s didapatkan nilai $C_{p \text{ max}}$ sebesar 0,0179 pada λ sebesar 0,423; untuk kecepatan 5 m/s didapatkan nilai $C_{p \text{ max}}$ sebesar

0,0198 pada λ sebesar 0,470; untuk kecepatan 6 m/s didapatkan nilai C_p max sebesar 0,0196 pada λ sebesar 0,409; untuk kecepatan 7 m/s didapatkan nilai C_p max sebesar 0,0270 pada λ sebesar 0,392; untuk kecepatan 8 m/s didapatkan nilai C_p max sebesar 0,0279 pada λ sebesar 0,403; dan untuk kecepatan 10 m/s didapatkan nilai C_p max sebesar 0,0344 pada λ sebesar 0,472.

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa pada rentang λ optimum berada di λ sebesar 0,3 – 0,5 dimana pada rentang λ tersebut memiliki nilai C_p maksimum pada tiap kecepatan angin. Peningkatan nilai C_p maksimum terbesar dengan adanya dinding terdapat pada kecepatan 9 m/s dengan peningkatan sebesar 41,15%.

B. Analisis Coefficient of Moment

Data yang diperoleh dari penelitian kemudian diolah dengan persamaan (8) sehingga didapatkan *coefficient of moment* (C_m). Nilai C_m diperoleh dengan menggunakan brake dynamometer yang menghasilkan nilai torsi dinamis dan akan dibandingkan dengan nilai torsi teoritis.

Gambar 6 merupakan grafik *coefficient of moment* tanpa dinding (C_{m0}) fungsi *tip speed ratio* (λ) untuk kecepatan angin 4 – 10 m/s. Nilai C_{m0} maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,1067 pada λ sebesar 0 dan nilai C_{m0} maksimum terendah berada pada kecepatan 4 m/s sebesar 0,0826 pada λ sebesar 0.

Gambar 7 merupakan grafik *coefficient of moment* dengan dinding (C_m) fungsi *tip speed ratio* (λ) pada $G/D = 1,4558$ untuk kecepatan angin 4 – 10 m/s. Nilai C_m maksimum tertinggi didapatkan pada kecepatan 10 m/s sebesar 0,1133 pada λ sebesar 0 dan nilai C_m maksimum terendah berada pada kecepatan 6 m/s sebesar 0,0730 pada λ sebesar 0.

Dari kedua grafik *coefficient of power* fungsi *tip speed ratio* menunjukkan bahwa seiring meningkatnya nilai C_m maka nilai λ akan semakin menurun karena beban yang diberikan kepada poros semakin besar yang membuat selisih beban pada neraca pegas dengan beban yang diberikan semakin besar, sehingga nilai C_m akan meningkat.

C. Analisis Coefficient of Static Torque

Data yang diperoleh dari penelitian kemudian diolah dengan persamaan (10) sehingga didapatkan *coefficient of static torque* (C_{TS}). Nilai torsi statis diperoleh dengan cara mengukur menggunakan torquemeter pada sudut $0^\circ - 180^\circ$ dengan kenaikan tiap 10° . Pengambilan data dilakukan ketika turbin angin Savonius dalam keadaan diam dan poros turbin dicekam kemudian diberikan aliran angin sebesar 4 – 10 m/s. Nilai torsi statis kemudian akan dibandingkan dengan nilai torsi teoritis.

Gambar 8 merupakan grafik *coefficient of static torque* tanpa dinding (C_{TS0}) fungsi sudut *blade* turbin (θ) untuk kecepatan angin 4 – 10 m/s. Pada kecepatan 4 m/s memiliki nilai C_{TS0} max sebesar 0,1118 pada sudut 30° dan nilai C_{TS0} min sebesar -0,0260 pada sudut 140° ; pada kecepatan 5 m/s memiliki nilai C_{TS0} max sebesar 0,1097 pada sudut 30° dan nilai C_{TS0} min sebesar -0,0461 pada sudut 130° ; pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai C_{TS0} max sebesar 0,0919 pada sudut 30° dan nilai C_{TS0} min sebesar -0,0408 pada sudut 130° ; pada kecepatan 7 m/s memiliki nilai C_{TS0} max sebesar 0,0880 pada sudut 30° dan nilai C_{TS0} min sebesar -0,0260 pada sudut 130° ; pada kecepatan 8 m/s memiliki nilai C_{TS0} max sebesar 0,0708 pada sudut 30° dan nilai C_{TS0} min sebesar -0,0245 pada sudut

130° ; pada kecepatan 9 m/s memiliki nilai C_{TS0} max sebesar 0,0919 pada sudut 30° dan nilai C_{TS0} min sebesar -0,0206 pada sudut 130° ; dan pada kecepatan 10 m/s memiliki nilai C_{TS0} max sebesar 0,0791 pada sudut 30° dan nilai C_{TS0} min sebesar -0,0162 pada sudut 130° . Berdasarkan Gambar 8. dapat dilihat bahwa kecepatan 10 m/s memiliki kemampuan *self starting* terbaik karena memiliki nilai C_{TS0} negatif yang paling kecil.

Gambar 9 merupakan grafik *coefficient of static torque* dengan dinding (C_{TS}) fungsi sudut *blade* turbin (θ) pada $G/D = 1,4558$ untuk kecepatan angin 4 – 10 m/s. Pada kecepatan 4 m/s memiliki nilai C_{TS} max sebesar 0,0842 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} min sebesar -0,0245 pada sudut 150° ; pada kecepatan 5 m/s memiliki nilai C_{TS} max sebesar 0,0882 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} min sebesar -0,0265 pada sudut 130° ; pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai C_{TS} max sebesar 0,0817 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} min sebesar -0,0150 pada sudut 140° ; pada kecepatan 7 m/s memiliki nilai C_{TS} max sebesar 0,0855 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} min sebesar -0,0070 pada sudut 130° ; pada kecepatan 8 m/s memiliki nilai C_{TS} max sebesar 0,0735 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} min sebesar -0,0096 pada sudut 130° ; pada kecepatan 9 m/s memiliki nilai C_{TS} max sebesar 0,0780 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} min sebesar -0,0124 pada sudut 130° ; dan pada kecepatan 10 m/s memiliki nilai C_{TS} max sebesar 0,0652 pada sudut 30° dan nilai C_{TS} min sebesar -0,0049 pada sudut 130° . Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat bahwa kecepatan 10 m/s memiliki kemampuan *self starting* terbaik karena memiliki nilai C_{TS} negatif yang paling kecil.

Dari kedua grafik *coefficient of static torque* fungsi sudut *blade* turbin menunjukkan tren dimana nilai C_{TS} akan meningkat seiring dengan bertambahnya besar sudut turbin hingga mencapai sudut turbin tertentu, kemudian akan turun hingga pada sudut tertentu lalu akan naik lagi. Besarnya nilai C_{TS} negatif yang dihasilkan berbanding terbalik dengan kecepatan angin dimana nilai C_{TS} negatif akan semakin kecil seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang menyebabkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius semakin baik.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan atas adanya pengaruh peletakan dinding bangunan dekat sudut *returning* pada $G/D = 1,4558$ untuk variasi kecepatan 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s, antara lain nilai *coefficient of power* maksimum dengan peletakan dinding bangunan di dekat *returning blade* turbin angin Savonius dengan $G/D = 1,4558$ adalah sebesar 0,367 di $\lambda = 0,436$ pada kecepatan 9 m/s. nilai *coefficient of moment* maksimum didapatkan sebesar 0,1133 di $\lambda = 0$ pada kecepatan 10 m/s. Serta didapatkan juga nilai *coefficient of static torque* maksimum sebesar 0,0882 di sudut 30° pada kecepatan 5 m/s.

Peletakan dinding bangunan dekat *returning blade* turbin angin Savonius dengan $G/D = 1,4558$ dapat meningkatkan nilai *coefficient of power* maksimum pada kecepatan 9 m/s dengan kenaikan sebesar 41,15% dan nilai *coefficient of moment* maksimum pada kecepatan 10 m/s dengan kenaikan sebesar 22,75%.

Peletakan dinding bangunan dekat *returning blade* turbin angin Savonius dengan $G/D = 1,4558$ dapat meningkatkan

kemampuan *self starting* turbin angin Savonius pada seluruh variasi kecepatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS RI, *Hasil Sensus Penduduk 2020*. Jakarta: Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, 2021.
- [2] Dewan Energi Nasional (DEN), *Indonesia Energy Outlook 2019*. Jakarta: Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019.
- [3] S. Sulistyono, "Pemanasan Global (Global Warming) dan Hubungannya dengan Penggunaan Bahan Bakar Fosil," *Swara Patra : Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, Jakarta, 2012, ISSN: 2089-9572.
- [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] 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.
- [6] M. Casini, "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 56--65, 2016.
- [7] Z. Mao, G. Yang, T. Zhang, and W. Tian, "Aerodynamic performance analysis of a building-integrated savonius turbine," *energies*, vol. 13, no. 10, 2020.
- [8] K. S. Gandhini and T. Y. Yuwono, "Studi Eksperimental kinerja turbin angin savonius yang terintegrasi dengan gedung dengan posisi sudu advancing dekat dinding pada jarak $G/D = 1,4558$," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 2, pp. B119--B124, 2021.