

Studi Eksperimen Kineja Turbin Angin Savonius yang Terintegrasi dengan Gedung dengan Posisi Sudu Advancing Dekat Dinding pada Jarak $G/D = 1,214$

Fernaldo Aditya Kurniawan, dan Tri Yogi Yuwono
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

Abstrak—Pada Eksperimen ini, Turbin angin Savonius yang digunakan 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. Penelitian dilakukan dengan menggunakan kayu multiplek sebagai perwujudan gedung tinggi dengan sisi *advancing blade* dekat dengan dinding pada rasio jarak G/D 1,214. Variasi kecepatan yang digunakan yaitu 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah turbin angin Savonius dengan menggunakan dinding dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius pada kecepatan 4 m/s dengan nilai *Coefficient of Power* yang didapatkan sebesar 0,08 pada *Tip Speed Ratio* 0,677 dan *Coefficient of Moment* sebesar 0,1603 pada *Tip Speed Ratio* 0. Penggunaan model dinding juga meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius pada kecepatan 4-9 m/s dimana nilai *Coefficient of Static Torque* yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan turbin angin Savonius tanpa dinding.

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

I. PENDAHULUAN

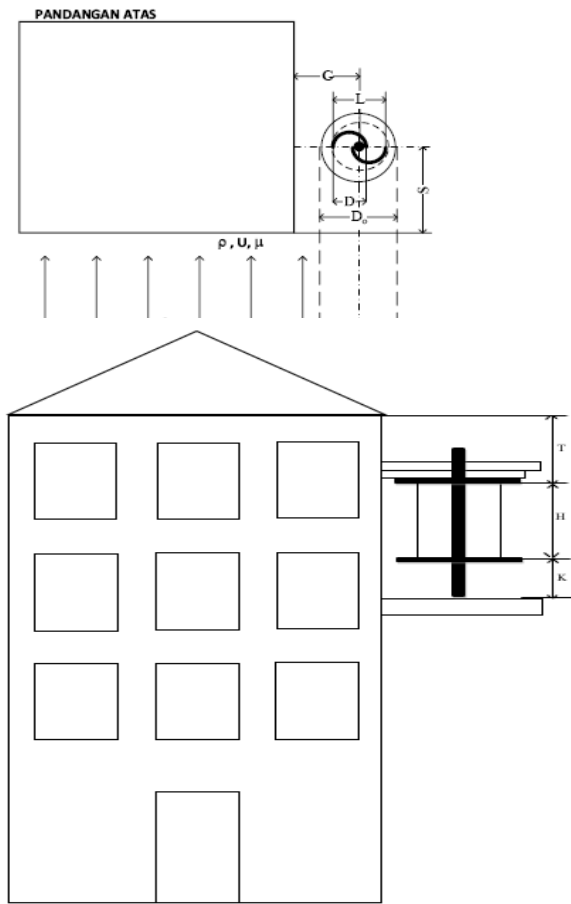
INDONESIA merupakan salah satu negara dengan jumlah penduduk yang besar di Asia Tenggara. Berdasarkan sensus penduduk pada tahun 2020, jumlah penduduk di Indonesia tercatat sebanyak 270,20 juta jiwa. Dengan luas daratan Indonesia sebesar 1,9 juta km^2 , maka kepadatan penduduk Indonesia sebanyak 141 jiwa per km^2 . Selama 10 tahun terakhir, rata-rata laju pertumbuhan penduduk Indonesia sebesar 1,25 persen [1]. Dengan kondisi peningkatan jumlah penduduk ini, tentunya akan mempengaruhi aktivitas ekonomi dan juga intensitas kebutuhan akan sumber energi di Indonesia, salah satunya adalah kebutuhan akan energi listrik. Pangsa kebutuhan akan energi listrik di Indonesia masih dominan yaitu sebesar 24,5%. Akan tetapi, sumber energi listrik yang ada pada saat ini masih berasal pada sumber daya fosil, seperti penggunaan batu bara. Sebagian besar pasokan batubara domestik digunakan untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar pembangkit listrik, sedangkan sisanya dipergunakan untuk bahan bakar industri. Kebutuhan akan batu bara pada pembangkit yang ada di Indonesia per tahun 2020 mencapai 95 juta ton dan diperkirakan akan terus meningkat hingga 4,7% per tahunnya [2].

Pemanfaatan batu bara sebagai bahan bakar sebuah pembangkit hingga saat ini masih mendominasi di Indonesia. Hal ini dapat dilihat jumlah pembangkit listrik tenaga uap

(PLTU) yang ada di Indonesia, pada tahun 2019 dari total pembangkit yang terpasang yaitu dengan kapasitas total 66.608 MW, PLTU yang terpasang di mencapai 34.814 MW. Kondisi ini tentunya membuat kebutuhan akan batu bara akan semakin meningkat. Kita tahu bahwa batu bara merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbaharui. Sehingga, ketersediaan akan batu bara pun semakin lama akan semakin habis jika terus menerus digunakan. Ketersediaan batu bara yang ada di Indonesia hingga pada tahun 2018 mencapai 39,89 miliar ton. Dengan tingkat produksi batu bara setiap tahun sekitar 558 juta ton, maka dapat diperkirakan semua jenis cadangan batu bara akan habis dalam kurun waktu 71 tahun. Jika pemanfaatan sumber energi fosil masih terus dominan, maka, kedepannya hal ini akan mempengaruhi kebutuhan akan energi bagi warga negara dan produksi energi pun akan berkurang jika sumber energi fosil ini semakin menipis ketersediaannya. Maka dari itu, perlu adanya sebuah perubahan dari penggunaan sumber energi fosil beranjak menuju sumber energi baru terbarukan (EBT).

Energi baru dan terbarukan (EBT) merupakan salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi dari menipisnya ketersediaan akan energi fosil yang ada. Energi baru dan terbarukan (EBT) juga merupakan sumber energi yang tidak akan pernah habis selama siklus alam masih tetap berlangsung. Selain itu, dalam penggunaannya untuk sebuah energi, efek yang dihasilkan juga ramah lingkungan dan tidak merusak keberadaan alam di sekitarnya. Potensi dari energi baru terbarukan (EBT) di Indonesia sendiri cukup besar. Dengan variasi jenis yang sangat beragam dan juga ketersediaan sumber daya alam yang melimpah, tentunya hal ini sangat mendorong Indonesia untuk beranjak menuju sumber energi baru terbarukan. Akan tetapi, keberadaan energi baru dan terbarukan masih memiliki beberapa kekurangan yaitu dalam hal energi yang dapat dihasilkan masih rendah dibandingkan dengan energi yang dihasilkan oleh sumber energi fosil. Maka dari itu, peran pemerintah dalam perwujudan sumber energi terbarukan sangatlah penting. Hingga saat ini peningkatan porsi EBT dalam membangun infrastruktur salah satunya pada sektor pembangkit listrik masih terus didorong. Hal ini dapat dilihat target pemerintah pada peningkatan EBT ketenagalistrikan pada tahun 2025 yaitu sebesar 23%. Sedangkan pada tahun 2050 harus mencapai target bauran EBT sebesar 31%.

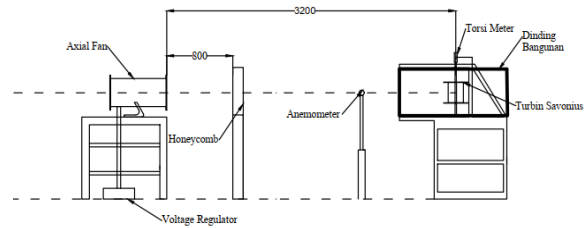
Dalam pengembangan sumber energi baru terbarukan, Indonesia memiliki potensi yang cukup besar, salah satunya yaitu pada pemanfaatan sumber energi angin. Kondisi angin yang ada di Indonesia memiliki kecepatan rata-rata 2,5 – 5,5



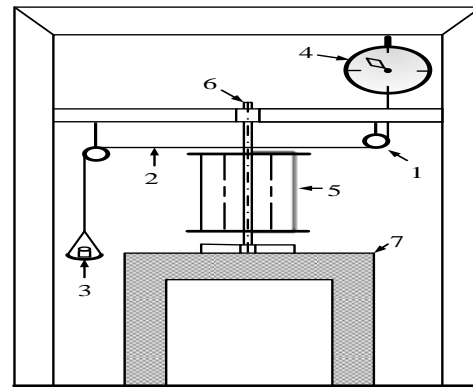
Gambar 1. Skema dan parameter penelitian.

m/s [3]. Kecepatan angin pada ketinggian tertentu memiliki potensi kecepatan yang lebih besar. Hal ini dikarenakan aliran angin bebas dari hambatan yang ada disekitarnya seperti pepohonan, perumahan, dan hambatan lainnya. Untuk itu, pemanfaatan energi angin pada kondisi ini memiliki peluang yang besar, salah satunya pemanfaatan sumber energi angin pada gedung tinggi. Gedung tinggi yang ada di Indonesia dapat dikatakan cukup banyak, terutama pada pulau Jawa. Akan tetapi, pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan listriknya masih sangat sedikit. Pemanfaatan sumber energi angin sebagai energi listrik dapat dilakukan dengan memanfaatkan turbin angin. Dengan kondisi kecepatan angin yang ada di Indonesia cukup rendah, turbin angin yang cocok adalah turbin angin Savonius.

Turbin angin Savonius merupakan salah satu turbin angin dengan poros vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*). Konstruksi dari turbin dibangun dengan dua blade yaitu *advancing blade*, yaitu sudu yang berbentuk cekung dan *returning blade*, yaitu sudu yang berbentuk cembung. Kedua blade ini dihubungkan dengan poros vertikal sebagai sumbu putarnya. Bentuk dari sudu turbin angin Savonius inilah yang menyebabkan turbin ini dapat menerima aliran udara dari segala arah. Cara kerja turbin jenis ini adalah dengan menerima gaya *drag* dari aliran angin yang menyebabkan terjadinya selisih torsi pada kedua sudu turbin, sehingga rotor turbin akan berputar. Beberapa keunggulan dari turbin angin Savonius adalah konstruksi yang dibuat sederhana dan murah, perawatan yang dilakukan sederhana, dan juga dapat bekerja pada rentang kecepatan angin yang rendah dimana



Gambar 2. Susunan skema penelitian.



Gambar 3. Skema *brake dynamometer*.

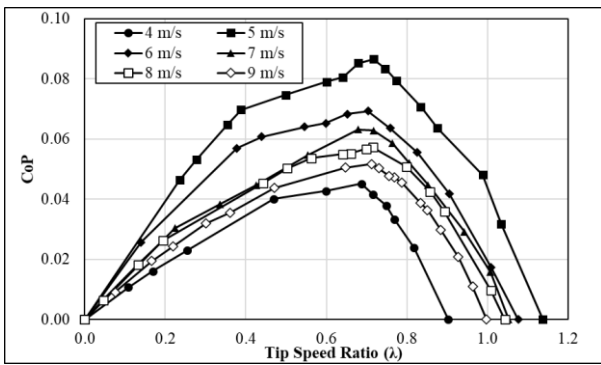
Keterangan:

1. Katrol
2. Benang Nylon
3. Pemberat
4. Neraca Pegas
5. Turbin Angin Savonius
6. Poros
7. Penyangga Turbin

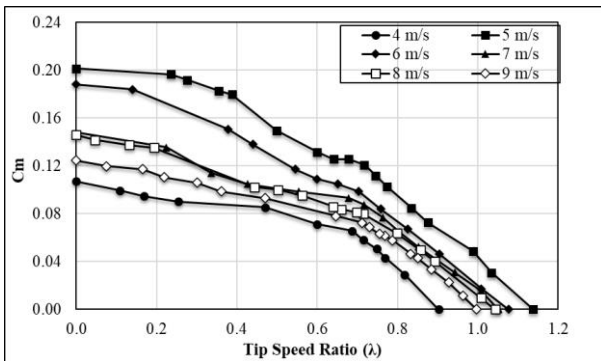
hal ini sangatlah cocok dengan kondisi angin yang ada di Indonesia. Akan tetapi, turbin angin Savonius juga memiliki kekurangan yaitu efisiensi yang dihasilkan masih sangat rendah dalam operasinya dibandingkan dengan turbin angin yang lainnya. Dengan melihat adanya peluang sumber energi pada gedung tinggi, tentunya hal inilah yang mendorong para peneliti untuk melakukan banyak penelitian dan eksperimen terkait peningkatan performa turbin angin Savonius pada gedung tinggi sebagai sumber energi ramah lingkungan.

Penelitian lain yang menganalisa peningkatan performa turbin angin Savonius yaitu penelitian dari N. H Mahmoud, dkk (2012) yang bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan melihat pengaruh geometri dari turbin, yaitu pada jumlah *blade*, keberadaan *end plate*, jumlah *stage* pada rotor, nilai *overlap ratio*, dan *aspect ratio* [4]. Parameter yang digunakan pada penelitian ini berupa jumlah sudu (dua, tiga dan empat sudu), jumlah *stage* (*single dan double stage*), *overlap ratio* (0 – 0,35), *aspect ratio* (0,5, 1, 2, 4, 5), dan keberadaan *end plate*. Kecepatan angin rata rata yang digunakan yaitu 0 - 13 m/s. Kesimpulan yang didapatkan dalam penelitian ini adalah pemasangan dua blade, end plate, dan juga double stage rotor memberikan performa yang lebih baik. Selain itu, rotor dengan *overlap ratio* dan penambahan *aspect ratio* memberikan performansi yang lebih baik.

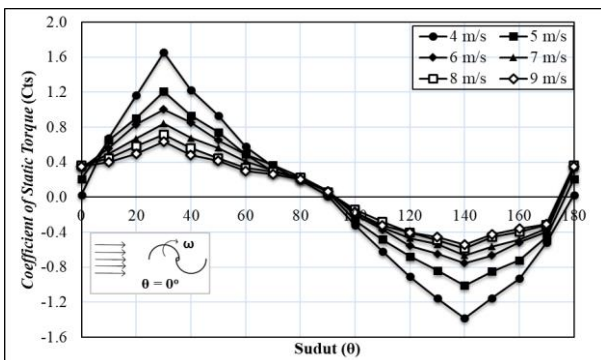
Penelitian terkait pemanfaatan gedung tinggi sebagai salah satu potensi sumber energi terbarukan dengan memanfaatkan sumber energi angin dilakukan oleh Marco Casini (2015) yang bertujuan untuk menjelaskan potensi pemanfaatan turbin angin *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* terhadap



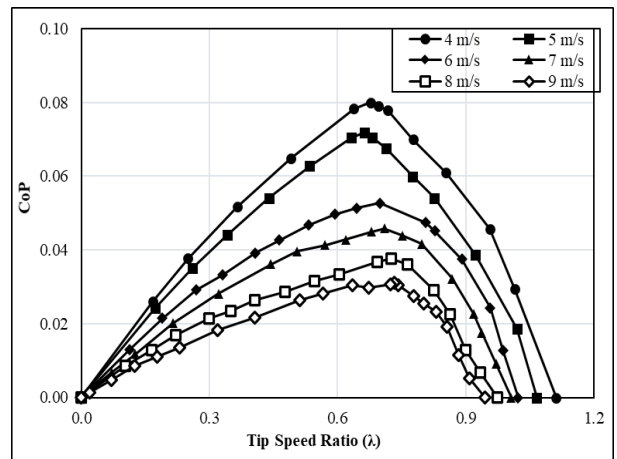
Gambar 4. Grafik CoP fungsi *tip speed ratio* tanpa dinding gedung pada semua variasi kecepatan.



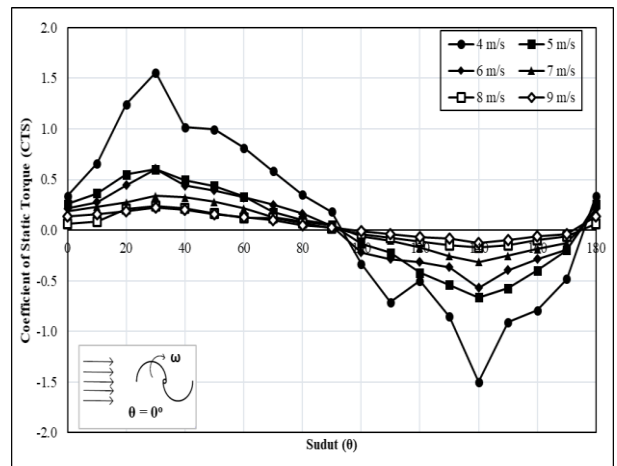
Gambar 5. Grafik cm fungsi *tip speed ratio* tanpa dinding gedung tinggi pada semua variasi kecepatan.



Gambar 6. Grafik Cts fungsi sudut sudu turbin tanpa dinding gedung pada semua variasi kecepatan.



Gambar 7. Grafik CoP fungsi *tip speed ratio* dengan menggunakan dinding gedung pada semua variasi kecepatan.



Gambar 8. Grafik Cts fungsi *tip speed ratio* dengan menggunakan dinding gedung pada semua variasi kecepatan.

gedung tinggi [5]. Selain itu, penelitian ini juga menjelaskan terkait peluang konsep *Building Augmented Wind Turbine (BAWT)* dalam penggunaannya sebagai sumber energi pada gedung tinggi. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini bahwa *small Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* merupakan salah satu solusi yang efektif untuk mewujudkan energi baru terbarukan pada gedung tinggi. akan tetapi, pada penerapannya juga harus memperhatikan beberapa hal seperti kondisi angin sekitar, model turbin, dan juga lokasi yang optimal untuk pemasangan turbin tersebut. Selain itu, hubungan antara desain gedung dengan arah aliran angin juga perlu diperhatikan dalam penerapannya, terutama pada konsep *Building Augmented Wind Turbine (BAWT)*.

Adapun penelitian yang dilakukan untuk pemanfaatan aliran angin pada gedung tinggi telah dilakukan Park, dkk (2015) yang dilakukan dengan membuat sebuah inovasi *Building Integrated Wind Turbine (BIWT)* pada sebuah gedung tinggi [6]. Konsep BIWT yang diusulkan pada penelitian ini berbeda dengan system turbin angin secara umum. Desain yang dianalisa pada penelitian ini adalah dengan menggunakan *guide vane* untuk mengarahkan aliran

angin yang berhembus menuju rotor dari turbin angin yang diinstall. Selain itu, *guide vane* juga di desain pada bagian dalamnya untuk menutupi setengah dari rotor turbin. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya torsi negatif. Selanjutnya, penelitian dilakukan dengan menggunakan analisa *Computational Fluid Dynamics (CFD)* untuk mendapatkan parameter jarak antar *guide vane* dan juga jarak *guide vane* terhadap dinding gedung. Selain itu juga untuk mendapatkan ukuran dari rotor yang paling efisien. Setelah mendapatkan geometri yang paling efisien, selanjutnya dilakukan eksperimen dengan menggunakan *wind tunnel test*. Hasil eksperimen yang didapatkan bahwa dari desain yang dipilih yaitu rotor Savonius dengan jumlah sudu sebanyak 8 dan diameter rotor sebesar 0,3 m, didapatkan penambahan kecepatan angin hingga 300% dan juga mampu menghasilkan *Coefficient of Power (CoP)* sebesar 38,1%.

Penelitian lainnya yang menganalisa tentang pemanfaatan aliran angin pada gedung adalah penelitian yang dilakukan oleh Mao, dkk (2020) yang bertujuan untuk menganalisa performa turbin angin Savonius yang diletakkan pada pojok atas gedung tinggi dengan analisa numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* untuk mengetahui interaksi aliran antara turbin dengan gedung [7]. Terdapat 3 parameter yang dianalisa pada penelitian ini yaitu gap antara turbin dengan gedung, pengaruh antara turbin yang berdekatan, dan arah aliran angin. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah *Coefficient of Power (CoP)* maksimum yang didapatkan pada celah turbin dan gedung

sejauh 0,75 D dengan *Tip Speed Ratio* 1,2 yaitu sebesar 0,7390 dan 234,4% lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius yang beroperasi pada *uniform flow*. Selain itu, pengaruh antar turbin yang satu dan lainnya dapat disimpulkan bahwa turbin pada sisi kanan dan kiri memiliki *Coefficient of Power (CoP)* yang lebih besar daripada sisi yang lainnya dan nilai *Coefficient of Power (CoP)* maksimum yang didapatkan sebesar 1,2093. Untuk pengaruh arah aliran angin, nilai rata-rata *Coefficient of Power (CoP)* turbin dibawah 360° sebesar 0,4256 dimana 92,5% lebih tinggi daripada turbin angin Savonius yang beroperasi pada keadaan *uniform flow*.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan melihat peluang dari pemanfaatan *Building Integrated Wind Turbine (BIWT)*, sejauh ini, penelitian terkait pemanfaatan turbin angin Savonius pada gedung tinggi yang dilakukan juga masih sedikit, maka diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius untuk pemasangan pada gedung tinggi. Pada penelitian ini, dilakukan dengan membuat sebuah perumpamaan dinding gedung dengan menggunakan triplek yang nantinya diletakkan pada sisi samping turbin angin Savonius. Adapun parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah perbandingan jarak dinding gedung dan poros turbin dengan diameter sudu turbin (G/D) yaitu sebesar 1,214 jarak poros turbin dengan dinding depan (S/D) sebesar 4,912 dan jarak dinding atas dengan *endplate* turbin (T/D) sebesar 1,159 dan (K/D) sebesar 1,31 pada variasi kecepatan angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s.

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, analisa dimensi dilakukan untuk mengetahui pengaruh parameter yang ditentukan terhadap performa dari turbin angin Savonius. Penelitian dilakukan dengan menggunakan parameter kecepatan aliran angin (U) yang divariasikan pada kecepatan tertentu dan variasi jarak antara dinding luar gedung tinggi terhadap poros dari turbin angin Savonius (G). Perwujudan gedung tinggi dibuat dengan menggunakan kayu multiplek yang diletakkan pada instalasi penelitian. Selain variasi kedua parameter diatas, performa turbin angin Savonius juga dipengaruhi oleh massa jenis udara (ρ), viskositas udara (μ), tinggi turbin angin Savonius, (H), diameter blade turbin (D_T), diameter turbin angin Savonius (L), jarak antara sisi depan gedung dan poros turbin (S), Jarak antara sisi atas gedung dengan *endplates* (T), jarak *end plate* bagian bawah dengan plat dasar penyangga turbin (K), dan diameter *endplates* (D_o). Adapun keterangan parameter yang dianalisa pada gambar 1 adalah sebagai berikut:

- ρ : Massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : Viskositas udara (Ns/m^2)
- H : Tinggi turbin angin Savonius (m)
- D_T : Diameter blade turbin (m)
- L : Diameter turbin angin Savonius (m)
- S : Jarak sisi depan gedung dan poros turbin (m)
- T : Jarak sisi atas gedung dengan *endplates* (m)
- D_o : diameter *endplates* (m)
- U : Kecepatan aliran angin (m/s)
- G : Jarak dinding luar gedung dan poros turbin (m)
- K : Jarak *end plate* bawah dan plat dasar turbin (m)

A. Skema Penelitian

Susunan skema penelitian dapat dilihat pada gambar 2. Peralatan yang digunakan yaitu *stavolt* sebagai pengatur tegangan, *voltage regulator* sebagai pengatur aliran angin yang dikeluarkan dari *axial fan*, dimana jarak antara *axial fan* dan turbin angin Savonius adalah 3200 mm. Didepan *axial fan* digunakan *honeycomb* yang digunakan untuk membuat aliran yang melintas menjadi *uniform*. Jarak yang digunakan antara *honeycomb* dan *axial fan* adalah sebesar 800 mm. Dinding bangunan diletakkan di samping turbin angin Savonius dengan posisi sudu *advancing* dekat dengan dinding pada rasio jarak $G/D = 1,214$. Selanjutnya, *anemometer* digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang keluar dari *axial fan*, *torque meter* digunakan untuk mengukur besarnya torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius, dan *tachometer* digunakan untuk mengukur kecepatan putaran turbin angin Savonius.

B. Alat Ukur

1) Anemometer

Anemometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran. Pada penelitian kali ini, digunakan *Anemometer* dengan tipe OMEGA HHF141 *Digital Anemometer*

2) Tachometer

Tachometer merupakan sebuah alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan putaran dari sebuah objek yang berputar. Pada penelitian ini, tipe dari *tachometer* yang digunakan adalah *Economical-Non-Contact Pocket Optical Tachometer* OMEGA seri HHT12.

3) Torque Meter

Torque Meter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Pada penelitian ini, *Torque Meter* yang digunakan adalah tipe LUTRON model YQ-8800 dengan high resolution 0,1 N-Cm.

4) Brake Dynamometer

Brake dynamometer merupakan sebuah alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilkan pada putaran suatu objek yang diuji. Konsep hasil yang didapatkan pada system *brake dynamometer* yaitu melalui perhitungan selisih antara massa pemberat dan nilai yang dibaca pada neraca pegas. Adapun instalasi *brake dynamometer* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.

5) Voltage Regulator

Voltage Regulator merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengatur besar kecilnya keluaran aliran angin dengan mengatur *output* tegangan yang dibutuhkan. Pada penelitian ini, *Voltage Regulator* yang digunakan adalah tipe TDGC2 3KVA.

6) Stavolt

Pada penelitian ini, digunakan alat ukur lainnya yaitu *Stavolt*. *Stavolt* digunakan untuk menjaga tegangan yang masuk melalui *Voltage Regulator* yang diatur menuju fan sehingga aliran angin yang dihasilkan akan lebih stabil.

7) Neraca Pegas

Neraca pegas merupakan alat ukur yang digunakan sebagai alat ukur sebuah nilai pada sebuah eksperimen. Adapun pada penelitian ini, neraca pegas digunakan untuk alat ukur nilai

torsi dinamis yang dihasilkan pada *brake dynamometer* dalam satuan gram. Berat dari beban pemberat akan dibaca pada neraca pegas ini. Adapun nantinya, nilai yang ditunjukkan harus dikurangi dengan berat wadah dari pemberat yang digunakan. Selisih tersebut digunakan untuk perhitungan selanjutnya dalam mencari nilai *coefficient of power*.

C. Peralatan

1) Turbin Angin Savonius.

Dalam penelitian ini, benda uji yang digunakan untuk analisa adalah turbin angin Savonius dengan spesifikasi dan ukuran sebagai berikut :

- a. Diameter Sudu (D) : 165,2 mm
- b. Tinggi Turbin (H) : 303,4 mm
- c. Diameter Turbin (L) : 303,4 mm
- d. Diameter Poros : 19 mm
- e. Diameter *End Plates* : 321 mm
- f. Tebal *End Plates* : 1 mm
- g. Tebal Sudu Turbin : 4 mm
- h. Material Sudu Turbin : Pipa PVC
- i. Material *End Plates* : Alumunium Cladding 2024

2) Kayu Multiplek

Untuk mendukung penelitian ini, digunakan kayu multiplek untuk perwujudan dari gedung tinggi untuk tempat turbin angin Savonius diletakkan. Perwujudan gedung yang dibuat hanya pada bagian dinding depan dan juga dinding samping gedung dengan ukuran sebagai berikut:

- a. Panjang Dinding : 1550 mm
- b. Lebar Dinding : 450 mm
- c. Tinggi Dinding : 705 mm

3) Honeycomb

Honeycomb merupakan alat yang digunakan untuk membuat aliran angin yang berasal dari *axial fan* menjadi aliran angin yang *uniform*. Adapun spesifikasi dari *honeycomb* yang digunakan memiliki ukuran sebagai berikut.

- a. Panjang sisi *honeycomb* : 630 mm
- b. Lebar sisi *honeycomb* : 460 mm
- c. Tebal *honeycomb* : 20 mm
- d. Panjang sisi bingkai : 750 mm
- e. Lebar sisi bingkai : 490 mm
- f. Tebal bingkai : 30 mm
- g. *Meshing size* : 0,0248 lubang/mm²

4) Bearing

Bearing merupakan salah satu komponen peralatan yang digunakan untuk mengurangi gesekan antara poros dan benda uji, yaitu turbin angin Savonius sehingga dapat membantu memudahkan poros untuk berputar dengan gaya gesek yang kecil. Adapun jenis bearing yang digunakan adalah *bearing double row contact ball bearing* dengan tipe SKF 3201 ATN9.

5) Kerangka Penyangga Turbin

Kerangka penyangga turbin angin Savonius digunakan sebagai tempat untuk meletakkan seluruh komponen dari turbin angin Savonius termasuk poros dan juga bearing.

6) Pemberat

Beban pemberat pada penelitian ini digunakan untuk mendapatkan hasil nilai torsi dinamis dan variasi dari nilai

TSR pada *brake dynamometer*. Beban pemberat yang digunakan bermacam macam, yaitu antara 3-20 gram. Untuk penggunaan beban pemberat, ditambahkan dengan perlahan mulai dengan beban terendah. Hal ini dikarenakan agar hasil yang didapatkan lebih spesifik. Selain itu, penambahan secara perlahan juga bertujuan untuk mengetahui titik terendah dari grafik yang dihasilkan.

D. Metode Pengukuran Data

Gambar 2 menunjukkan skema dan instalasi peralatan yang digunakan pada eksperimen ini. Pengukuran kecepatan angin dilakukan pada jarak 4D di depan turbin angin Savonius. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya efek putaran balik dari sudu turbin angin Savonius.

Adapun hasil pengukuran yang didapatkan pada eksperimen ini adalah nilai torsi statis dan torsi dinamis yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai *coefficient of power*, *coefficient of moment*, dan *coefficient of static torque*. Torsi statis diukur dengan menggunakan *torque meter*. Sedangkan untuk torsi dinamis diukur dengan menggunakan sistem *brake dynamometer* dengan skema sesuai dengan gambar 3.

E. Perhitungan Performa Turbin Angin Savonius

Pada eksperimen ini, kecepatan angin yang digunakan yaitu sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s atau dengan bilangan Reynold yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

dimana Re merupakan bilangan Reynold, ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), U adalah kecepatan angin (m/s), L adalah panjang karakteristik (m), dan μ adalah viskositas dinamis fluida (N.s).

Pada penelitian ini, panjang karakteristik yang digunakan dalam perhitungan bilangan Reynold adalah diameter turbin angin Savonius dimana $L = 2D - b - 2t$.

Daya yang didapatkan oleh turbin angin Savonius dari energi angin disebut dengan daya teoritis yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} U^2 \quad (2)$$

dimana P_w adalah daya teoritis turbin dalam satuan Watt dan A adalah luasan penampang turbin angin Savonius yang mengenai angin (m^2). Adapun luas penampang A dapat dicari dengan cara

$$A = L.H = (2D - b - 2t).H \quad (3)$$

Untuk mendapatkan nilai daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$P_T = T_d \omega \quad (4)$$

dimana P_T adalah daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dalam satuan watt. ω merupakan kecepatan putar turbin angin Savonius dalam satuan rad/s. Sedangkan T_d adalah torsi dinamis dalam satuan N.m. Adapun nilai daya aktual yang didapatkan dari penelitian ini adalah dengan menggunakan sistem *brake dynamometer* dengan penambahan beban ketika turbin angin Savonius mulai berputar hingga turbin berhenti berputar. Torsi dinamis yang

didapatkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

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

Pada persamaan diatas, m merupakan massa pemberat dalam satuan (kg), g merupakan percepatan gravitasi dalam satuan m/s^2 , lalu s merupakan massa yang terbaca pada neraca pegas dalam satuan kg sedangkan r merupakan jari jari poros turbin dalam satuan m.

Selanjutnya adalah mencari nilai *tip speed ratio* yang merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial dari turbin angin Savonius dengan kecepatan angin yang digunakan. Nilai *tip speed ratio* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

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

Untuk mencari nilai *coefficient of power* didapatkan dari hasil perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh rotor turbin terhadap daya yang didapatkan dari angin yang dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} \quad (7)$$

$$CoP = \frac{|m-s| g r \frac{\pi n}{30}}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (8)$$

Lalu, dalam mencari nilai *coefficient of moment* didapatkan dari hasil perbandingan antara nilai torsi dinamis terhadap torsi teoritis yang dapat dituliskan pada persamaan sebagai berikut

$$C_m = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \rho A R U^2} \quad (9)$$

Selanjutnya, hasil yang didapatkan yaitu nilai *coefficient of static torque* yang merupakan perbandingan dari torsi statis terhadap torsi teoritis yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$C_{Ts} = \frac{4T_s}{\rho A U^2 L} \quad (10)$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Menggunakan Dinding Gedung

Dalam penelitian ini, dilakukan analisa terkait performa turbin angin Savonius tanpa menggunakan kayu multiplek sebagai gedung tinggi. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui kondisi awal performa dari turbin angin Savonius itu sendiri. Selain itu juga pengukuran ini dilakukan sebagai pembandingan performa dari turbin angin Savonius pada kondisi awal dengan turbin angin Savonius yang menggunakan kayu multiplek sebagai gedung tinggi. Hasil perbandingan yang didapatkan akan menunjukkan apakah penempatan turbin angin Savonius yang diletakkan pada sebuah gedung tinggi memiliki performa yang lebih baik atau tidak. Sehingga kita akan mengetahui dampak yang dihasilkan dari adanya kayu multiplek sebagai gedung tinggi tersebut. Untuk parameter yang akan dianalisa dilakukan pada hasil *Coefficient of Power (CoP)*, *Coefficient of Moment (Cm)* terhadap fungsi dari *Tip Speed Ratio*. Analisa dilakukan dengan menggunakan kecepatan aliran angin 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s.

1) Analisa Coefficient of Power Tanpa Menggunakan Dinding Gedung Sebagai Fungsi Tip Speed Ratio

Pengukuran *Coefficient of Power (CoP)* dilakukan dengan pengukuran pada variasi kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Analisa dilakukan dengan menggunakan grafik nilai *Coefficient of Power (CoP)* yang didapatkan terhadap fungsi *Tip Speed Ratio* (λ). Pengukuran dilakukan berdasarkan nilai torsi dinamis yang didapatkan dari system *brake dynamometer*. Lalu untuk kecepatan putar poros turbin didapatkan dari hasil pengukuran menggunakan *tachometer*. Adapun grafik dari *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa menggunakan gedung dapat dilihat pada gambar 4.

Berdasarkan gambar 4 tersebut, dapat dilihat untuk kecepatan 4 m/s, nilai CoP maksimum yang dihasilkan 0,0451 pada *Tip Speed Ratio* 0,687, pada kecepatan 5 m/s, CoP maksimal sebesar 0,0866 pada *Tip Speed Ratio* 0,717, pada kecepatan 6 m/s, CoP maksimal sebesar 0,0693 pada *Tip Speed Ratio* 0,704, pada kecepatan 7 m/s, CoP maksimal sebesar 0,0632 pada *Tip Speed Ratio* 0,678, pada kecepatan 8 m/s, CoP maksimal sebesar 0,0572 pada *Tip Speed Ratio* 0,715 dan pada kecepatan 9 m/s, CoP maksimal sebesar 0,517 pada *Tip Speed Ratio* 0,712.

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 0,68 – 0,72. 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 Moment Tanpa Menggunakan Dinding Gedung Sebagai Fungsi Tip Speed Ratio

Analisa grafik *Coefficient of Moment (Cm)* dengan fungsi *Tip Speed Ratio* didapatkan dari hasil pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan Torque Meter. Nilai dari *Coefficient of Moment* didapatkan dari perbandingan antara torsi aktual yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan torsi teoritis. Selain itu, untuk mendapatkan variasi *tip speed ratio* digunakan sistem *brake dynamometer* dengan menggunakan penambahan beban secara berlanjut hingga turbin berhenti berputar. Adapun grafik C_m fungsi TSR yang dihasilkan pada turbin angin Savonius yang tidak menggunakan gedung dapat dilihat pada gambar 5.

Berdasarkan grafik *Coefficient of Moment (Cm)* fungsi *Tip Speed Ratio (TSR)* pada gambar 5, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai dari TSR, maka nilai C_m yang dihasilkan akan semakin kecil. Pada kecepatan 4 m/s, nilai C_m maksimum yang dihasilkan yaitu 0,1070, pada kecepatan 5 m/s, nilai C_m maksimum sebesar 0,2013, pada kecepatan 6 m/s, nilai C_m maksimum sebesar 0,1882, pada kecepatan 7 m/s, nilai C_m maksimum sebesar 0,1477, pada kecepatan 8 m/s, nilai C_m maksimum sebesar 0,1460 dan pada kecepatan 9 m/s, nilai C_m maksimum sebesar 0,1244. Dilihat dari variasi kecepatan nilai dari C_m juga dipengaruhi oleh

parameter kecepatan. Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa nilai C_m naik dari kecepatan 4 m/s hingga 5 m/s. Setelah itu, pada kecepatan 6 m/s – 9 m/s, nilai C_m akan semakin menurun. Sehingga perlu adanya kecepatan optimum dalam menentukan penggunaan turbin angin Savonius. Apabila kecepatan terlalu rendah, maka torsi dinamis yang dihasilkan akan semakin kecil sehingga menyebabkan nilai C_m akan semakin kecil. Lalu apabila nilai C_m terlalu besar, maka hal ini akan menyebabkan *losses* yang disebabkan oleh turbin angin Savonius akan semakin besar sehingga nilai C_m akan semakin menurun.

3) Analisa Coefficient of Static Torque Tanpa Menggunakan Dinding Gedung Sebagai Fungsi Tip Speed Ratio

Analisa *Coefficient of Static Torque (Cts)* dilakukan untuk mengetahui kekuatan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada setiap sudut putarannya. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan *Torque Meter* dan diukur pada keadaan turbin angin Savonius diam dan dialiri oleh angin. Pada penelitian ini, pengukuran torsi statis dilakukan pada posisi sudut turbin antara $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan kenaikan setiap posisinya 10° . Hasil pengukuran yang dihasilkan oleh *Torque Meter* merupakan selisih dari torsi statis yang dihasilkan kedua *blade* turbin angin Savonius, yaitu pada *advancing blade* dan *returning blade*. Sehingga hasil grafik yang dihasilkan terdapat hasil torsi yang positif pada posisi tertentu, dan torsi negatif pada posisi tertentu. Adapun hasil grafik yang *Coefficient of Static Torque (Cts)* fungsi *Tip Speed Ratio* yang dihasilkan (TSR) dapat dilihat pada gambar 6.

Berdasarkan grafik *Coefficient of Static Torque (Cts)* pada gambar 6, dapat dilihat terdapat beberapa nilai torsi statis yang positif, yaitu pada sudut antara 0° sampai 90° dan nilai torsi statis yang negatif, yaitu pada sudut 90° hingga 180° . Adanya perbedaan nilai positif dan negatif tersebut, menunjukkan bahwa pada posisi yang dimana memiliki nilai torsi statis yang positif, turbin angin Savonius dapat melakukan *self-starting* ketika akan bekerja. Jika memiliki nilai negatif maka turbin tersebut tidak dapat melakukan *self-starting* ketika akan bekerja dan harus mendapatkan gaya bantuan terlebih dahulu.

Dari data hasil pengukuran yang didapatkan, dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Static Torque (Cts)* yang didapatkan memiliki nilai maksimum pada sudut 30° pada semua kecepatan. Sedangkan nilai torsi statis minimum terjadi pada posisi turbin angin Savonius pada sudut 140° pada semua kecepatan. Adapun pada kecepatan 4 m/s, nilai maksimum torsi statis yang didapatkan yaitu 1,6535 dan torsi minimum yang didapatkan -1,383. Pada kecepatan 5 m/s, torsi statis maksimum yang didapatkan 1,2091 dan torsi minimum sebesar -1,009. Pada kecepatan 6 m/s didapatkan torsi maksimum sebesar 1,003 dan torsi minimum sebesar -0,754. Pada kecepatan 7 m/s, torsi maksimum yang didapatkan sebesar 0,8419 dan torsi minimum sebesar -0,665. Pada kecepatan 8 m/s, torsi statis maksimum yang didapatkan yaitu 0,7169 dan torsi minimum sebesar -0,488, dan pada kecepatan 9 m/s, didapatkan torsi maksimum sebesar 0,636 dan torsi minimum sebesar -0,457. Berdasarkan dari data yang didapatkan pada grafik 4.4, dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan yang digunakan, maka nilai *Coefficient of*

Static Torque minimum yang dihasilkan semakin meningkat. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin besar kecepatan, semakin meningkat juga nilai C_{ts} minimum yang dihasilkan, sehingga semakin efektif untuk meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius.

B. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Dengan Menggunakan Dinding Gedung

1) Analisa Coefficient of Power Dengan Menggunakan Dinding Gedung Sebagai Fungsi Tip Speed Ratio

Analisa *Coefficient of Power (CoP)* fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) menggunakan gedung tinggi dilakukan dengan menggunakan variasi kecepatan 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s dengan peletakan turbin angin Savonius pada sisi *advancing blade* dekat dengan dinding gedung. Analisa dilakukan dengan membandingkan performa turbin angin Savonius tanpa menggunakan dinding gedung dengan menggunakan dinding gedung melalui nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh masing masing variasi.

Dari hasil yang didapatkan pada gambar 7, dapat diketahui bahwa nilai CoP pada turbin angin Savonius dengan menggunakan dinding pada rasio jarak G/D sebesar 1,214 memiliki nilai CoP paling optimum pada kecepatan 4 m/s. Lalu, pada kecepatan 5 m/s dan 6 m/s memiliki nilai CoP yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan, pada rasio jarak G/D = 1,214 dan dengan penggunaan kecepatan 4 dan 5 m/s sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Mao, dkk (2020) bahwa daerah aliran yang terdefleksi *high velocity region* [7]. Maka dari itu, dapat dikatakan bahwa aliran yang terdefleksi dari sisi depan dinding gedung cenderung mengarah sisi *advancing blade* dan turbin berada pada daerah *high velocity region*. Sehingga, gaya *drag* akan semakin meningkat, torsi yang dihasilkan oleh juga akan semakin meningkat dan daya turbin yang dihasilkan pun juga akan semakin meningkat. Sedangkan pada kecepatan 6 dan 7 m/s, didapatkan nilai CoP yang tidak begitu tinggi. Hal ini dikarenakan pada kecepatan ini, dapat dikatakan bahwa aliran yang terefleksi dari sisi depan gedung cenderung mengarah pada sisi *returning blade* dan turbin berada pada daerah *low velocity region*. Sehingga gaya *drag* yang dihasilkan semakin menurun dan mengakibatkan daya turbin yang dihasilkan juga semakin menurun. Selanjutnya pada kecepatan yang cukup tinggi, yaitu pada kecepatan 8 dan 9 m/s, dapat dilihat bahwa nilai CoP yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini dapat dikatakan bahwa pada kecepatan tersebut, aliran yang terdefleksi dari sisi depan gedung cenderung semakin menjauh dari turbin dan turbin berada pada daerah *low velocity region*. Sehingga gaya *drag* yang dihasilkan semakin menurun dan nilai daya yang dihasilkan juga semakin menurun.

2) Analisa Coefficient of Torque Dengan Menggunakan Dinding Gedung Sebagai Fungsi Tip Speed Ratio

Analisa selanjutnya adalah terkait pengaruh dari pemasangan dinding gedung tinggi terhadap *coefficient of static torque (Cts)* pada turbin angin Savonius. Analisa dilakukan dengan melakukan pengambilan data torsi statis pada sudut sudu turbin (θ) 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° dan memvariasikan kecepatan aliran angin yang menuju turbin angin Savonius, yaitu sebesar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s pada jarak G/D sebesar 1,214. Adapun grafik yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 8.

Berdasarkan hasil grafik yang didapatkan pada gambar 8, dapat dilihat bahwa grafik nilai *Coefficient of Static Torque* pada turbin angin Savonius dengan menggunakan dinding gedung memiliki tren grafik berbentuk sinusoidal, dengan nilai Cts maksimum dan minimum pada sudut sudu turbin tertentu. Adapun nilai Cts maksimum yang didapatkan pada turbin angin Savonius dengan menggunakan dinding gedung yaitu pada kecepatan 4 m/s sebesar 1,553 N-Cm pada sudut sudu turbin 30° dan nilai Cts minimum sebesar -1,50 N-Cm pada sudut sudu turbin 140°.

Dari hasil grafik yang didapatkan, dapat dilihat bahwa terdapat nilai Cts yang bernilai negatif di rentang sudut sudu turbin 90° hingga 180° pada turbin angin Savonius menggunakan dinding dengan rasio jarak G/D = 1,214 dan penempatan *advancing blade* dekat dinding di kecepatan 4 – 9 m/s. adanya torsi negatif menunjukkan bahwa turbin angin Savonius memiliki kemampuan self starting yang kurang baik pada rentang sudut sudu turbin tersebut. Lalu, berdasarkan dari hasil grafik yang didapatkan, dapat dilihat bahwa semakin besar kecepatan yang dihasilkan, maka daerah dari nilai torsi negatif yang dihasilkan semakin kecil. Sehingga, semakin besar nilai kecepatan yang digunakan, maka *self starting* yang dihasilkan dari turbin angin Savonius semakin baik. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan dinding gedung dan penempatan *advancing blade* dekat dengan dinding dengan rasio G/D = 1,214 efektif untuk meningkatkan *self starting* turbin angin Savonius.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan pada turbin angin Savonius menggunakan dinding gedung dengan rasio jarak G/D = 1,214 dan peletakan *advancing blade* dekat dinding. Variasi kecepatan yang dilakukan pada penelitian ini adalah 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 m/s. Berdasarkan hasil penelitian yang didapatkan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut: (1) Penggunaan dinding pada rasio jarak G/D = 1,214 dan peletakan *advancing blade* dekat dengan dinding dapat

meningkatkan performa turbin angin Savonius di kecepatan 4 m/s dengan nilai CoPmaks sebesar 0,08. Nilai *Coefficient of Power* tersebut memberikan peningkatan sebesar 77 % dari turbin angin Savonius tanpa menggunakan dinding gedung. (2) Penggunaan dinding pada rasio jarak G/D = 1,214 dan peletakan *advancing blade* dekat dengan dinding dapat meningkatkan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius di kecepatan 4 m/s dengan nilai Cmmaks sebesar 0,1603. Nilai *Coefficient of Moment* tersebut memberikan peningkatan sebesar 50 % dari turbin angin Savonius tanpa menggunakan dinding gedung. (3) Penggunaan dinding pada rasio jarak G/D = 1,214 dan peletakan *advancing blade* dekat dengan dinding efektif dalam meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius di kecepatan 4-9 m/s yang ditunjukkan dengan adanya peningkatan *Coefficient of Static Torque* minimum. Akan tetapi, hasil yang didapatkan masih belum mampu membuat turbin angin Savonius memiliki kemampuas *self starting* pada setiap sudut sudu turbin akibat dari adanya nilai Cts yang bernilai negatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik. (2020). *Neraca Energi Indonesia 2015-2019*. Jakarta: Badan Pusat Statistik, 1–70.
- [2] (BPPT) Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2019). *Indonesia Energy Outlook 2019: The Impact of Increased Utilization of New and Renewable Energy on the National Economy*. Jakarta: Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi.
- [3] Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). Laporan Kajian Penelaahan Neraca Energi Nasional 2019. Jakarta: Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral, 1–79.
- [4] Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., & Nasef, M. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51 (1): 19–25.
- [5] Casini, Marco. 2015. "Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings". *Journal of Clean Energy Technologies* 4 (1): 56-65.
- [6] Park, Jeoungsu, Hyung Jo Jung, Seung Woo Lee, and Jiyoung Park. 2015. "A new building-integrated wind turbine system utilizing the building". *Energies* 8 (10): 11846-70.
- [7] Mao, Z., Yang, G., Zhang, T., & Tian, W. (2020). Aerodynamic performance analysis of a building-integrated Savonius turbine. *Energies*, 13 (10): 2636.